

Mining Science and Technology

Горные науки
и технологии

Vol.
Том 9 №3
2024



<https://mst.misis.ru/>

<https://t.me/MinSciTech>



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

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

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

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Петров Вадим Леонидович, проф., д.т.н., Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

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

Эпштейн Светлана Абрамовна, д.т.н., Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

Боярко Григорий Юрьевич – проф., д.э.н., к.г.-м.н., Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация

Буи Суан Нам, проф., д-р наук, Ханойский университет горного дела и технологий, г. Ханой, Вьетнам

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

Герел Очир, проф., д.г.-м.н., Центр геолого-геофизических исследований, Монгольский университет науки и технологий, г. Улан-Батор, Монголия

Глигорич Зоран, проф., д-р наук, Белградский университет, г. Белград, Республика Сербия

Дребенштедт Карстен, проф., д-р наук, Технический университет Фрайбургская горная академия, г. Фрайбург, Германия

Дулати Ардежани Фарамарз, проф., д-р наук, Инженерный колледж, Тегеранский университет, г. Тегеран, Иран

Ершов Михаил Сергеевич, проф., д.т.н., Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация

Журавлева Наталья Викторовна, проф., д.т.н., АО «Западно-Сибирский испытательный центр» (АО «ЗСИЦентр»), г. Новокузнецк, Российская Федерация

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

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

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

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

Кумар Джьянт, проф., д-р наук (геотехнический инжиниринг), Индийский институт науки (Indian Institute of Science), г. Бангалор, Индия

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

Малафеев Сергей Иванович, проф., д.т.н., Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир, Российская Федерация

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

Морозов Валерий Валентинович, проф., д.т.н., Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация

Петров Игорь Михайлович, д.т.н., ООО «Исследовательская группа «Инфолайн»», г. Москва, Российская Федерация

Раимжанов Бахадиржан Раимжанович, проф., д.т.н., филиал Университета науки и технологий МИСИС, г. Алматы, Узбекистан

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

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

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

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

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

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

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

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

Юрак Вера Васильевна, доц., д.э.н., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург; старший научный сотрудник, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭ УрО РАН), г. Екатеринбург, Российская Федерация

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Агафонов Юрий Григорьевич, доц., к.т.н., Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация

Плащанский Леонид Александрович, проф., к.т.н., Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация

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

Филонов Михаил Рудольфович, проф., д.т.н., Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Галушка Дарья Петровна, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация

ПЕРИОДИЧНОСТЬ 4 раза в год

ОСНОВАН в 2016 году

РЕГИСТРАЦИЯ

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

Свидетельство о регистрации Эл № ФС77-62652.

ИНДЕКСИРОВАНИЕ

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



Журнал открытого доступа.

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ



МИСИС Университет науки и технологий
УНИВЕРСИТЕТ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

АДРЕС УЧРЕДИТЕЛЯ И ИЗДАТЕЛЯ

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

КОНТАКТЫ РЕДАКЦИИ

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

Телефон: +7 (495) 955-00-77

e-mail: send@misis.ru



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.



Activities of the Mining Science and Technology (Russia) (Gornye nauki i tekhnologii) international journal are aimed at developing international scientific and professional cooperation in the field of mining.

The journal target audience comprises researchers, specialists in the field of mining, representatives of academic and professional communities.

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

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

EDITOR-IN-CHIEF

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

DEPUTIES EDITOR-IN-CHIEF

Oleg I. Kazanin, Prof., Dr.Sci.(Eng.), Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation

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

EDITORIAL BOARD

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

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

Grigory Yu. Boyarko, Prof. Dr. Sci. (Econ.), Cand. Sci. (Geol. and Miner.), National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

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

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

Faramarz Doulati Ardejani, Prof., Ph.D., Colledge of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Mikhail S. Ershov, Prof., Dr.Sci.(Eng.), National University of Oil and Gas "Gubkin University", Moscow, Russian Federation

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

Ochir Gerel, Prof., Dr.Sci.(Geol. and Min.), Geoscience Center, the Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaatar, Mongolia

Zoran Gligorić, Prof., Dr.Sci. (Mining-Underground Mining), University of Belgrade, Belgrade, Republic of Serbia

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

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

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

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

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

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

Jyant Kumar, Prof., Ph.D-Geotech.Eng., Indian Institute of Science, Bengaluru, India

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

Sergey I. Malafeev, Prof., Dr.Sci.(Eng.), Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia

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

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

Igor M. Petrov, Dr.Sci.(Eng.), Infomine Research Group LLC, Moscow, Russian Federation

Bakhadirzhan R. Raimzhanov, Prof., Dr.Sci.(Eng.), University of Science and Technology MISIS (branch), Almalyk, Uzbekistan

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

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

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

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

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

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

Natalia Zhuravleva, Prof., Dr.Sci.(Eng.), West Siberian Testing Center JSC (WSTCenter JSC), Novokuznetsk, Russian Federation

Vera V. Yurak, Assoc. Prof., Dr. Sci. (Econ.), Ural State Mining University, Yekaterinburg; Institute of Economics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation

EDITORIAL COUNCIL

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

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

Leonid A. Plashchansky, Prof., Cand.Sci.(Eng.), University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

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

EXECUTIVE SECRETARY

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

QUARTERLY

FOUNDED in 2016

REGISTRATION

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

INDEXATION

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

FOUNDER AND PUBLISHER



MISIS University of Science and Technology
MISIS

CONTACT

4 Leninsky Prospect, Moscow 119049, Russian Federation

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

e-mail: send@misis.ru



This work is licensed under a
[Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



СОДЕРЖАНИЕ

СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Модель годографа электромагнитных волн, дифрагированных на локальном объекте при георадиолокационном изучении слоев горных пород криолитозоны 199
К. О. Соколов

Оценка рейтинговых показателей состояния горного массива глубоких горизонтов подземного рудника Удачный 206
Е. В. Серебряков, И. А. Зайцев, А. А. Потака

Применение гидродинамического моделирования на основе композиционной модели для повышения эффективности разработки газоконденсатной залежи 221
К. О. Томский, М. С. Иванова, Е. Д. Никитин, Л. А. Рудых

ОБОГАЩЕНИЕ, ПЕРЕРАБОТКА МИНЕРАЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

«Невидимые» благородные металлы в углеродистых породах и продуктах обогащения: возможность выявления и укрупнения 231
Т. Н. Александрова, А. В. Афанасова, В. А. Абурова

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Оценка готовности вспомогательных горноспасательных команд угольных шахт 243
В. А. Руденко

Исследование термодинамических параметров воздушной среды на линиях метрополитенов с однопутными и двухпутными тоннелями 250
С. Г. Гендлер, М. С. Крюкова, Е. Л. Алферова

Оценка эффективности очистки сточных вод угольных предприятий от взвешенных веществ различными фильтрующими материалами 263
Л. А. Иванова, А. Ю. Просеков, П. П. Иванов, Е. С. Михайлова, И. В. Тимощук, А. К. Горелкина

Экологически чистые геотехнологии выщелачивания металлов из твердых и жидких отходов обогащения полиметаллического сырья 271
В. И. Голик, Ю. И. Разоренов, Н. Г. Валиев, О. А. Гаврина

Обоснование экологической безопасности при эксплуатации объектов метрополитена с учетом гидрогеологического риска 283
С. А. Жуков

ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Устойчивость регулируемого привода штанговой насосной установки в рабочих режимах и при провалах напряжения в сети 292
М. С. Ершов, Е. С. Ефимов



CONTENTS

MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Model of time-distance curve of electromagnetic waves diffracted on a local feature
in the georadar study of permafrost zone rock layers..... 199
K. O. Sokolov

Assessment of rating parameters of the rock mass conditions
at Udachny underground mine deep levels..... 206
E. V. Serebryakov, I. A. Zaytsev, A. A. Potaka

Application of hydrodynamic simulation on the basis of a composite model to improve
the efficiency of gas-condensate reservoir development..... 221
K. O. Tomskiy, M. S. Ivanova, E. D. Nikitin, L. A. Rudykh

BENEFICIATION AND PROCESSING OF NATURAL AND TECHNOGENIC RAW MATERIALS

“Invisible” noble metals in carbonaceous rocks and beneficiation products:
feasibility of detection and coarsening..... 231
T. N. Aleksandrova, A. V. Afanasova, V. A. Aburova

SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Assessment of readiness of auxiliary mine rescue teams in coal mines 243
V. A. Rudenko

Investigation of thermodynamic parameters of the air environment in subway lines
with single-track and double-track tunnels 250
S. G. Gendler, M. S. Kryukova, E. L. Alferova

Assessment of the efficiency of wastewater treatment from coal enterprises
for suspended solids using various filtering materials..... 263
L. A. Ivanova, A. Yu. Prosekov, P. P. Ivanov, E. S. Mikhaylova, I. V. Timoshchuk, A. K. Gorelkina

Environmentally sound geotechnologies for leaching metals
from polymetallic ore processing wastes and wastewater 271
V. I. Golik, Yu. I. Razorenov, N. G. Valiev, O. A. Gavrina

Substantiation of environmental safety
in metro facility operations considering hydrogeological risks..... 283
S. A. Zhukov

POWER ENGINEERING, AUTOMATION, AND ENERGY PERFORMANCE

Stability of a controlled sucker-rod pump unit drive under operating conditions
and during voltage dips in the electrical network..... 292
M. S. Ershov, E. S. Efimov



СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-05-118>

УДК 53.072:551.553:621.37:551.34

**Модель годографа электромагнитных волн,
дифрагированных на локальном объекте при георадиолокационном изучении
слоев горных пород криолитозоны**К. О. Соколов   *Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация* k.sokolov@ro.ru**Аннотация**

В георадиолокации одной из наиболее популярных процедур определения скорости распространения электромагнитных волн в массиве горных пород является подбор теоретических гиперболических годографов с последующим сравнением с годографом, полученным при георадиолокационном измерении. Эта процедура основана на модели однородной среды, но в настоящее время объектом изучения георадиолокации часто становятся неоднородные среды, такие как горизонтально-слоистые среды, характерные для рыхлых отложений криолитозоны. В статье представлены результаты исследования формирования гиперболических годографов георадиолокационных сигналов в горизонтально-слоистой среде без учета дисперсии и поглощения электромагнитных волн. На основе законов геометрической оптики выведены формулы, позволяющие рассчитать форму гиперболической оси синфазности георадиолокационных сигналов, отраженных от локального объекта в многослойном массиве мерзлых горных пород. На примере массива горных пород криолитозоны, содержащего слой незамерзших горных пород, показано влияние мощностей слоев горных пород и их относительной диэлектрической проницаемости на кажущуюся диэлектрическую проницаемость, получаемую в результате расчета теоретического гиперболического годографа. Также представлены условия, при которых невозможно определить наличие слоя незамерзших горных пород по гиперболическому годографу. Установленные закономерности апробированы на синтетических георадиолокационных радарограммах, рассчитанных в программе grgMax. Результаты теоретических исследований подтверждены сравнением с результатами анализа данных компьютерного моделирования георадиолокационных измерений в системе grgMax (относительная погрешность составила менее 0,5 %).

Ключевые слова

модель, массив, горные породы, диэлектрическая проницаемость, скорость, гипербола, слой, георадиолокация, криолитозона, grgMax

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0297-2021-0020, ЕГИСУ НИОКТР № 122011800086-1).

Для цитирования

Sokolov K.O. Model of time-distance curve of electromagnetic waves diffracted on a local feature in the georadar study of permafrost zone rock layers. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):199–205. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-05-118>

MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research paper

**Model of time-distance curve of electromagnetic waves diffracted
on a local feature in the georadar study of permafrost zone rock layers**K. O. Sokolov   *N.V. Chersky Mining Institute of the North of the Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, Russian Federation* k.sokolov@ro.ru**Abstract**

In GPR (georadar) studies, one of the most popular procedures for determining electromagnetic waves propagation velocity in a rock mass is the selection of theoretical hyperbolic time-distance curves and subsequent comparison with the time-distance curve obtained from a GPR measurement. This procedure is based on the model of homogeneous medium, but nowadays the subject of GPR study is often inhomogeneous media, such as



horizontally layered media characteristic of loose permafrost zone sediments. The paper presents the findings of studying the formation of hyperbolic time-distance curves of georadar impulses in a horizontally layered medium without taking into account the dispersion and absorption of electromagnetic waves. On the basis of geometrical optics laws, formulas were derived to calculate the shape of the hyperbolic lineup of georadar impulses reflected from a local feature in a multilayer frozen rock mass. On the example of a permafrost zone rock mass containing a layer of unfrozen rocks, the effect of the thicknesses of rock layers and their relative dielectric permittivity on the apparent dielectric permittivity resulting from the calculation of the theoretical hyperbolic time-distance curve was shown. The conditions under which it is impossible to determine the presence of a layer of unfrozen rocks from a hyperbolic time-distance curve are also presented. The established regularities were tested on synthetic georadar radargrams calculated in the gprMax software program. The findings of the theoretical studies were confirmed by the comparison with the results of the analysis of the georadar measurements computer simulation data in the gprMax system (the relative error was less than 0.5%).

Keywords

model, rock mass, rocks, dielectric permittivity, velocity, hyperbola, layer, georadar, permafrost zone, gprMax

Acknowledgments

The study was performed within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. 0297-2021-0020, EGISU NIOKTR (Unified State Information System for R&D Accounting) No. 122011800086-1).

For citation

Sokolov K.O. Model of time-distance curve of electromagnetic waves diffracted on a local feature in the georadar study of permafrost zone rock layers. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):199–205. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-05-118>

Введение

Одной из геофизических задач, решаемых с привлечением метода георадиолокации, является исследование физико-механических свойств горных пород. Однако накопление экспериментальных материалов и развитие методического обеспечения георадиолокации в данном направлении происходит существенно медленнее [1, 2], чем в других [3], что приводит к недооценке возможностей метода георадиолокации. Причины, приведшие к такому положению дел в георадиолокации, могут быть различные, одной из них является некорректное использование процедуры определения скорости v распространения электромагнитных волн (ЭМВ) по гиперболическим годографам (осям синфазности георадиолокационных сигналов). Данная процедура является наиболее распространенным способом оценки скорости ЭМВ [1], по результатам выполнения которой рассчитывается вещественная часть относительной комплексной диэлектрической проницаемости ϵ' , зависящая от влажности, плотности и криогенного состояния горных пород [4]. В учебных пособиях как отечественных [1, 2], так и зарубежных [5, 6], а также в руководствах по обработке данных производителей георадаров (GSSI, GEOTEX) и стандарте American Society for Testing and Materials (ASTM)¹ обоснование применения определения скорости распространения ЭМВ по гиперболическим годографам приводится для случая, когда вмещающая среда является однородной.

В настоящее время в практике георадиолокационных измерений [3, 7, 8], а также в научных работах, посвященных автоматизации поиска гиперболических годографов в данных георадиолокации [9–11], в том

числе в режиме реального времени [12], объектом исследования является, как правило, неоднородная среда. Вследствие этого скорость распространения ЭМВ, определенная по гиперболе, находящейся в некотором слое, является усредненной (интегральной) характеристикой всех вышележащих слоев, о чем упомянуто в работе одного из классиков георадиолокации [13]. При проведении георадиолокационных исследований в области криолитозоны возможна неверная оценка криогенного состояния горных пород и, соответственно, их физико-механических свойств, в случае наличия слоя незамерзших горных пород, влияние которого на форму гиперболического годографа может быть хотя и значительным, но недостаточным для того, чтобы результат определения v по методу аппроксимации годографа гиперболой [2] оказался в диапазоне значений, характерных для талых пород. Таким образом, в многослойной среде непосредственно по гиперболическому годографу возможно определить истинную скорость v распространения ЭМВ только в первом слое горных пород, и для корректного использования значений v в практике ведения георадиолокационных работ необходимо установить закономерности формирования в слоистых породных массивах годографов ЭМВ, дифрагированных на локальном объекте. Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать модель гиперболического годографа сигналов, получаемых при изучении слоистого породного массива;

- установить зависимость v и ϵ' , определяемых по гиперболическому годографу, от значений v и ϵ' вышележащих слоев;

- определить влияние незамерзшего слоя в массиве мерзлых горных пород на значение v , рассчитываемое по гиперболическому годографу;

- проверить адекватность полученных теоретических результатов на данных компьютерного моделирования.

¹ ASTM D6432-11, Standard guide for using the surface ground penetrating radar method for subsurface investigation, ASTM International, West Conshohocken, PA; 2011. <https://doi.org/10.1520/D6432-11>

Модель гиперболического годографа георадиолокационных сигналов, получаемых при зондировании слоистого породного массива

ЭМВ, излучаемая георадаром, расположенном в точке x , распространяется в слоистом породном массиве по принципу Ферма (серая сплошная линия на рис. 1), но в данной работе рассмотрим модель распространения ЭМВ по лучу (черная пунктирная линия на рис. 1) в массиве, состоящем из n слоев мощностью h_i с заданными значениями ϵ'_i и v_i , при i , находящемся в диапазоне от 1 до n . Локальный объект, обозначенный черным кружком на рис. 1, расположен в последнем слое на глубине h_0 . Расстояние h_n , пройденное лучом от георадара до локального объекта, будет равно:

$$h_n = \sqrt{(x - x_0)^2 + h_0^2}.$$

При перемещении георадара вдоль профиля координата x будет увеличиваться, а h_n соответственно уменьшаться, формируя левую ветвь гиперболы и достигая минимума в точке $x = x_0$, в которой и будет расположена вершина гиперболы. При $x > x_0$ значения h_n будут увеличиваться и соответствовать правой ветви гиперболы. В промежуточном слое под номером i луч проходит расстояние h_{ni} , которое больше мощности слоя h_i во всех точках, кроме x_0 :

$$h_{ni} = \frac{h_i}{\cos \alpha}, \quad i \in 1 \dots (n-1),$$

где

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{x - x_0}{h_n} \right).$$

Так как в последнем слое луч проходит расстояние меньшее, чем h_n , то h_{nn} будет равно:

$$h_{nn} = \frac{h_0 - \sum_{i=1}^{n-1} h_i}{\cos \alpha}.$$

Время распространения луча в слое i :

$$t_{ni} = \frac{h_{ni}}{v_i}.$$

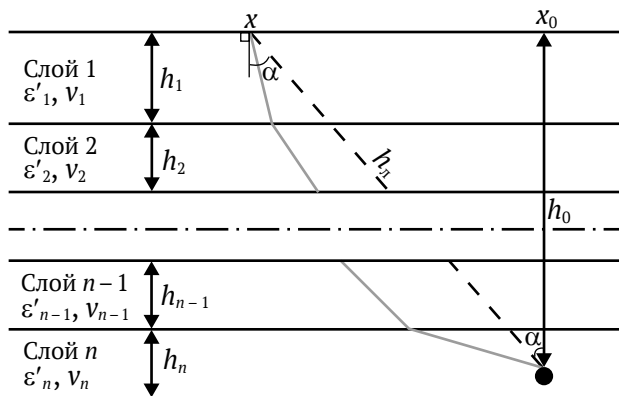


Рис. 1. Схема модели распространения электромагнитной волны в слоистом породном массиве

Общее время t_n распространения луча от георадара до локального объекта составит:

$$t_n = \sum_{i=1}^n t_{ni}.$$

Тогда усредненная лучевая скорость будет равна:

$$v_n = \frac{\sum_{i=1}^n h_{ni}}{t_n}.$$

Уравнение гиперболического годографа в одно-родной среде [2]:

$$t = \frac{2h_n}{v}. \quad (1)$$

Для горизонтально-слоистой среды уравнение (1) примет следующий вид:

$$t = \frac{2 \sum_{i=1}^n h_{ni}}{v_i} = \frac{2 \sum_{i=1}^n h_i}{v_i \cos \alpha} = \frac{2 \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i}}{\cos \left(\arcsin \frac{x - x_0}{h_n} \right)}.$$

Исходя из основного тригонометрического тождества и положительности функции косинуса в области значений арксинуса преобразуем знаменатель дроби:

$$\cos \left(\arcsin \frac{x - x_0}{h_n} \right) = \sqrt{1 - \left(\frac{x - x_0}{h_n} \right)^2} = \frac{\sqrt{h_n^2 - (x - x_0)^2}}{h_n} = \frac{h_0}{h_n}.$$

Тогда уравнение гиперболического годографа георадиолокационных сигналов, отраженных от локального объекта, расположенного в слоистом породном массиве, может быть представлено в виде (2). При подстановке в уравнение (2) параметров для одно-слойной среды оно совпадает с выражением (1):

$$t = \frac{2h_n}{h_0} \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i}. \quad (2)$$

При обработке данных георадиолокации гиперболический годограф, имеющий форму, соответствующую выражению (2), аппроксимируют гиперболой, имеющей вид согласно уравнению (1). Рассчитываемые в результате подобной аппроксимации значения скорости распространения ЭМВ являются не истинными, а кажущимися ($v_{\text{каж}}$), и представляют собой некоторое интегральное значение скоростей ЭМВ во всех вышележащих слоях. Для определения зависимости $v_{\text{каж}}$ от значений v в слоях, перекрывающих локальный объект, приравняем друг к другу уравнения (1) и (2):

$$\frac{2h_n}{v_{\text{каж}}} = \frac{2h_n}{h_0} \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i}.$$

И выразим $v_{\text{каж}}$:

$$v_{\text{каж}} = \frac{h_0}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i}}. \quad (3)$$



И в соответствии с известной зависимостью $v = c/\sqrt{\varepsilon'}$ ($c = 300\,000$ км/с $= 0,3$ м/нс) [2] кажущаяся диэлектрическая проницаемость будет равна:

$$\varepsilon'_{\text{каж}} = \frac{c^2}{h_0^2} \left(\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i} \right)^2. \quad (4)$$

По значению $v_{\text{каж}}$ невозможно оценить скорость распространения ЭМВ в горных породах конкретного слоя и может возникнуть предположение, что v каждого слоя находится в диапазоне $v_{\text{каж}} \pm \Delta v$. Например, если при проведении георадиолокационных измерений массива многолетнемерзлых горных пород, у которых v находится в узком диапазоне 100–150 м/мкс (среднее значение $v_{\text{ср}} \approx 125$ м/мкс) [14], $v_{\text{каж}}$ будет выше 100 м/мкс, то в целом массив можно охарактеризовать как мерзлый. Однако в подобных массивах может находиться слой пород в талом состоянии, который может быть зафиксирован по данным георадиолокации, но существует проблема с его распознаванием [15], в связи с этим возникает проблема определения влияния слоя пород с низким значением $v_{\text{с}}$ на $v_{\text{каж}}$.

Для решения данной проблемы воспользуемся формулой (3) и тем фактом, что v мерзлых горных пород варьируется в узких пределах, а скорость $v_{\text{т}}$ распространения ЭМВ в незамерзших горных породах значительно ниже [2]. Часть массива горных пород, находящуюся в мерзлом состоянии, представим в виде слоев одинаковой толщины $h_{\text{с}}$, в каждом из которых скорость распространения ЭМВ будет равна усредненному значению $v_{\text{с}}$. Разбивать мерзлую часть массива горных пород на слои можно произвольно, так как при одинаковой v их количество и толщина не влияют на время регистрации георадиолокационных сигналов, составляющих гиперболическую ось синфазности. Толщину $h_{\text{т}}$ и скорость $v_{\text{т}}$ в слое талых пород представим пропорциональными $h_{\text{с}}$ и $v_{\text{с}}$:

$$h_{\text{т}} = k_h h_{\text{с}}, \quad v_{\text{т}} = k_v v_{\text{с}}.$$

После подстановки в (3) получим выражение для кажущейся скорости $v_{\text{каж.т}}$ распространения ЭМВ в массиве мерзлых горных пород, содержащем слой пород в талом состоянии:

$$\begin{aligned} v_{\text{каж.т}} &= \frac{h_0}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i}} = \frac{h_{\text{с}}(n-1) + k_h h_{\text{с}}}{\frac{h_{\text{с}}}{v_{\text{с}}}(n-1) + \frac{h_{\text{с}} k_h}{v_{\text{с}} k_v}} = \\ &= \frac{h_{\text{с}}(n-1+k_h)}{\frac{h_{\text{с}}}{v_{\text{с}}} \left(n-1 + \frac{k_h}{k_v} \right)} = \frac{v_{\text{с}}(n-1+k_h)}{\left(n-1 + \frac{k_h}{k_v} \right)}. \end{aligned} \quad (5)$$

При $k_h = 0$ по формуле (5) $v_{\text{каж.т}} = v_{\text{с}}$, т.е. будет соответствовать мерзлоте массиву горных пород. Для того чтобы определить, как изменится $v_{\text{каж}}$ по сравнению с $v_{\text{с}}$ при наличии низкоскоростного слоя талых пород, разделим формулу (3) с параметрами мерзлых пород $h_{\text{с}}$ и $v_{\text{с}}$ для всех слоев, обозначив ее $v_{\text{каж.м}}$, на выражение (5):

$$\frac{v_{\text{каж.м}}}{v_{\text{каж.т}}} = \frac{h_0}{n \frac{h_{\text{с}}}{v_{\text{с}}}} \frac{\left(n-1 + \frac{k_h}{k_v} \right)}{v(n-1+k_h)} = \frac{n-1 + \frac{k_h}{k_v}}{n-1+k_h}. \quad (6)$$

Проверка полученных теоретических выражений на данных компьютерного моделирования

Моделирование данных георадиолокации проведено в системе gprMax [16], которая положительно зарекомендовала себя в исследованиях, посвященных определению и анализу гиперболических осей синфазности георадиолокационных сигналов [17–19]. При моделировании использовались следующие параметры: зондирующий сигнал – импульс Рикера с центральной частотой Фурье-спектра 400 МГц, временная развертка – 150, база антенны – 0 мм. Данные для моделирования представлены в таблице.

Текст входного файла для gprMax для модели №1:

```
#domain: 4 9.1 0.002
#dx dy dz: 0.002 0.002 0.002
#time_window: 150e-9
#material: 6 0 1 0 sloi1
#material: 4 0 1 0 sloi2
#waveform: ricker 10 0.4e9 my_ricker
#hertzian_dipole: z 0.1 9 0 my_ricker
#rx: 0.1 9 0
#src_steps: 0.01 0 0
#rx_steps: 0.01 0 0
#box: 0 0 0 4 9 0.002 sloi1
#box: 0 0 0 4 7 0.002 sloi2
#cylinder: 2 5 0 2 5 0.002 0.01 pec
```

Результат моделирования (out-файл) экспортирован в формат программы GeoScan32 (производитель НПЦ ГЕОТЕХ), в которой затем установлены начало отсчета шкалы глубин и параметр База антенны, равный 1. На рис. 2, а представлены результаты моделирования (Модель №1), значения $\varepsilon'_{\text{каж}}$, рассчитанной с помощью процедуры «Гипербола», и $v_{\text{каж}}$. Время регистрации сигналов, отраженных от нижней границы 1 слоя t_1 и от локального объекта – вершины гиперболы $t_{\text{т}}$, в соответствии с формулой (1) равно:

$$t_1 = 32,7 \text{ нс}, \quad t_{\text{т}} = t_1 + 26,7 = 59,4 \text{ нс}.$$

Таблица

Параметры моделей массива горных пород

№ модели	Количество слоев	Мощность слоев, м	ε'	v , м/мкс	h_0 , м
1	2	2; 7	6; 4	122,5; 150	4
2	3	2; 2; 4	8; 6; 4	100; 122,5; 150	6
3	5	1; 1; 1; 0,5; 2	6; 4; 6; 20; 4	122,5; 150; 122,5; 67; 150	4,5



По формулам (3) и (4) $v_{\text{каж}}$ и $\varepsilon'_{\text{каж}}$ будут равны:

$$v_{\text{каж}} = 0,1349 \text{ м/нс} = 134,9 \text{ м/мкс};$$

$$\varepsilon'_{\text{каж}} = 4,9484.$$

Проверка полученных значений:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon'}} = 0,1349 \text{ м/нс}.$$

Таким образом, относительная погрешность значений $v_{\text{каж}}$ и $\varepsilon'_{\text{каж}}$ рассчитанных в программе GeoScan32, составила 0,07 и 0,37% соответственно. Для модели №2 в результате вычислений по формулам (3) и (4) получены значения $v_{\text{каж}} = 123,7 \text{ м/мкс}$, $\varepsilon'_{\text{каж}} = 5,8853$.

Для проверки формулы (6) сначала проведем вычисления $v_{\text{каж.м}}$ для модели массива мерзлых горных пород мощностью $h_0 = 5 \text{ м}$, состоящей из $n = 5$ слоев с $h = 1 \text{ м}$, $v = 122,5, 150, 122,5, 134,2, 150 \text{ м/мкс}$ и $\varepsilon' = 6; 4; 6; 5; 4$. Согласно выражению (3) $v_{\text{каж.м}} = 134,7 \text{ м/мкс}$.

Далее вместо четвертого слоя введем низкоскоростной слой (модель №3 в таблице) с такими параметрами h_t, v_t , чтобы значение $v_{\text{каж.т}}$ находилось в диапазоне, характерном для мерзлых горных пород. Установим мощность незамерзшего слоя $h_t = 0,5 \text{ м}$ (при этом h_0 уменьшится до $4,5 \text{ м}$) как половину ($k_h = 0,5$) мощности усредненного слоя $h_c = 1 \text{ м}$, а скорость распространения ЭМВ в нем в два раза меньше ($k_v = 0,5$), чем среднее значение $\varepsilon'_c = 5$, $v_c = 134,2 \text{ м/мкс}$, т.е. $v_t = 67,1 \text{ м/мкс}$, $\varepsilon'_t = (c/v_t)^2 = 20$. Остальные параметры моделируемого массива горных пород представлены в таблице. По формуле (3) $v_{\text{каж.т}} = 121,2 \text{ м/мкс}$, что подтверждается результатом вычисления $v_{\text{каж}}$ по данным компьютерного моделирования (рис. 2, в), относительная погрешность которого, по сравнению с точным значением, составила менее 0,5%.

Теперь можно рассчитать, как изменилась кажущаяся скорость распространения ЭМВ в модели массива горных пород с введением в нее низкоскоростного слоя:

$$\frac{v_{\text{каж.м}}}{v_{\text{каж.т}}} = 1,1114.$$

То есть при наличии низкоскоростного слоя с указанными выше параметрами $v_{\text{каж}}$ уменьшается на $\approx 10\%$. Для получения данного результата пришлось провести весь комплекс расчетов по вычислению $v_{\text{каж}}$ как для полностью мерзлого массива горных пород, так и для случая со слоем незамерзших пород. Подобные расчеты можно существенно упростить, если использовать формулу (6), позволяющую с точностью до тысячных получить тот же результат:

$$\frac{v_{\text{каж.м}}}{v_{\text{каж.т}}} = \frac{n-1 + \frac{k_h}{k_v}}{n-1 + k_h} = 1,1111.$$

Для подтверждения того, что формула (6) верна при разбиении мерзлой части массива горных пород на произвольное количество слоев, проведены расчеты для модели с 3 и 9 слоями. При этом будет изменяться только один параметр – k_h , так, при $n = 3$ ($h = 2, 0,5, 2 \text{ м}$) $k_h = 0,25$, при $n = 9$ (мощность всех слоев – $0,5 \text{ м}$) $k_h = 1$:

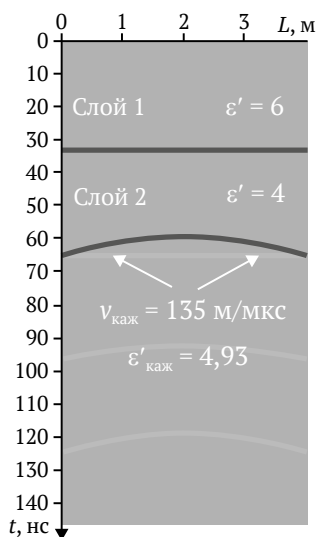
$$n = 3 \rightarrow \frac{v_{\text{каж.м}}}{v_{\text{каж.т}}} = 1,1111;$$

$$n = 9 \rightarrow \frac{v_{\text{каж.м}}}{v_{\text{каж.т}}} = 1,1111.$$

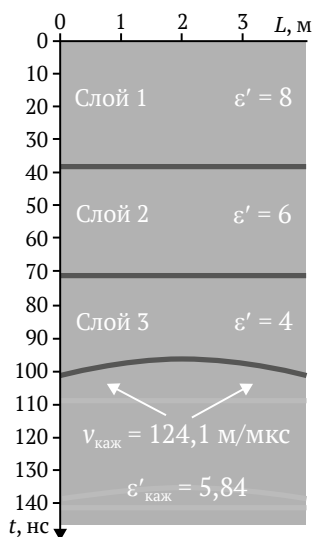
В общем случае, чтобы определить, будет ли $v_{\text{каж.т}}$ находиться в диапазоне значений, характерных для мерзлых пород, например, Центральной Якутии, при произвольных k_h, k_v в формулу (5) подставим усредненные значения, характерные для этого района, $v_c = 125 \text{ м/мкс}$ и $v_{\text{каж.т}} = 100 \text{ м/мкс}$ [14], тогда при весьма значительной разнице между $v_{\text{каж.м}}$ и $v_{\text{каж.т}}$:

$$\frac{v_{\text{каж.м}}}{v_{\text{каж.т}}} = 1,25$$

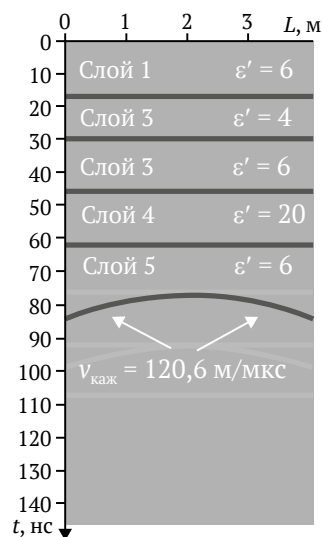
получим из (5):



а



б



в

Рис. 2. Синтетические радарограммы моделей 1 (а), 2 (б) и 3 (в)



$$100 = \frac{125(n-1+k_h)}{n-1+\frac{k_h}{k_v}},$$

откуда

$$\frac{n-1+k_h}{n-1+\frac{k_h}{k_v}} = 0,8. \quad (7)$$

При увеличении $v_{\text{каж.т}}$ или уменьшении $v_{\text{каж.м}}$ выражение (7) будет больше 0,8, а соотношение $v_{\text{каж.м}}/v_{\text{каж.т}}$ будет уменьшаться, что приведет к затруднениям при интерпретации данных георадиолокационных измерений по определению наличия слоя незамерзших горных пород на основе анализа гиперболического годографа георадиолокационных сигналов. Оценка возможности выявления слоя незамерзших горных пород, в зависимости от величин параметров k_h , k_v по формуле (7), сделана для района Центральной Якутии, для других районов ее необходимо пересчитать с соответствующими значениями скоростей распространения ЭМВ в мерзлых и талых горных породах.

Выводы

В результате проведенного исследования разработана модель гиперболического годографа георадиолокационных сигналов, отраженных от локального объекта, расположенного в массиве горных пород,

с произвольным количеством слоев. На основе разработанной модели получены выражения для кажущихся значений скорости распространения электромагнитных волн и вещественной части относительной комплексной диэлектрической проницаемости рассчитываемых по гиперболическому годографу георадиолокационных сигналов. Полученные выражения позволили установить, как снизится скорость распространения электромагнитных волн в массиве горных пород, содержащем слой незамерзших горных пород, по сравнению с полностью мерзлым массивом. Результаты теоретических исследований подтверждены сравнением с результатами анализа данных компьютерного моделирования георадиолокационных измерений в системе gprMax (относительная погрешность составила менее 0,5 %).

Полученные в ходе исследования результаты имеют большое значение для развития методического обеспечения георадиолокации по определению электрофизических свойств горных пород, что повысит достоверность оценки их физико-механических свойств, особенно в области распространения вечной мерзлоты. Практическое применение полученных результатов в исследованиях, направленных на автоматизированное определение электрофизических свойств горных пород и грунтов по гиперболическим годографам, позволит сформировать базу данных с актуальной информацией о диэлектрической проницаемости горных пород.

Список литературы / References

1. Старовойтов А.В. *Интерпретация георадиолокационных данных*. М.: Изд-во МГУ; 2008. 192 с. Starovoitov A.V. *Interpretation of georadar data*. Moscow: MSU Publ. House; 2008. 192 p. (In Russ.)
2. Владов М.Л., Судакowa М.С. Георадиолокация. *От физических основ до перспективных направлений*. М.: Изд-во ГЕОС; 2017. 240 с. Vladov M.L., Sudakova M.S. *Georadar. From physical fundamentals to upcoming trends*. Moscow: GEOS Publ. House; 2017. 240 p. (In Russ.)
3. Lombardi F., Podd F., Solla M. From its core to the niche: insights from GPR applications. *Remote Sens.* 2022;14(13):3033. <https://doi.org/10.3390/rs14133033>
4. Фролов А.Д. *Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов*. Пушчино: ОНТИ ПНЦ РАН; 1998. 515 с. Frolov A.D. *Electrical and elastic properties of frozen rocks and ice*. Pushchino: ONTI PNTs RAS Publ.; 1998. 515 p. (In Russ.)
5. Persico R. *Introduction to ground penetrating radar: inverse scattering and data processing*. New Jersey: Wiley-IEEE Press; 2014. 392 с. <https://doi.org/10.1002/9781118835647.ch2>
6. Jol H.M. *Ground penetrating radar: theory and application*. Elsevier; 2008. 544 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53348-7.X0001-4>
7. Дьяков А.Ю., Калашник А.И. *Методические основы георадарных исследований горнотехнических объектов*. Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН; 2021. 110 с. <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.443.3> Dyakov A.Yu., Kalashnik A.I. *Methodological fundamentals of GPR studies of mining features*. Apatity: FITs KSC RAS Publ.; 2021. 110 p. (In Russ.) <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.443.3>
8. Solla M., Perez-Gracia V., Fontul S. A review of GPR application on transport infrastructures: troubleshooting and best practices. *Remote Sens.* 2021;13(4):672. <https://doi.org/10.3390/rs13040672>
9. Wunderlich T., Wilken D., Majchczack B.S. et al. Hyperbola detection with retinanet and comparison of hyperbola fitting methods in GPR data from an archaeological site. *Remote Sensing.* 2022;14:3665. <https://doi.org/10.3390/rs14153665>
10. Mertens L., Persico R., Matera L., Lambot S. Automated detection of reflection hyperbolas in complex gpr images with no a priori knowledge on the medium. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 2016;1:580–596. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2462727>



11. Lei W., Hou F., Xi J. et al. Automatic hyperbola detection and fitting in GPR B-scan image. *Automation in Construction*. 2019;106:102839. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102839>
12. Dou Q., Wei L., Magee R., Cohn A.G. Real-time hyperbola recognition and fitting in GPR data. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2017;55(1):51–62. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2592679>
13. Daniels J.J. Fundamentals of ground penetrating radar. In: *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. 1989;1:62–142. <https://doi.org/10.4133/1.2921864>
14. Омеляненко А.В., Федорова Л.Л. Георадиолокационные исследования многолетнемерзлых пород. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН; 2006. 136 с.
Omelyanenko A.V., Fedorova L.L. Georadar studies of permafrost. Yakutsk: YaSC SB RAS Publ.; 2006. 136 p. (In Russ.)
15. Якупов В.С. Геофизика криолитозоны. Якутск: Изд-во Якутского госуниверситета; 2008. 342 с.
Yakupov V.S. *Geophysics of permafrost zone*. Yakutsk: Yakutsk State University Publ.; 2008. 342 p. (In Russ.)
16. Warren C., Giannopoulos A., Giannakis I. gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar. *Computer Physics Communications*. 2016;209:163–170. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2016.08.020>
17. Wunderlich T., Wilken D., Majchczack B.S., et al. Hyperbola detection with RetinaNet and comparison of hyperbola fitting methods in GPR data from an archaeological site. *Remote Sensing*. 2022;14:3665. <https://doi.org/10.3390/rs14153665>
18. Dewantara D., Parnadi W.W. Automatic hyperbola detection and apex extraction using convolutional neural network on GPR data. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022;1:012027. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2243/1/012027>
19. Wang H., Ouyang S., Liao K.-F., Jin L.-N. GPR B-SCAN image hyperbola detection method based on deep learning. *Acta Electronica Sinica*. 2021;49(5):953–963. <https://doi.org/10.12263/DZXB.20200635>

Информация об авторе

Кирилл Олегович Соколов – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории георадиолокации, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-4179-9619](https://orcid.org/0000-0002-4179-9619), Scopus ID [56457950500](https://scopus.org/56457950500), ResearcherID [P-8843-2016](https://orcid.org/P-8843-2016); e-mail k.sokolov@ro.ru

Information about the author

Kirill O. Sokolov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, N.V. Chersky Mining Institute of the North of the Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, Russian Federation; ORCID [0000-0002-4179-9619](https://orcid.org/0000-0002-4179-9619), Scopus ID [56457950500](https://scopus.org/56457950500), ResearcherID [P-8843-2016](https://orcid.org/P-8843-2016); e-mail k.sokolov@ro.ru

Поступила в редакцию 11.05.2023
Поступила после рецензирования 08.03.2024
Принята к публикации 22.05.2024

Received 11.05.2023
Revised 08.03.2024
Accepted 04.05.2024



СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-12-192>

УДК 622.02

**Оценка рейтинговых показателей состояния горного массива глубоких горизонтов подземного рудника Удачный**Е. В. Серебряков¹  , И. А. Зайцев², А. А. Потака²¹ Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация² Удачинский горно-обогатительный комбинат, ПАО «АК «АЛРОСА», г. Мирный, Российская Федерация serebryakov.e.v@mail.ru**Аннотация**

Геомеханические рейтинговые классификации массивов являются важным инструментом при проектировании подземных технологий отработки месторождений. Особенно актуальны они на ранних стадиях разработки проекта, когда первичная горно-геологическая информация доступна в ограниченном объеме. В представляемой работе показан подход к сбору исходной информации и расчету рейтинга RMR и индекса Q для массива горных пород глубоких горизонтов подземного рудника Удачный, отрабатывающего одноименную кимберлитовую трубку. Поскольку классификации являются многокомпонентными системами, они предъявляют высокие требования по объему и качеству первичной информации, выполнение которых возможно путем применения комплексной системы сбора данных. Основной их объем получен посредством акустического телевидеокаротажа, совмещенного с геолого-структурной документацией неориентированного керна. Также использованы данные о физико-механических свойствах пород, напряженно-деформированном состоянии и гидрогеологических условиях. Расчет рейтингов произведен поинтервально вдоль стволов скважин, в которых производился акустический каротаж. В качестве одного из критериев для выделения геомеханических интервалов предложен параметр амплитуды акустической волны, зависящий от физических свойств породного массива и степени его структурной нарушенности. Установлен средний уровень связи между Q и RMR, что обусловлено разной «чувствительностью» и структурой входных параметров. С помощью рассчитанных рейтингов массив рудных тел и вмещающих отложений оценен по степени устойчивости (присвоены классы/категории), а также определены оптимальные способ и параметры крепления выработок. Накопленная в процессе проведения исследований база геомеханических данных обеспечивает возможность расчета альтернативных рейтингов, таких как MRMR, RMi, GSI и др., без использования переходных уравнений.

Ключевые слова

рейтинговая классификация, RMR, Q, кимберлитовая трубка Удачная, телевидеокаротаж, трещиноватость, устойчивость массива, крепление

Для цитирования

Serebryakov E. V., Zaytsev I. A., Potaka A. A. Assessment of rating parameters of the rock mass conditions at Udachny underground mine deep levels. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):206–220. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-12-192>

MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research paper

Assessment of rating parameters of the rock mass conditions at Udachny underground mine deep levelsE. V. Serebryakov¹  , I. A. Zaytsev², A. A. Potaka²¹ Institute of Earth Crust SB RAS, Irkutsk, Russian Federation² Udachny Mining and Processing Complex, PJSC AK ALROSA, Mirny, Russian Federation serebryakov.e.v@mail.ru**Abstract**

Geotechnical rating classification systems of rock masses are an important tool in the design of underground mining systems. They are especially relevant at the early stages of project development, when primary mining and geological information is available to a limited extent. The presented work shows an approach to the collection of initial information and calculation of RMR (Rock Mass Rating) and Q Index for the rock mass



of deep levels of the Udachny underground mine exploiting the kimberlite pipe of the same name. Since the classifications are multi-component systems, they impose heavy demands on the scope and quality of primary data, which can be met by applying an integrated data collection system. The bulk of these were obtained by acoustic televiewer tool (ATV) combined with geologic and structural logging of non-oriented core. Data on physical and mechanical properties of rocks, stress-strain state, and hydrogeological conditions were also used. The ratings were calculated interval by interval along holes, in which acoustic logging was performed. The acoustic wave amplitude parameter, which depends on the physical properties of a rock mass and the degree of its structural disturbance, was proposed as one of the criteria for distinguishing geotechnical intervals. The moderate level of correspondence between Q and RMR systems was established to be due to the different “sensitivity” and structure of the input parameters. Using the calculated ratings, the rock masses of ore bodies and host sediments were evaluated for stability (classes/categories have been assigned), and the optimal method and parameters of workings support were determined. The geotechnical database accumulated during the research process provides the feasibility of calculating alternative ratings such as MRMR, Rmi, GSI, etc., without the use of transient equations.

Keywords

rating classification, RMR, Q, Udachnaya kimberlite pipe, televiewer, jointing, rock mass stability, supports

For citation

Serebryakov E.V., Zaytsev I.A., Potaka A.A. Assessment of rating parameters of the rock mass conditions at Udachny underground mine deep levels. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3)206–220. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-12-192>

Введение

Рейтинговые классификации в их нынешнем виде сформированы как результат аккумуляции огромного практического опыта специалистов, накопленного в ходе всестороннего изучения горных массивов в самых разнообразных горно-геологических условиях. Несмотря на повсеместное внедрение методов численного моделирования, разработанные еще в 1970-е годы, рейтинговые классификации не теряют своей актуальности и в настоящее время, используя как средство краткосрочного прогноза поведения массива. В мировой практике горного дела наиболее широко применяются следующие геомеханические классификации: рейтинг массивов горных пород RMR (Rock MASS Rating) [1, 2], индекс качества горного массива при подземной разработке Q [3, 4], горный рейтинг MRMR (mining rock mass rating) [5, 6], индекс геологической прочности GSI (geological strength index) [7, 8]. В своей структуре классификации в той или иной мере учитывают все характеристики массива, которые потенциально могут снизить его прочность по сравнению с исходной прочностью ненарушенной горной породы. Эти характеристики включают: физико-механические свойства пород, степень нарушения массива структурными дефектами (разломы, трещины, элементы слоистости), фрикционные свойства структурных дефектов, а также степень обводненности и напряженно-деформированное состояние массива.

Являясь многокомпонентными, рейтинговые классификации предъявляют высокие требования по объему и качеству первичной информации, выполнение которых возможно путем применения комплексной системы сбора данных. Для ранних стадий проектирования высокий уровень качества и оперативность в их сборе обеспечивает комплекс, включающий телевизорный каротаж, совмещенный с результатами документации неориентированного керна [9, 10]. Подобный комплекс применен при сборе первичной

информации для расчета рейтинговых показателей RMR и Q для глубоких горизонтов подземного рудника Удачный. Основные результаты проведенных исследований отражены в представляемой работе.

Объект исследования

Кимберлитовая трубка Удачная – одно из наиболее крупных месторождений алмазов, которое в настоящее время отрабатывается подземным способом. Месторождение представлено двумя столбообразными рудными телами – Удачная-Западная (ЗРТ) и Удачная-Восточная (ВРТ), сложенными типичным для трубок Якутской алмазоносной провинции комплексом образований: порфировый кимберлит ранних генераций и автолитовая кимберлитовая брекчия заключительных стадий магматизма [11]. В качестве ксенолитов выступают породы осадочного комплекса, вмещающего трубку, а также галогенные отложения. Ксенолиты осадочных пород распространены преимущественно в пределах ЗРТ, где формируют так называемые плавающие рифы [12]. Мощные залежи солей в пределах кимберлитовой трубки являются уникальной особенностью строения западного рудного тела. Возможным процессом, ответственным за присутствие солей в трубке, является изменение кимберлитов месторождения внешними солеными грунтовыми водами [13]. Вмещают трубку карбонатные и карбонатно-глинистые породы (известняки, доломиты, мергели) раннего-позднего кембрия.

Открытая разработка месторождения осуществлялась до 2014 г., глубина карьера составила 640 м, отметка подошвы –320 абс. м. Вскрытие и отработка запасов первой очереди ниже дна карьера до отметки –580 абс. м производится в настоящее время подземным способом системой этажного/подэтажного принудительного обрушения. Подготовка запасов второй очереди в границе между горизонтами –580 и –1080 м осуществляется путем бурения глубоких скважин из подземных горных выработок.

Методика сбора и анализа данных

Порядок определения рейтинговых показателей массива достаточно прост и сводится к присвоению определенного балла (из существующих табличных форм) для того или иного типа исходных данных и проведению требуемых математических операций с этими значениями для получения искомых величин итогового рейтинга. Система классификации RMR разработана в 1973 г. 3. Бенявски [1] и за годы существования претерпела несколько модификаций, последняя из которых введена в 2014 г. [14]. Рейтинг RMR рассчитывается по следующей формуле:

$$RMR = J_{A1} + J_{A2} + J_{A3} + J_{A4} + J_{A5} + J_B, \quad (1)$$

где J_{A1} – рейтинг прочности породного массива; J_{A2} – рейтинг качества породного массива; J_{A3} – рейтинг расстояния между трещинами в массиве; J_{A4} – рейтинг характеристик трещин; J_{A5} – рейтинг обводненности массива; J_B – рейтинг ориентировки трещин к оси выработки.

Рейтинг, характеризующий трещиноватость массива J_{A4} , определяется следующим выражением:

$$J_{A4} = J_{A4/1} + J_{A4/2} + J_{A4/3} + J_{A4/4} + J_{A4/5}, \quad (2)$$

где $J_{A4/1}$ – рейтинг шероховатости трещин; $J_{A4/2}$ – рейтинг длины трещин; $J_{A4/3}$ – рейтинг раскрытия трещин; $J_{A4/4}$ – рейтинг минерального заполнителя трещин; $J_{A4/5}$ – рейтинг выветрелости стенок трещин.

Индекс качества горного массива при подземной разработке Q был предложен Н. Бартоном, Р. Лиеном и Дж. Люндоном в 1974 г. [3]. Значение показателя Q варьирует от 0,001 до 1000 по логарифмической шкале и определяется по формуле:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}, \quad (3)$$

где RQD – качество породного массива; J_n – количество систем трещин; J_r – шероховатость трещин; J_a – степень измененности стенок трещин и минеральный заполнитель (сцепление трещин); J_w – обводненность массива; SRF – фактор снижения напряжения.

Простота расчетной части в определении рейтинговых показателей подразумевает высокие требования к качеству и полноте исходных данных. В настоящей работе сбор первичной геолого-структурной информации осуществлялся посредством бурения 73 вертикальных и слабонаклонных скважин в пределах рудных тел с выходом во вмещающие отложения (рис. 1). Скважины пробурены с горизонта –465 абс. м. Бурение произведено с полным отбором неориентированного керна.

Прочностные свойства массива кимберлитов и вмещающих отложений определялись исходя из результатов лабораторных исследований образцов из керна скважин. Образцы отбирались из кимберлита, вмещающих отложений (доломит, известняк) и ксенолитов вмещающих отложений. Испытания проводились в лаборатории геомеханики института Якутнипроалмаз по методикам, изложенным в ГОСТ (ГОСТ 21153.2–84 Породы горные).

Структурная нарушенность массива устанавливалась посредством проведения телевьюверного (акустического) каротажа геомеханических скважин. Полевые геофизические работы выполнены специалистами Ботубинской геологоразведочной экспедиции с применением зонда QL-40ABI совместного производства компаний Advanced Logic Technology и Mount Sopris Instruments.

Принцип работы акустического телевьювера заключается в непрерывном ультразвуковом сканировании стенки скважины по всей ее глубине [15, 16]. Акустическая волна, сгенерированная излучателем, проходит путь от прибора до контакта с горной породой, отраженный эхо-сигнал возвращается и, проходя через акустическое окно, улавливается акустическим датчиком (рис. 2).

Прибор в процессе сканирования фиксирует амплитуду акустической волны и время, за которое испущенный сигнал проходит от акустического окна до стенки скважины и обратно, и записывает эти данные в виде журналов вдоль ствола скважины (см. рис. 2).

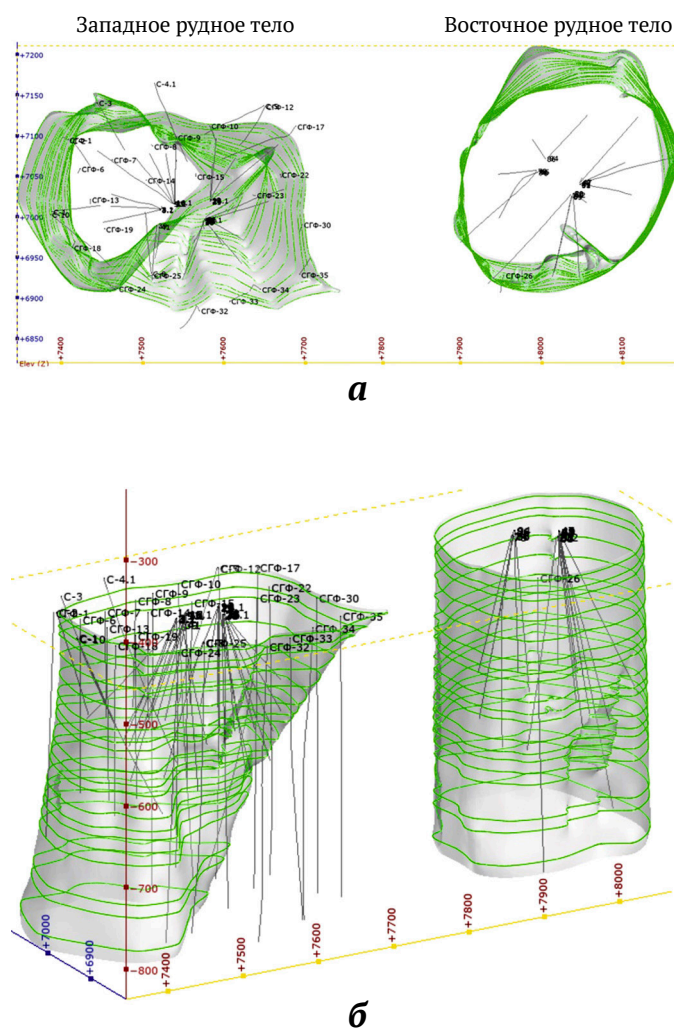


Рис. 1. Положение скважин, по которым выполнен телевьюверный каротаж: а – вид сверху; б – вид с юго-запада. Интервал глубин: –465 ... –850 абс. м

Плоские структуры (трещины, прожилки, слои и т.д.) в результате развертки цилиндра скважины в процессе обработки журналов преобразуются в синусоиды (рис. 2, 3), амплитуда которых указывает на угол падения структуры. Чем больше амплитуда, тем круче угол падения. За счет встроенного модуля высокоточного позиционирования, включающего трехкоординатный феррозондовый магнитометр и акселерометр, получают ориентированное по сторонам света изображение, что позволяет в автоматическом режиме определять истинные элементы залегания трещинных структур.

Интерпретация результатов телевьюверных исследований осуществлялась авторами статьи в программном комплексе WellCAD¹. Помимо собственно журналов каротажа в обработку вовлекались также результаты структурной и фотодокументации керна. С использованием последней в модуле Core Image Cropper формировался единый журнал фотографий, спозиционированных вдоль ствола скважины и имеющих привязку по глубине. Это позволяло в дальнейшем сопоставлять результаты каротажа с данными бурения и отбраковывать некорректно зафиксированные трещины. Непосредственное выделение и характеристика трещин осуществлялись в модуле ISI (Image & Structure Interpretation). Определялись четыре основных типа структур и первый из них – открытая трещина. Для нее характерны низкая амплитуда вол-

ны и повышенное время, за которое волна проходит путь от прибора до стенки скважины и обратно, по сравнению с ненарушенным фрагментом [17]. При этом на графике акустического каверномера участку открытой трещины будет соответствовать крупная аномалия (рис. 3, а).

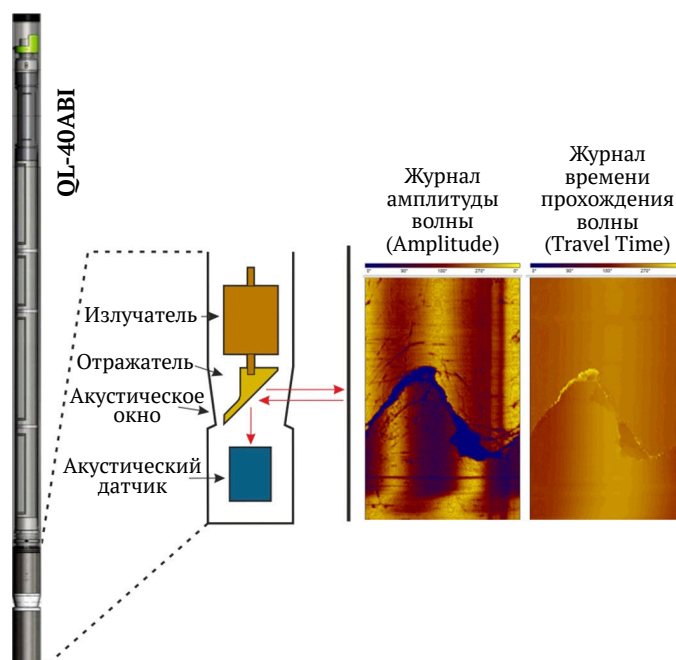


Рис. 2. Принципиальная схема акустического телевьюера

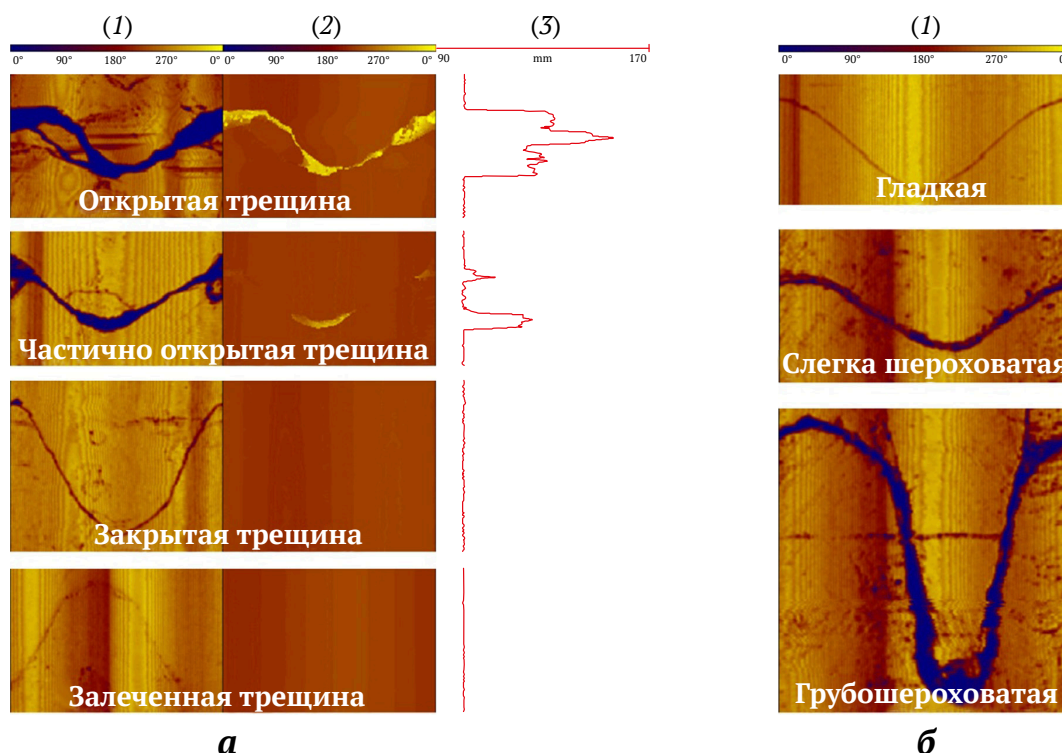


Рис. 3. Классификация трещин по типу (а) и шероховатости стенок (б):

1 – отображение стенки скважины, выраженное в амплитуде акустической волны (желтый цвет – высокие значения, синий – низкие); 2 – отображение стенки скважины, выраженное во времени прохождения волны (желтый цвет – высокие значения, синий – низкие); 3 – журнал акустического каверномера

Второй тип структур – частично открытая трещина. Визуально в поле амплитуды она аналогична полнотью открытой, однако во временном поле не имеет единой ярко выраженной аномалии. Для третьего типа структур – закрытых трещин – характерно отсутствие каких-либо аномалий в журнале времени прохождения волны и журнале каверномера. При этом такие трещины отображаются в виде тонких линий пониженных значений амплитуды. Заполнитель трещин также влияет на их визуализацию в каротажных журналах. Так, структуры, заполненные твердыми минералами, за счет разницы импедансов зачастую имеют повышенные значения амплитуды, но в то же самое время не выделяются на временных журналах. Глинистый или гипсовый заполнитель выражается в виде низкоамплитудных аномалий. В случае его частичного вымывания из трещин в процессе бурения время прохождения волны будет увеличено, что будет отражено появлением аномалий в соответствующем журнале.

Фрикционные свойства трещинных структур и в первую очередь шероховатость стенок могут быть определены по амплитудным изображениям [18, 19]. При этом наиболее точно и надежно их можно установить для гладких, слегка шероховатых и грубо шероховатых трещин [17, 20] (рис. 3, б). С целью заверки фрикционных свойств трещин и их более тонкой градации использовалась структурная документация

керн [21]. Помимо шероховатости с ее помощью определены тип и мощность минерального заполнителя, достоверно установить которые посредством каротажа скважин достаточно сложно.

Численная оценка степени нарушенности массива трещинами осуществлялась путем определения параметра RQD и количества трещин на погонный метр исследуемой скважины. Для этого в программе WellCAD имеются соответствующие модули, которые для расчета используют данные о трещинах (глубина, элементы залегания), выделенных в процессе интерпретации каротажных журналов (рис. 4).

Результаты

Породный массив исследуемого месторождения состоит из трех литологических доменов первого порядка – вмещающих терригенно-карбонатных отложений, а также собственно кимберлитовых тел диаметром. В пределах выделенных крупных единиц оценка рейтинговых показателей по скважинным данным производилась для отдельных геомеханических интервалов, представляющих собой участки массива, имеющие выдержанную литологию, физико-механические свойства и структурное строение. Как правило, при геомеханическом документировании керна литология и структурное строение определяются уверенно, однако с выделением интервалов схожих

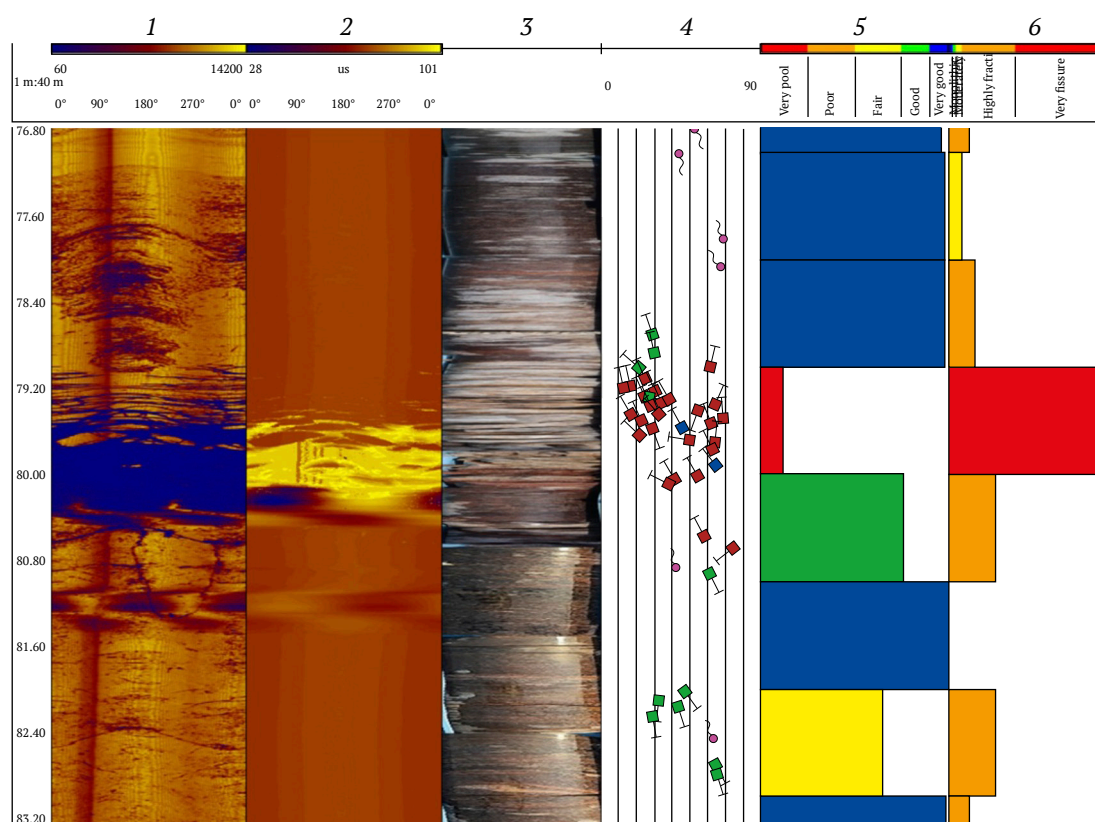


Рис. 4. Расчет количественных показателей структурной нарушенности массива:

- 1 – отображение стенки скважины, выраженное в амплитуде акустической волны (желтый цвет – высокие значения, синий – низкие); 2 – отображение стенки скважины, выраженное во времени прохождения волны (желтый цвет – высокие значения, синий – низкие); 3 – фото керна; 4 – «головастиковая» диаграмма трещиноватости; 5 – частота трещин на погонный метр; 6 – RQD. Вертикальный масштаб 1 : 40

физико-механических свойств пород зачастую возникает проблема, поскольку даже в границах одной литологии может наблюдаться широкая вариация прочностных свойств. Для решения проблемы в рамках данного исследования использовано свойство горных пород отражать акустические волны. Степень такого отражения напрямую зависит от физических свойств и состояния поверхности скважины. Гладкая стенка, сформированная в плотных породах, отражает больше энергии и, соответственно, имеет более высокую амплитуду, чем шероховатая. Отражающая способность стенок, сформированных в твердых и/или монолитных породах, выше, чем пройденных в мягких или интенсивно трещиноватых. Породы, имеющие в своем составе большую долю глинистой компоненты, за счет поглощения энергии характеризуются наименьшими амплитудами. То же касается и трещин, и в особенности зияющих трещин либо имеющих мягкий заполнитель. В журналах амплитуды они показаны синими оттенками в соответствии с принятой цветовой гаммой (см. рис. 3). Пример выделения интервалов по амплитуде акустической волны показан на рис. 5.

На рис. 5, а наблюдается достаточно четкая зависимость амплитуды волны (столбцы 1 и 3) от степени нарушенности массива трещинами, выраженной через количество трещин на погонный метр скважины

(столбец 4). Наиболее структурно нарушенные участки, имеющие высокие значения показателя частоты трещин (интервалы 4 и 6), характеризуются низкими значениями амплитуды. На рис. 5, б, напротив, представлен относительно монолитный, практически не нарушенный трещинами фрагмент. В интервале 140–154 м по амплитуде акустической волны (столбцы 1 и 3) отчетливо выделяется участок с существенно более высокими значениями, который соответствует ксенолиту осадочных пород в основной массе кимберлитовой брекчии, зафиксированному по результатам геологической документации керна скважины (столбец 2). На отметках 125 и 150 м из кимберлита и ксенолита отобраны образцы, показавшие значения прочности на одноосное сжатие (UCS) 8,95 и 30,51 МПа соответственно, что указывает на наличие связи между прочностными свойствами пород и амплитудой акустической волны, которая показана в ряде работ [22, 23].

Всего по 73 скважинам выделено 4636 геомеханических интервалов. Длина интервала колеблется от одного метра для участков со сложным строением до шести метров – с относительно простым. Результаты оценки каждого входного параметра отдельно по выделенным литологическим доменам представлены в виде гистограмм на рис. 6 и 7.

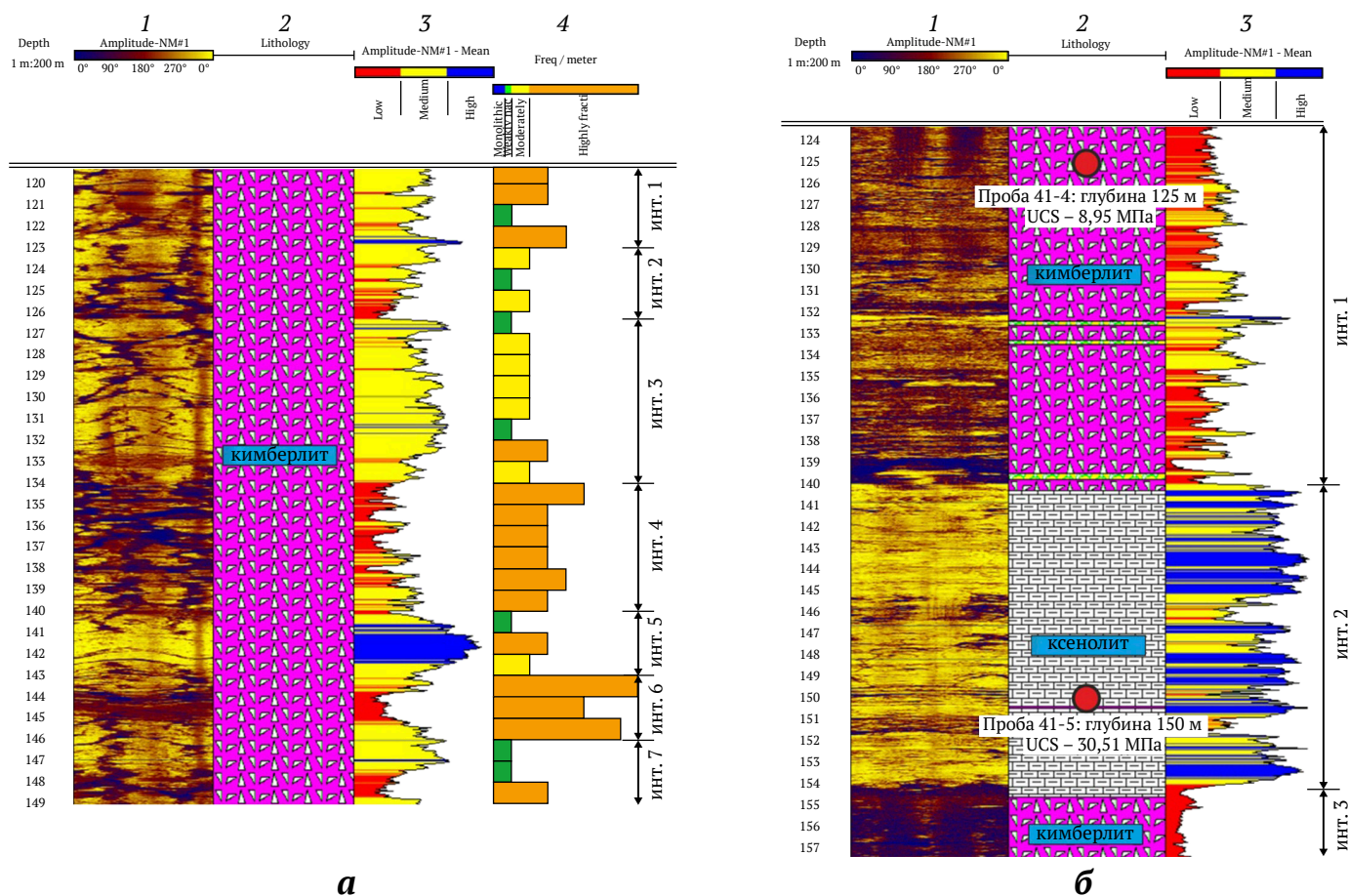
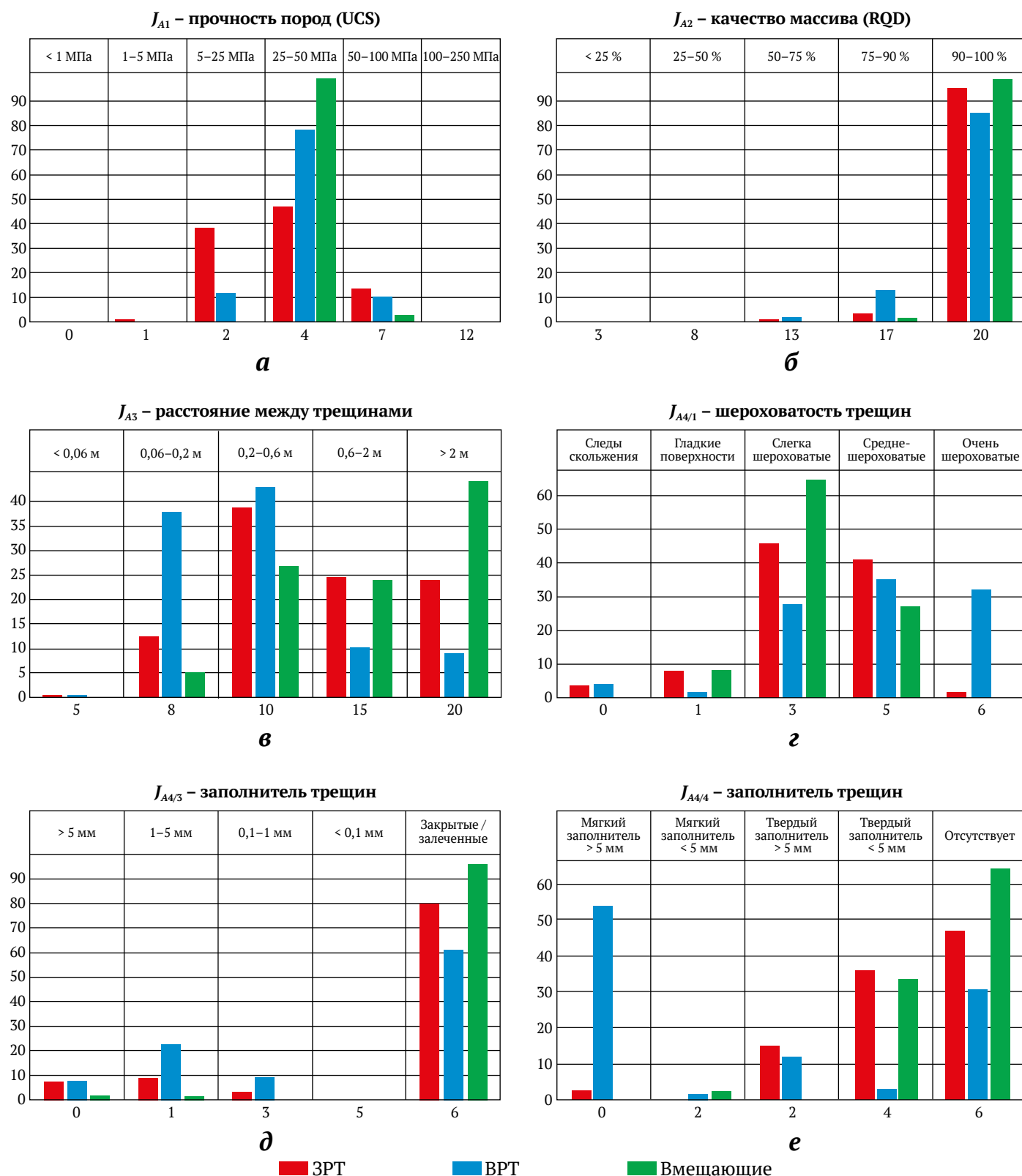


Рис. 5. Пример выделения геомеханических интервалов по амплитуде акустической волны:

1 – отображение стенки скважины, выраженное в амплитуде акустической волны (желтый цвет – высокие значения, синий – низкие); 2 – колонка литологии; 3 – средняя амплитуда акустической волны, рассчитанная на один оборот излучателя; 4 – частота трещин на погонный метр. Вертикальный масштаб 1 : 200



Константы:

Параметр	Значение
$J_{A4/2}$ – длина трещины	2 (3–10 м)
$J_{A4/5}$ – выветренность стенок трещин	6 (невыветренные)
J_{A5} – водопристок	4 (капез)
J_B – ориентировка трещин к оси выработки	–5 (среднеблагоприятные)

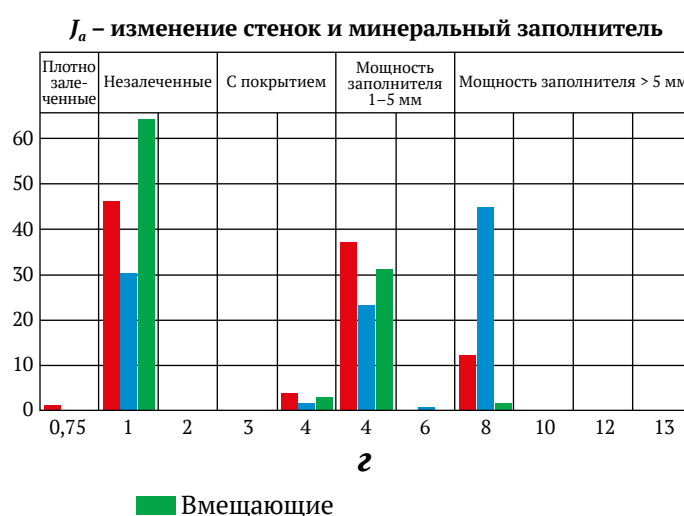
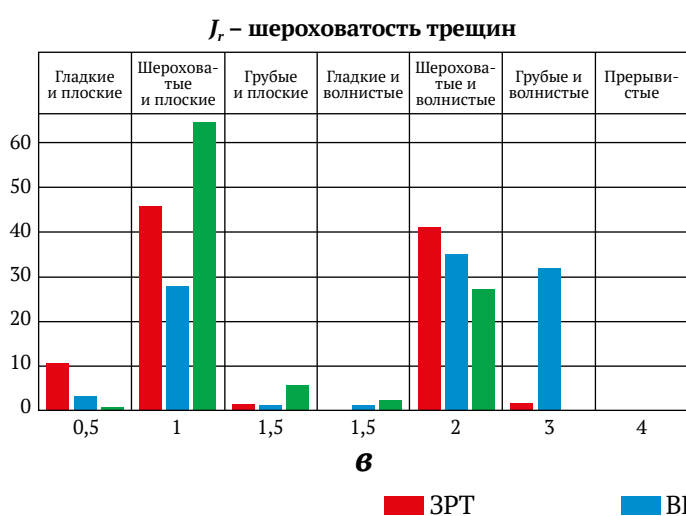
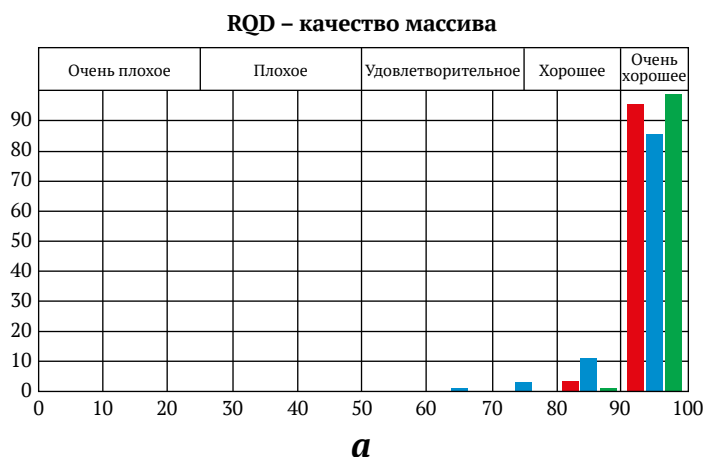
Рис. 6. Гистограммы распределения входных параметров для расчета рейтинга RMR



Для пород, вмещающих трубку, диапазон прочности на одноосное сжатие колеблется в пределах 28,14–71,73 МПа со средним значением 41,05 МПа (рис. 6, а). Наиболее высокая степень изменчивости прочностных свойств характерна для кимберлитовой брекчии ЗРТ и ВРТ (включая порфиновый кимберлит и автолитовую брекчию). Интервал измеренных значений прочности колеблется от 2,15 до 119,48 МПа со средним значением 32,54 МПа. Большой разброс значений прочности при одноосном сжатии кимберлитов объясняется тем, что их физико-механические и прочностные свойства зависят от минералогического, химического и гранулометрического состава. Эти характеристики у кимберлитов значительно варьируются как по площади, так и на глубину. Кроме того, кимберлиты подвержены гипергенным преобразованиям, что приводит к изменениям их минерального состава и, соответственно, к колебаниям прочностных характеристик [24]. В целом полученные значения прочностных характеристик соответствуют скальным

породам низкой, умеренной, средней и высокой прочности согласно существующей классификации [25]. При этом подавляющий объем рудных тел занимают кимберлиты низкой и умеренной прочности.

Значения RQD колеблются в широких пределах, от 50 и до 100 % (рис. 6, б, рис. 7, а), при этом средние значения с низким коэффициентом вариации превышают 90 %, что отвечает очень хорошему качеству массивов для всех литологических разностей [26]. Следует отметить, что на итоговое значение RQD существенно влияют качество бурения, ориентировка скважины по отношению к трещинам, а также различия в расстояниях между трещинами. Например, RQD = 0, когда расстояние между трещинами составляет 100 мм или меньше, в то время как RQD = 100, когда расстояние составляет 110 мм или больше. Другим недостатком является то, что RQD не дает информации о фрагментах керна <10 см, т.е. не придается значение тому, являются ли отбракованные фрагменты длиной до 10 см дисперсными или плотными (скальными) породами.



ЗРТ

ВРТ

Вмещающие

Константы:

Параметр	Значение
J_w – водоприток	0,66 (средний)
SRF – фактор снижения напряжений	2,5 (низкое напряжение, одиночные тектонические зоны)

Рис. 7. Гистограммы распределения входных параметров для расчета рейтинга Q

Расстояние между трещинами определялось как величина, обратная модулю трещиноватости (количество трещин, приходящихся на единицу длины (погонный метр)). Для корректной оценки данного параметра важным является ориентировка скважины по отношению к трещинам массива, что продемонстрировано на рис. 8, где показаны три задокументированных интервала, нарушенных трещинами, с одинаковым расстоянием между ними, равным 0,1 м.

По первому интервалу (50–51 м), в пределах которого трещины располагаются перпендикулярно оси керна, модуль трещиноватости равен 10 тр/пог. м. По второму интервалу (51–52 м) с трещинами, располагающимися под углом 45° к оси, получен модуль равный 7 тр/пог. м. И, наконец, для третьего интервала (52–53 м) с углом между осью керна и трещинами 20° модуль равен 4 тр/пог. м. Истинный модуль трещиноватости получен только для первого интервала, на двух других идет искусственное занижение значения. При этом в примере рассмотрена только одна система трещин, в то время как в реальном массиве, как правило, развиты две и более систем и несколько случайных (бессистемных) трещин, которые влияют на конечное значение модуля. Поэтому при расчетах данного показателя использовался весовой коэффициент Терцаги (Terzaghi weighting) [27]. Он пропорционально увеличивает в выборке «вес» трещин (средневзвешенное значение каждой трещины от их общего количества), которые располагаются под углом, отличным от прямого, к оси скважины. Чем более острый угол между трещиной и осью скважины, тем больше значение коэффициента Терцаги.

Массив вмещающих трубку отложений может быть отнесен к практически монолитным (I класс трещиноватости по СНИП II-94–80) со средним размером отдельностей более 1,5 м (рис. 6, в). Для массивов кимберлитовых тел наблюдается практически трехкратное превышение показателя частоты встречаемости трещин в массиве ВРТ, что свидетельствует о его существенно большей нарушенности. Это подтверждает ранее сделанные выводы по результатам структурного документирования стенок горных выработок рудника [28]. Кимберлиты ЗРТ являются среднетрещиноватыми породами (III класс, размер отдельностей

0,5–1 м), кимберлиты ВРТ – сильнотрещиноватыми (IV класс, размер отдельностей 0,1–0,5 м).

Пониженные значения частоты трещин наблюдаются для галогенных отложений, что связано с их реологическими свойствами, а именно повышенной пластичностью, которая компенсирует прилагаемые тектонические и литостатические нагрузки. Для ксенолитов в пределах кимберлитовых тел характерна более высокая нарушенность трещинами, чем для материнской толщи вмещающих пород. По всей видимости, это связано с процессами дополнительной деструкции в период внедрения кимберлитового расплава.

Оценка истинной протяженности трещинных структур из-за их трехмерного характера, ограниченной проявленности, а также высокой изменчивости параметров – весьма нетривиальная задача, особенно по скважинным данным. Наиболее точно данный параметр может быть получен при визуальном прослеживании нарушений по стенкам обнажений или горных выработок. Однако зачастую размеры выработок меньше протяженности трещин/разломов, что не позволяет точно определить их длину. Статистический анализ замеров трещин, выполненный в пределах подземных горных выработок рудника [28], показал, что в массиве преобладают трещины протяженностью до трех метров. Следует отметить, что данная цифра во многом приблизительная, т.к. оценка протяженности более крупных трещин и локальных разломов ограничена сечением выработок (около 5 м). Принимая во внимание данные, полученные при структурных исследованиях в карьере Удачный, в качестве расчетной усредненная длина трещин принята равной 3–10 м.

По результатам документации керна установлено, что в массивах как вмещающих отложений, так и кимберлитовых тел существенно преобладают трещины шероховатые, плоской, волнистой и ступенчатой конфигураций (см. рис. 6, з, рис. 7). Причем трещины в кимберлите чаще характеризуются более грубой шероховатостью, чем трещины в осадочных породах. Шероховатость трещин без заполнителя увеличивает угол трения по ним и, следовательно, увеличивает сопротивление сдвигу в плоскости дефекта. Также в пределах массива и особенно в зоне эндо/экзоконтакта отмечены трещины с зеркалами скольжения. Наличие

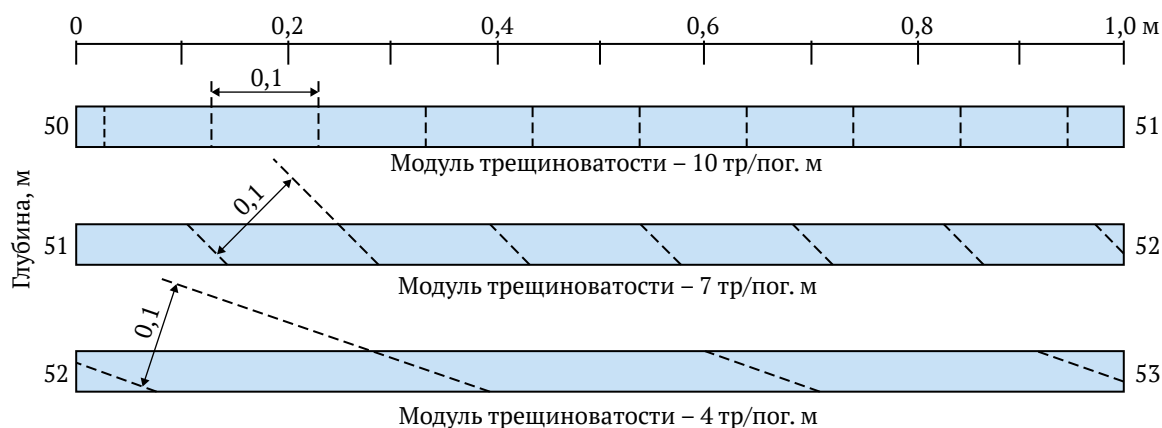


Рис. 8. Пример расчета модуля трещиноватости по керну скважины



на плоскостях трещин следов перемещения, таких как зеркала и борозды скольжения, имеющих погружение по падению плоскостей трещин, существенно снижает сопротивление сдвигу.

При низких степенях шероховатости наибольшее влияние на сдвиговую прочность по трещинам оказывают прочностные свойства минерального заполнителя. Большая часть трещин в кимберлите западного рудного тела и вмещающих отложениях не имеет минерального заполнителя (см. рис. 6, е). Главным заполнителем трещин являются карбонаты с подчиненным значением сульфатов и галогенных пород. По трещинам ЗРТ существенно более часто встречаются трещины с проявлениями сульфидов, в то время как для ВРТ достаточно большое число трещин имеет ожелезнение стенок. В качестве главного заполнителя трещин кимберлита восточного рудного тела выступает каменная соль. Для вмещающих пород заполненность трещин солью не имеет повсеместного распространения, хотя четверть всех трещин, зафиксированных в глинистом известняке на контакте с ВРТ, выполнены солью. Также в единичных трещинах отмечаются глина и кварц. Последний чаще встречается в виде друз и жезд и связан с гидротермальной стадией кимберлитового преобразования [29]. Подавляющее большинство заполненных трещин имеют мощность от 1 до 5 мм, реже от 5 до 10 мм. Наибольшая мощность характерна для трещин, выполненных солью и кальцитом.

По результатам анализа поинтервальных диаграмм трещиноватости установлено, что для исследуемого массива характерно преобладание одной, реже двух систем трещин, осложненных единичными бессистемными (рандомными) разрывами (см. рис. 7, б). Обусловлено это низкой тектонической активностью на участке локализации месторождения (центральная часть Сибирской платформы) и отсутствием крупных разломных структур высоких рангов. Наибольшее количество систем трещин фиксируется в зоне экзо-эндоконтакта, имеющей повышенную деструкцию вследствие термодинамического воздействия от внедрения нескольких порций кимберлитового расплава.

Основным источником обводнения месторождения является Среднекембрийский водоносный комплекс (СВК) с двумя водоносными горизонтами, обладающими повышенными фильтрационными свойствами [12]. Подземные воды СВК высокоминерализованные, газонасыщенные, приурочены к известняково-доломитовым отложениям среднего-нижнего кембрия [30]. Значения пластовых давлений изменяются от 4,5 до 15,6 МПа, а водопритоки колеблются в пределах 0,6–228 л/мин, что позволяет предпо-

ложить средний уровень водопритока в подземные горные выработки на глубоких горизонтах рудника. Следовательно, параметр J_{A5} из системы RMR принят равным 4, что отвечает капезу, а параметр J_w системы Q принят равным 0,66 – уровень водопритока средний.

Данные о действующих в массиве напряжениях, которые можно использовать для оценки фактора SRF при расчете рейтинга Q, получены по результатам исследований методом измерительного гидроразрыва. По действующим напряжениям массив может быть условно отнесен к классу Б (прочные породы, имеющие проблемы с напряжением (давлением))². В этом случае оценка фактора SRF осуществляется по соотношению σ_c/σ_1 , где σ_c – прочность на одноосное сжатие, σ_1 – максимальное напряжение (табл. 1).

Полученные высокие значения SRF указывают на потенциально удароопасные условия отработки месторождения в изучаемом интервале глубин. В то же время, по свидетельству специалистов геологической службы рудника, динамических проявлений горного давления (щелчки и треск в массиве пород, интенсивное заколообразование, «шелушение» пород на контуре и в целике, «стреляние») во время проходки подготовительных горных выработок на горизонтах –480, –580 (–630) не наблюдалось. Анализ фотодокументации керна геомеханических скважин показал отсутствие больших объемов дискования керна, характерного для хрупко-упругих пород в условиях высоких напряжений, что также свидетельствует о низком потенциале удароопасности массива в исследуемых глубинах. Противоречивость расчетных данных и поведения массива на практике может быть объяснена тем, что в качестве необходимых условий возникновения горных ударов помимо превышения действующими нагрузками предела прочности пород на сжатие требуется превышение скорости нагружения пород скорости развития пластических или упруго-вязких деформаций [31]. В отсутствие прямых данных, подтверждающих наличие высоких напряжений в массиве, в качестве расчетного принято значение SRF, равное 2,5.

Обсуждение результатов

Применение описанного выше подхода к сбору и анализу горно-геологической информации по исследуемому месторождению позволило произвести расчеты рейтингов RMR и Q и на их основе выполнить категоризацию состояния породного массива (рис. 9).

² Using the Q-system. Rock mass classification and support design. NGI. 2015. 56 p.

Таблица 1

Оценка фактора снижения напряжения SRF

Горизонт	Породы	σ_1 , МПа	σ_c , МПа	σ_c/σ_1	SRF
–465	Кимберлит (ЗРТ)	22,75	2,15–119,48	0,09–5,25	0,5–400
–465	Кимберлит (ВРТ)	20*	3,89–98,11	0,19–4,9	5–400
–480	Вмещающие	26,8	27,9–71,3	1,04–2,66	50–400
–580	Вмещающие	31,35	27,9–71,3	0,89–2,27	50–400

* натуральных измерений напряжения в ВРТ не проводилось



Согласно классификации Бенъавски [2] рассмотренные литологические домены включают участки плохого, удовлетворительного и хорошего состояния, что соответствует IV, III и II категориям массивов по устойчивости. По средним значениям кимберлиты ЗРТ и ВРТ относятся к третьей категории, в то время как вмещающие отложения имеют пограничное значение между второй и третьей категорией. Среднее время устойчивого состояния колеблется от 6 мес (при пролете до 8 м) до 10 ч (при пролете до 2,5 м).

Рейтинг Q характеризуется диапазоном величин от 0,18 до 105,6. Такой разброс минимального и максимального значений обусловлен тем, что в классификации Бартона используется логарифмическая шкала с размахом в 10^6 . По медианным значениям кимберлиты ВРТ относятся к классу D с плохим состоянием породного массива. Большая часть массива ЗРТ может быть отнесена к классу C со средним состоянием. Породы, вмещающие трубку, преимущественно попадают в класс C со средним состоянием массива.

Полученные расчетные значения рейтинговых показателей являются предварительными и достаточно консервативными, требующими заверки в процессе ведения горных работ. Обусловлено это тем, что сбор необходимой для расчета геолого-геомеха-

нической информации в нужном объеме и с требуемым уровнем надежности данных сопряжен с многочисленными ограничениями. Так, часть вводных составляющих для расчета рейтингов были оценены по косвенным данным и приняты константами для всего массива. Это касается протяженности трещин, обводненности массива на проектных глубинах, ориентировки трещин по отношению к проектным выработкам, действующим в массиве напряжениям. В отсутствие возможности точной оценки недостающих параметров использование двух или более систем классификаций при проектировании технологий обработки месторождений обеспечивает более полное и всестороннее представление о геомеханическом состоянии массива и потенциальных рисках при его разработке, о чем говорят сами авторы рейтинговых систем [2, 35].

Хотя между системами классификации RMR и Q есть много общего, разная «чувствительность» используемых параметров и их структура приводят к тому, что одни и те же участки массива, охарактеризованные разными классификациями, могут иметь существенные отличия в итоговых значениях, что показано на корреляционной диаграмме рассеяния (см. рис. 9). Как можно видеть, для $Q = 1$ RMR

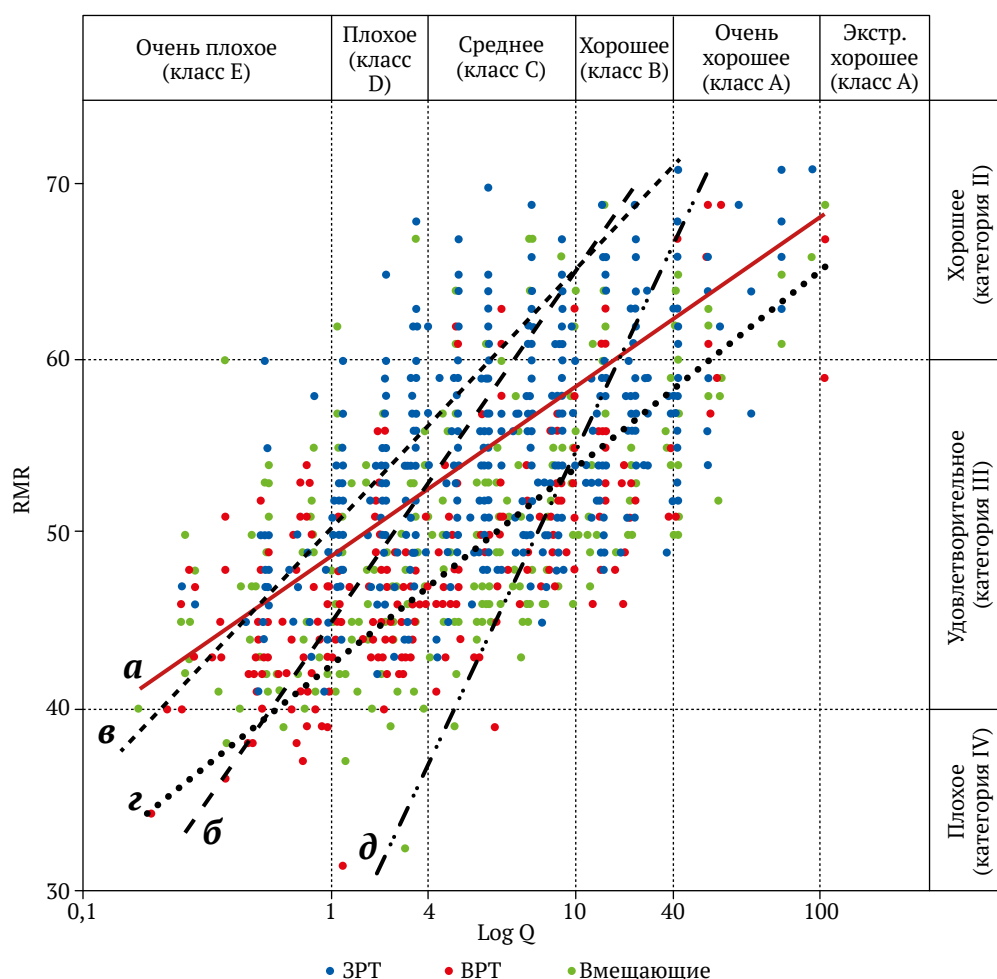


Рис. 9. Диаграмма рассеяния по рейтинговым показателям RMR и Q :
а – результаты исследования, б – [2], в – [32], г – [33], д – [34]

варьирует в широком диапазоне – от 32 до 62, а при значении RMR 50 рейтинг Q изменяется от 0,5 до 45. Грубая корреляция обусловлена несколькими причинами. Рейтинг Q напрямую не учитывает прочностную характеристику горных пород. Хотя в работе [36] предпринималась попытка ввести прочность на одноосное сжатие в схему расчета рейтинга Q_c , широко применения данная поправка не нашла. Система RMR не учитывает условия перенапряжений (горные удары) и рассчитана для применения с напряжениями до 25 МПа, в то время как для системы Q активные напряжения в массиве определяются по соотношению показателей J_w и SRF. Также системы Q и RMR по-разному характеризуют разломные зоны. В системе RMR специальный параметр не используется, а в системе Q влияние разломов учитывается опосредованно через показатель SRF. Кроме того, корреляция зависит от типа и структуры массива, что продемонстрировано в многочисленных работах [2, 32–34]. Некоторые из корреляционных кривых приведены на рис. 9. Поскольку рассматриваемый массив является комбинированным, т.е. состоящим из слоистой и неслоистой компоненты, влияние структуры массива будет максимальным.

Системы RMR и Q лучше всего работают в блочном массиве, поэтому степень его нарушенности, выраженная через показатель RQD, или расстояние между трещинами, часто является наиболее важным

входным параметром, от которого зависит результирующее значение обоих рейтингов. Учитывая упомянутые ранее недостатки показателя RQD как меры структурной нарушенности массива, следует принимать во внимание и оценивать потенциальную ошибку, которую привносит данный показатель в итоговые значения рейтингов.

Несмотря на указанные выше расхождения каждая из систем позволяет дать характеристику геомеханического состояния массива, определить категорию массива по устойчивости, время устойчивого состояния, тип проходки и систему крепления выработок. Выбор базовой классификационной системы должен осуществляться исходя из решаемых задач и набора исходных данных. На практике большей популярностью при выборе систем крепления подземных горных выработок пользуется система Q с использованием номограммы, разработанной Норвежским геомеханическим институтом (рис. 10).

Оценка оптимальных характеристик крепи осуществляется с помощью дополнительных параметров: «эквивалентный размер» выработки (ED, Equivalent dimension) и «коэффициент крепления выработки» ESR (Excavation Support Ratio) [3]. Для рудника Удачный рассмотрены два варианта выработок: капитальные, с ESR равным 1,6, а также сопряжения выработок, для которых ESR равен 1. Пролет выработок принят равным 5 м, откуда отношение



Рис. 10. Номограмма выбора параметров крепления выработок по рейтингу Q
 Источник: Using the Q-system. Rock mass classification and support design. NGI. 2015. 56 p.



пролет/ESR (вертикальная шкала слева на рис. 10) для капитальных выработок равно 3,1, для сопряжений – 5. Благодаря полученному диапазону значений рейтинга Q на номограмме (рис. 10) были предложены следующие рекомендации по креплению. Для капитальных выработок рекомендованы 4 типа крепления. Локальное (рассредоточенное) крепление железобетонными анкерами длиной 2 м с расстоянием между анкерами 1–4 м для участков с очень крепкими, крепкими и средними массивами по категории устойчивости (классы A , B и C). Систематическое анкерное крепление с аналогичными параметрами анкеров в сочетании с дисперсно-армированным набрызгбетоном толщиной 5–6 см для пород класса D . Для участков очень слабых пород (зоны разломов, области приконтактных изменений) рекомендуется уменьшение расстояний между анкерами с одновременным увеличением слоя набрызгбетона до 9–12 см. Для сопряжений горных выработок определены схожие параметры крепи в зависимости от категории массива, но при этом рекомендуется увеличение до 2,5 м длины анкеров, а также последовательное уменьшение расстояния между анкерами и увеличение толщины слоя торкретбетона по мере ухудшения категории устойчивости массива.

Заключение

Применение комплексной системы сбора данных, включающей акустический телевьюверный каротаж скважин и геолого-структурную документацию неориентированного керна, а также использование результатов лабораторных исследований физико-ме-

ханических свойств пород, натурных измерений НДС и водопритоков позволили произвести расчеты рейтинговых показателей состояния горного массива по классификациям RMR и Q для глубоких горизонтов подземного рудника Удачный. С их помощью массив рудных тел и вмещающих отложений оценен по степени устойчивости (присвоены классы/категории), а также определены оптимальные способ и параметры крепления выработок. Накоплена база геомеханических данных, которая при необходимости может быть использована для расчета других рейтингов, таких как MRMR [5], Rmi [37], GSI [7] и др., без переходных уравнений.

Следует отметить, что расчет рейтингов является итеративной процедурой, повторяющейся по мере появления новых данных и длящейся весь период функционирования рудника, а полученные на текущем этапе исследования требуют актуализации в процессе ведения горных работ.

Рейтинговые классификации являются важным инструментом оценки состояния породного массива и во многом используются как средство краткосрочного прогноза его поведения. Эмпирическая база рейтинговых систем вводит ограничение на их применение в качестве ключевых источников данных при принятии инженерных решений, особенно в сложных горно-геологических условиях. Интегрирование рейтингов с аналитическими методами и методами численного моделирования выглядит наиболее перспективным подходом для учета неопределенности и изменчивости свойств массива при проектировании и эксплуатации подземных технологий.

Список литературы / References

1. Bieniawski Z.T. Engineering classification of jointed rock masses. *Civil Engineer in South Africa*. 1973;15(12):335–344.
2. Bieniawski Z.T. *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley; 1989. 251 p.
3. Barton N., Lien R., Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of rock support. *Rock Mechanics*. 1974;6:189–236. <https://doi.org/10.1007/BF01239496>
4. Barton N. Some new Q -value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2002;39:185–216.
5. Laubscher D.H. Geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 1990;90(10):257–273. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(91\)90830-F](https://doi.org/10.1016/0148-9062(91)90830-F)
6. Laubscher D.H., Jakubec J. The MRMR Rock mass classification for jointed rock masses. In: Hustrulid W.A., Bullock R.L. (Eds.) *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Histories*. Littleton, Colorado: SME; 2001. Pp. 475–481.
7. Hoek E. Strength of rock and rock masses. *ISRM News Journal*. 1994;2(2):4–16.
8. Hoek E., Brown E.T. The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019;11(3):445–463. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.001>
9. Gwynn X., Brown M.C., Mohr P.J. Combined use of traditional core logging and televiewer imaging for practical geotechnical data collection. In: Dight P.M. (ed.) *Slope Stability 2013: Proceedings of the 2013 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*. Perth: Australian Centre for Geomechanics; 2013. Pp. 261–272. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1308_13_Mohr
10. Серебряков Е.В., Гладков А.С., Гапфаров Т.Д. Обзор современных методов сбора данных для оценки структурной нарушенности горного массива. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9):160–177. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_9_0_160
Serebriakov E.V., Gladkov A.S., Gapfarov T.D. Modern methods of data collection for structural damage assessment in rock mass: Review. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(9):160–177. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_9_0_160



11. Костровицкий С.И., Специус З.В., Яковлев Д.А. и др. *Атлас коренных месторождений алмазов Якутской кимберлитовой провинции*. Мирный: ООО «МГТ»; 2015. 480 с.
Kostrovitsky S.I., Spezicius Z.V., Yakovlev D.A. et al. *Atlas of primary diamond deposits of the Yakutsk kimberlite province*. Mirny: MGT LLC Publ.; 2015. 480 p. (In Russ.)
12. Колганов В.Ф., Акишев А.Н., Дроздов А.В. *Горно-геологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии*. Мирный: АК «АЛРОСА», Институт «Якутнипроалмаз»; 2013. 568 с.
Kolganov V.F., Akishev A.N., Drozdov A.V. *Mining and geologic features of primary diamond deposits of Yakutia*. Mirny: ALROSA, Yakutnioproalmaz Institute Publ.; 2013. 568 p. (In Russ.)
13. Kopylova M.G., Kostrovitsky S.I., Egorov K.N. Salts in southern Yakutian kimberlites and the problem of primary alkali kimberlite melts. *Earth-Science Reviews*. 2013;119:1–16. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.01.007>
14. Celada B., Tardáguila I., Varona P. et al. Innovating tunnel design by an improved experience-based RMR system. In: *Proceedings of the World Tunnel Congress 2014 – Tunnels for a Better Life*. Foz do Iguaçu, Brazil, 9–15 May 2014. PP. 1–9.
15. Peyras L., Rivard P., Breul P. et al. Characterization of rock discontinuity openings using acoustic wave amplitude – Application to a metamorphic rock mass. *Engineering Geology*. 2015;193:402–411. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.05.014>
16. McKenna G.T.C., Roberts-Kelly S.L. Televiwer imaging of boreholes; benefits and considerations for interpretation in the absence of physical rock core. In: Lehane B., Acosta-Martinez H.E., Kelly R. (Eds.) *Geotechnical and Geophysical Site Characterisation, ISC'5*. Sydney, Australia: Australian Geomechanics Society; 2016. Pp. 291–296.
17. Серебряков Е.В., Гладков А.С. Применение акустического телевьюера при оценке структурной нарушенности и геомеханического состояния горного массива. В: *Инженерная и рудная геофизика 2023. Сборник материалов 19-й научно-практической конференции и выставки*. М.: ООО «EAGE ГЕОМОДЕЛЬ»; 2023. С. 329–333.
Serebriakov E.V., Gladkov A.S. Application of acoustic televiwer in the assessment of structural disturbance and geomechanical state of the rock mass. In: *Engineering and Ore Geophysics 2023. Collection of papers of the 19th scientific and practical conference and exhibition*. Moscow: EAGE GEOMODEL LLC; 2023. Pp. 329–333. (In Russ.)
18. Bae D.S., Kim K., Koh Y., Kim J. Characterization of joint roughness in granite by applying the scan circle technique to images from a borehole televiwer. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2011;44:497–504. <https://doi.org/10.1007/s00603-011-0134-9>
19. Thomas R.D.H., King A.M., Neilsen J.M. Assessing waviness from televiwer for incorporation within defect plane shear strength models. In: *Proceedings of the 48-th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. 1–4 June 2014, Minneapolis, Minnesota.
20. Barton N., Choubey V. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*. 1977;10:1–54. <https://doi.org/10.1007/BF01261801>
21. Fredrick F.D., Nguyen T., Seymour C., Dempers G. Geotechnical data from optical and acoustic televiwer surveys. *The AusIMM Bulletin*. 2014;62–66.
22. Katic N., Chalmers R., Christensen H.F. OATV for strength estimations in Copenhagen Limestone. In: *Proceedings of the 17th Nordic Geotechnical Meeting Challenges in Nordic Geotechnic*. 2016. Pp. 169–176.
23. Kao H.-Ch., Chou P.-Y., Lo H.-Ch. An innovative application of borehole acoustic image and amplitude logs for geotechnical site investigation. *Acta Geophysica*. 2020;68(6):1821–1832. <https://doi.org/10.1007/s11600-020-00493-2>
24. Подгаецкий А.В. Влияние минерального состава на формирование физико-механических свойств кимберлита. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011;(8):105–110.
Podgaetskiy A.V. The influence of the mineralogical compound on the formation of physical and mechanical properties of kimberlites. *Mining Informational and analytical bulletin*. 2011;(8):105–110. (In Russ.)
25. Palmstrom A. Measurement and characterization of rock mass jointing. In: Sharma V.M., Saxena K.R. *In-situ Characterization of Rocks*. A.A. Balkema Publishers; 2001.
26. Deere D.U. *Rock quality designation (RQD) after twenty years*. U.S. Army Corps of Engineers Vicksburg, MS: Waterways Experimental Station; 1989. 93 p.
27. Terzaghi R. Sources of error in joint surveys. *Géotechnique*. 1965;15(3):287–304. <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.3.287>
28. Серебряков Е.В., Гладков А. С. Геолого-структурная характеристика массива глубоких горизонтов месторождения Трубка «Удачная». *Записки Горного института*. 2021;250:512–525. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.4>
Serebryakov E.V., Gladkov A.S. Geological and structural characteristics of deep-level rock mass of the Udachnaya pipe deposit. *Journal of Mining Institute*. 2021;250:512–525. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.4>



29. Филиппов А. Г. Гидротермальный кварц из кимберлитов Якутии. *Геология и геофизика*. 1992;(11):108–115. Filippov A. G. Hydrothermal quartz from kimberlites of Yakutia. *Geologiya i Geofizika*. 1992;(11):108–115. (In Russ.)
30. Алексеев С. В., Алексеева Л. П., Гладков А. С. и др. Рассолы глубоких горизонтов кимберлитовой трубки Удачная. *Геодинамика и тектонофизика*. 2018;9(4):1235–1253. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0393>
Alekseev S. V., Alekseeva L. P., Gladkov A. S. et al. Brines in deep horizons of the Udachnaya kimberlite pipe. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2018;9(4):1235–1253. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0393>
31. Петухов И. М. *Горные удары на угольных шахтах*. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: ФГУП «Гос. НИИ горн. геомеханики и маркшейд. дела – МНЦ ВНИМИ»; 2004. 238 с.
Petukhov I. M. *Rock bursts at coal mines*. 2nd revised and enlarged edition. St. Petersburg: FGUP “State Research Institute of Mining Geotechnics and Mine Surveying – MSC VNIMI” Publ.; 2004. 238 p. (In Russ.)
32. Barton N. The influence of joint properties in modelling jointed rock masses. In: *8th ISRM Congress*. September 25–29, 1995. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering. Pp. 1023–1032.
33. Sayeed I., Khanna R., Empirical correlation between RMR and Q systems of rock mass classification derived from Lesser Himalayan and Central crystalline rocks. In: *International Conference on «Engineering Geology in New Millennium»*. New Delhi, 27–29 October, 2015. Pp. 1–12.
34. Sadeghi S., Sharifi Teshnizi E., Ghoreishi B. Correlations between various rock mass classification/characterization systems for the Zagros tunnel-W Iran. *Journal of Mountain Science*. 2020;17(1):1790–1806. <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5665-7>
35. Barton N., Bieniawski Z. T. RMR and Q-Setting records. *Tunnels and Tunnelling International*. 2008:26–29.
36. Barton N. Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2002;39(2):185–216. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00011-4](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00011-4)
37. Palmstrom A. Characterizing rock masses by the Rmi for use in practical rock engineering: Part 1: The development of the Rock Mass index (Rmi). *Tunnelling and Underground Space Technology*. 1996;11(2):175–188.

Информация об авторах

Евгений Валерьевич Серебряков – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории инженерной геологии и геоэкологии, Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-7280-7784](https://orcid.org/0000-0001-7280-7784); e-mail serebryakov.e.v@mail.ru

Илья Анатольевич Зайцев – главный геолог, Удачный горно-обогатительный комбинат, ПАО «АК «АЛРОСА», г. Мирный, Российская Федерация; e-mail zaytsevia@alrosa.ru

Андрей Анатольевич Потака – начальник отдела геотехнического мониторинга, Удачный горно-обогатительный комбинат, ПАО «АК «АЛРОСА», г. Мирный, Российская Федерация; e-mail potakaaa@alrosa.ru

Information about the authors

Evgeny V. Serebryakov – Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Researcher at the Laboratory of Engineering Geology and Geoecology, Institute of Earth Crust SB RAS, Irkutsk, Russian Federation; ORCID [0000-0001-7280-7784](https://orcid.org/0000-0001-7280-7784); e-mail serebryakov.e.v@mail.ru

Ilya A. Zaytsev – Chief Geologist, Udachny Mining and Processing Complex, PJSC AK ALROSA, Mirny, Russian Federation; e-mail zaytsevia@alrosa.ru

Andrey A. Potaka – Head of the Geotechnical Monitoring Department, Udachny Mining and Processing Complex, PJSC AK ALROSA, Mirny, Russian Federation; e-mail potakaaa@alrosa.ru

Поступила в редакцию 14.12.2023
Поступила после рецензирования 21.02.2024
Принята к публикации 02.04.2024

Received 14.12.2023
Revised 21.02.2024
Accepted 02.04.2024



СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-10-176>

УДК 550.8.053

**Применение гидродинамического моделирования
на основе композиционной модели для повышения эффективности
разработки газоконденсатной залежи**К. О. Томский¹   , М. С. Иванова¹  , Е. Д. Никитин² , Л. А. Рудых¹ ¹ Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация² Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация kirilltom@mail.ru**Аннотация**

На текущий момент использование цифровых моделей при разработке нефтяных и газовых месторождений является эффективным инструментом принятия обоснованных тактических и стратегических решений для максимального извлечения углеводородных запасов на месторождении. При этом постоянное увеличение доли трудноизвлекаемых запасов приводит к ускоренному нарастанию роли моделирования пластовых углеводородных систем при разработке нефтяных и газовых месторождений. Многие газоконденсатные месторождения Восточной Сибири можно охарактеризовать как залежи с низкими фильтрационно-емкостными свойствами и сложными термобарическими условиями, и, как следствие, актуальным является вопрос повышения эффективности разработки подобных залежей для увеличения накопленной добычи газа и конденсата. В случае если начальное пластовое давление газоконденсатного месторождения соответствует давлению начала конденсации, наблюдается выпадение значительного количества ретроградного конденсата при понижении давления в пласте. Выпадение конденсата в поровом пространстве пласта приводит к понижению как коэффициента извлечения конденсата (КИК), так и коэффициента извлечения газа (КИГ). С помощью гидродинамического симулятора Т-Навигатор отечественного производителя Rock Flow Dynamics были произведены прогнозные расчеты разработки газоконденсатной залежи вертикальными и горизонтальными скважинами. Расчеты производились при различных технологических режимах на примере газоконденсатного месторождения, который характеризуется сложными термобарическими условиями (начальное пластовое давление соответствует давлению начала конденсации), при этом целевым технологическим параметром являлось количество выпавшего конденсата в пласте. По результатам исследования можно сделать основной вывод – разработка залежи горизонтальными скважинами позволяет значительно снижать депрессию на пласт по сравнению с вертикальными, при этом конденсат в пласте выпадает по большему объему, становится неподвижным и препятствует дальнейшей добыче газа, снижая общую добычу конденсата. Увеличение конденсатоотдачи пласта при разработке газоконденсатной залежи вертикальными скважинами по сравнению с горизонтальными скважинами наблюдается при определенных пластовых условиях, соответствующих проделанному в настоящей работе моделированию, а именно при низких фильтрационно-емкостных свойствах пласта и наличии насыщенной газоконденсатной системы.

Ключевые слова

коэффициент извлечения конденсата, композиционная модель, газоконденсатное месторождение, многокомпонентная модель, ретроградный конденсат, математическая модель, конденсатоотдача, коэффициент извлечения газа

Для цитирования

Tomskiy K. O., Ivanova M. S., Nikitin E. D., Rudykh L. A. Application of hydrodynamic simulation on the basis of a composite model to improve the efficiency of gas-condensate reservoir development. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):221–230. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-10-176>



MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research paper

Application of hydrodynamic simulation on the basis of a composite model to improve the efficiency of gas-condensate reservoir developmentK. O. Tomskiy¹  , M. S. Ivanova¹  , E. D. Nikitin² , L. A. Rudykh¹ ¹ North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov, Yakutsk, Russian Federation² University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation kirilltom@mail.ru**Abstract**

At the moment, the use of digital models in the development of oil and gas fields is an effective tool for making informed tactical and strategic decisions to maximize the extraction of hydrocarbon reserves in a field. At the same time, the permanent increase in the share of hard-to-recover reserves leads to an accelerated increase in the role of simulation of reservoir hydrocarbon systems in the development of oil and gas fields. Many gas-condensate fields in Eastern Siberia can be characterized as reservoirs with low permeability and porosity and difficult thermobaric conditions, and, as a result, the issue of improving the efficiency of the development of such reservoirs to increase the cumulative production of gas and condensate is relevant. If the initial reservoir pressure of a gas-condensate field corresponds to the dewpoint pressure, dropout of a significant amount of retrograde condensate is observed when the pressure in the reservoir decreases. Condensate dropout in the pore space of a reservoir leads to a decrease in both the condensate recovery factor (CRF) and the gas recovery factor (GRF). The predictive calculations of the development of a gas-condensate reservoir by vertical and horizontal wells were carried out with the use of the hydrodynamic simulator T-Navigator of a domestic manufacturer Rock Flow Dynamics. The calculations were performed under various process conditions on the example of a gas-condensate field, which is characterized by complicated thermobaric conditions (the initial reservoir pressure corresponds to the dewpoint pressure), while the target process parameter was the amount of condensate dropout in the reservoir. Based on the results of the study, the main conclusion can be drawn. The development of the reservoir by horizontal wells can significantly reduce the reservoir drawdown pressure compared to vertical wells, while the condensate dropout in the reservoir occurs in a larger volume; the condensate becomes immobile and prevents further gas production, reducing the total production of condensate. An increase in reservoir condensate recovery in the course of the development of a gas-condensate reservoir by vertical wells compared to horizontal wells is observed under certain reservoir conditions corresponding to the simulation performed in this study, namely, at low reservoir permeability and porosity and the presence of a saturated gas-condensate system.

Keywords

condensate recovery factor, composite model, gas-condensate field, multicomponent model, retrograde condensate, mathematical model, condensate recovery, gas recovery factor

For citation

Tomskiy K. O., Ivanova M. S., Nikitin E. D., Rudykh L. A. Application of hydrodynamic simulation on the basis of a composite model to improve the efficiency of gas-condensate reservoir development. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):221–230. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-10-176>

Введение

В настоящее время применение геологического и гидродинамического моделирования при разработке нефтяных и газовых месторождений является эффективным способом принятия обоснованных тактических и стратегических решений для эффективного извлечения углеводородных запасов на месторождении. При этом постоянное увеличение доли трудноизвлекаемых запасов приводит к ускоренному нарастанию роли моделирования пластовых углеводородных систем при разработке нефтяных и газовых месторождений [1–3].

Самой распространенной моделью при разработке нефтегазовых месторождений является модель нелетучей нефти, в которой нефтегазовая система моделируется с помощью двух компонентов: нефтью

и газом, который, в свою очередь, может растворяться в нефти [4–6].

Для моделирования газоконденсатной залежи требуется сложная композиционная модель трехфазной фильтрации, в связи с тем что при разработке газоконденсатной залежи необходимо учитывать фактический состав пластовой смеси [7–9].

При изотермическом падении давления ниже критической точки в процессе разработки происходит явление ретроградной конденсации в поровом пространстве продуктивного пласта. Месторождения, имеющие такие характеристики, называются газоконденсатными [10–12].

Интенсивность выпадения газового конденсата, помимо давления, зависит также от компонентного состава и физико-химических свойств фаз. Измене-

ния состава флюида происходят под влиянием глубины, поверхностного натяжения и вязкости. При этом уменьшение сечения фильтрационных каналов ведет к снижению проницаемости и соответственно к снижению производительности [13–15].

Применение горизонтальных скважин по сравнению с вертикальными ведет к снижению депрессии на пласт, что приводит к меньшему выпадению конденсата в поровом пространстве и соответственно к увеличению конечной конденсатоотдачи по месторождению. При этом следует отметить, что сравнительных исследований применения горизонтальных и вертикальных скважин в условиях низкой проницаемости коллектора с целью увеличения конечной конденсатоотдачи немного [16–18].

Целью настоящей работы является выбор оптимального варианта разработки месторождения с помощью гидродинамического моделирования для увеличения конденсатоотдачи газоконденсатного месторождения, характеризующегося низкими фильтрационно-емкостными свойствами и начальным пластовым давлением, равным давлению начала конденсации.

При этом в работе решались следующие **задачи**:

- построение двух вариантов разработки газоконденсатной залежи на основе гидродинамической композиционной модели: разработка вертикальными скважинами (вариант 1) и горизонтальными скважинами (вариант 2);

- сравнительный анализ предложенных вариантов разработки газоконденсатной залежи, характеризующейся низкими фильтрационно-емкостными свойствами.

Описание композиционной модели: гидродинамическая модель (рис. 1) представлена вырезанным фрагментом месторождения.

Параметры, принятые при моделировании:

высота по Z (среднее) – 35,7 м;
 начальное пластовое давление – 29,1 МПа;
 опорная глубина – 2860 м;
 начальная пластовая температура – 80 °С;
 пористость – 0,09–0,169 доли ед.;

горизонтальная проницаемость – 0,0001556–0,0271019 мкм²;

коэффициент песчаности (среднее) – 0,6572 доли ед.

Компонентный состав пластового газа:

CO_2 – 0,273; N_2 – 1,045; CH_4 – 80,842; C_2H_6 – 6,044;
 C_3H_8 – 3,761; iC_4H_{10} – 0,790;

nC_4H_{10} – 0,921; C_5H_{12} и выше – 6,324 % мольные.

Свойства газоконденсатной смеси:

Давление пластовое – 29,10 МПа; температура – 80 °С; потенциальное содержание конденсата – 290 г/м³; мольная доля сухого газа – 0,937 доли ед.; коэффициент сверхсжимаемости при начальных условиях – 0,902; давление начала конденсации смеси – 29,10 МПа [19].

Свойства флюида моделировались исходя из данных газоконденсатных исследований. На основе данных состава и свойств пластовой смеси, полученных в процессе проведения лабораторных экспериментов, была создана композиционная модель флюида.

Методология

Одним из направлений рационального увеличения рентабельности разработки газовых и газоконденсатных месторождений, имеющих продуктивные пласты с низкой проницаемостью коллектора и залегающих на больших глубинах, является переход на систему разработки с применением горизонтальных скважин. Основными преимуществами горизонтальных скважин являются увеличение площади фильтрации пластового флюида через стенки скважины и уменьшение депрессии на продуктивный пласт, что позволяет обеспечить достаточно высокие дебиты газа и газового конденсата в низкопроницаемых и маломощных коллекторах, а также уменьшить количество необходимых эксплуатационных скважин на месторождении.

В работе было рассмотрено два варианта разработки пласта: тремя вертикальными скважинами – вариант 1; одной горизонтальной скважиной с длиной горизонтального участка 1400 м – вариант 2 [19–21].

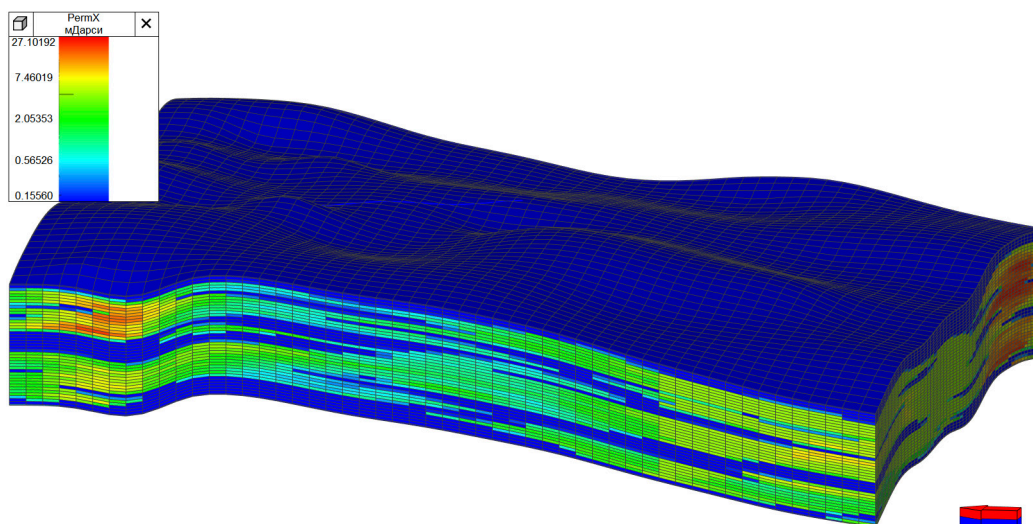


Рис. 1. Модель пласта, используемая при расчетах

Выбор трех вертикальных скважин в сравнении с одной горизонтальной скважиной, а также длина горизонтального ствола обосновывались экономическими затратами на строительство скважин. Расстановка скважин основывалась на карте начальных запасов газа и проницаемостей, а также на картах начальной газонасыщенной толщины пласта (рис. 2, 3). Иными словами, два рассмотренных варианта сопоставимы с точки зрения затрат на строительство скважин. В случае изменения количества скважин, а именно дополнительная проводка горизонтальной скважины или рассмотрение в качестве первого варианта только двух вертикальных скважин – изменяются условия сопоставимости первоначальных затрат на строительство.

В качестве варьируемых параметров по эксплуатации скважин были приняты депрессии и отборы газа. Согласно принятому минимально возможному забойному давлению в условиях месторождения при моделировании было принято переходить на забойное давление в 3,5 МПа в случае недостижения целевых показателей по дебиту и депрессии.

Далее рассчитывались основные показатели разработки фрагмента залежи и сравнивались между собой для нахождения наиболее выгодного варианта с точки зрения выработки газа и газоконденсата как в плане конструкции скважин (три вертикальные или одна горизонтальная), так и в плане технологического режима эксплуатации.

Принятые при моделировании параметры технологического режима работы скважин для вариантов: дебит газа 600, 900, 1500 и 2100 тыс. м³/сут для одной горизонтальной скважины; дебит газа 200, 300, 500 и 700 тыс. м³/сут для одной вертикальной скважины; депрессия 2, 3, 4, 5 и 6 МПа для каждой из трех вертикальных скважин.

Данные параметры технологического режима лежат в диапазоне изменений фактических параметров работы вертикальных скважин по месторождению.

Обсуждение

При разработке модели газоконденсатной залежи вертикальными скважинами необходимо поддерживать значительно более высокие депрессии по сравнению с горизонтальными скважинами для достижения сопоставимых значений дебитов. В связи с этим в случае вертикальных скважин наблюдается более резкий перепад давления в призабойной зоне скважины, который вызывает выпадение большего количества конденсата вблизи скважины, что в итоге приводит к снижению проницаемости призабойной зоны скважины по газу. При этом на определенном расстоянии от скважины наблюдаются меньшие перепады давления по сравнению с околоскважинной зоной, что в итоге приводит к большей концентрации выпавшего конденсата именно в призабойной зоне по сравнению с остальным пластом. Известно, что в процессе выпадения конденсат образует три различные

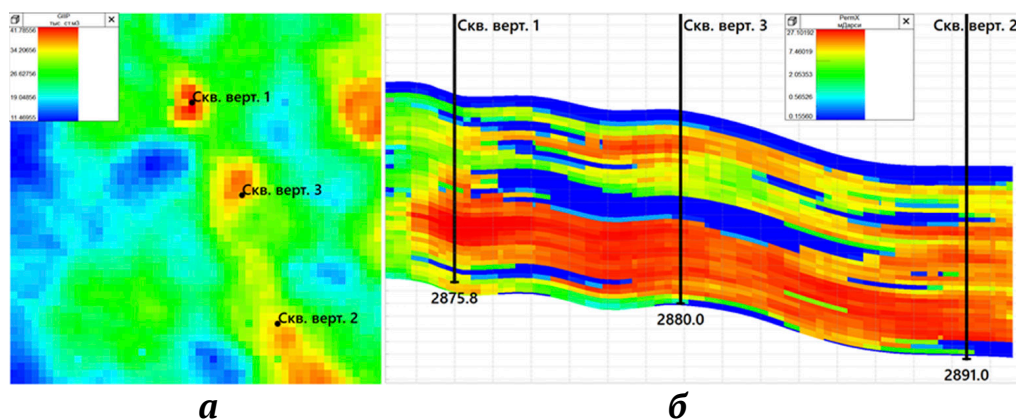


Рис. 2. Вариант 1 на карте начальных запасов (а) и проницаемостей (б)

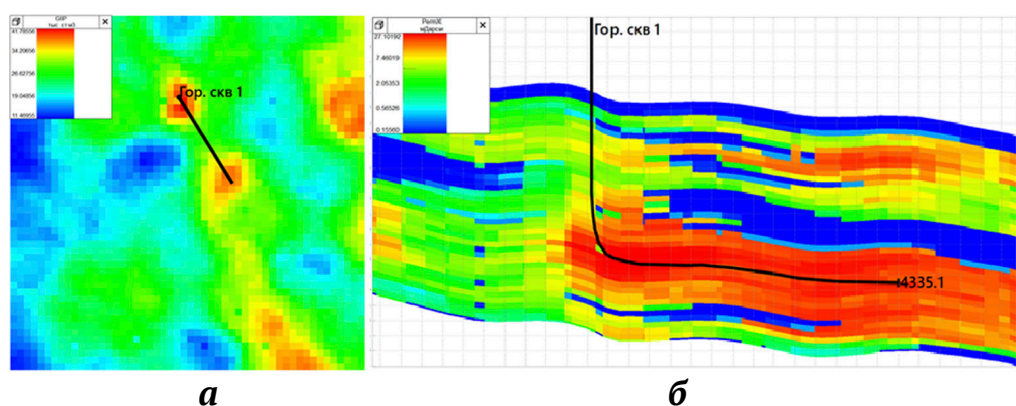


Рис. 3. Вариант 2 на карте начальных запасов (а) и проницаемостей (б)

области подвижности возле ствола вертикальной скважины. В двух из этих зон присутствует газовый конденсат в подвижной и неподвижной форме (рис. 4) [9]. Соответственно, большая часть выпавшего конденсата в призабойной зоне вертикальной скважины будет иметь подвижную форму.

Однако на данный момент очень мало исследований, касающихся выпадения конденсата при применении горизонтальных скважин. В случае разработки модели газоконденсатной залежи горизонтальными скважинами мы наблюдаем значительно меньшие показатели депрессии и высокий охват пласта горизонтальным стволом, что, в свою очередь, приводит к выпадению конденсата на значительных расстояниях от

скважины, но в меньшем количестве, чем в призабойной зоне, в случае вертикальных скважин. При этом выпавший конденсат на значительных расстояниях от горизонтальной скважины будет существовать именно в неподвижной форме. В итоге это приводит к общей потере накопленной добычи конденсата.

На рис. 5 представлено изменение конденсатоотдачи (дебит нефти в обозначении вертикальной оси) на период прогноза, равный 40 годам при разных дебитах вертикальных скважин. Из рисунка видно, что при высоких отборах газа (черная линия – 900 тыс. м³/сут) вначале конденсата добывается больше, однако затем происходит интенсивное снижение добычи из-за большого градиента давления, приводящего к большему выпадению конденсата в пласте. Также видно, что при отборах газа 200 тыс. м³/сут (сиреневая линия) дебит конденсата более равномерен, и после 40 лет эксплуатации в этом случае наблюдается максимальное значение конденсатоотдачи, но следует выбирать оптимальное количество отбора исходя из экономической целесообразности разработки залежи.

Для оптимального режима разработки и максимального увеличения конденсатоотдачи на заданном отрезке времени происходит подбор уровня дебита, который бы оправдывал с экономической точки зрения выработку запасов газа при достаточном количестве добытого конденсата. Из рис. 6 видно, что максимальная конденсатоотдача (2100 м³) происходит при дебите газа 300 тыс. м³/сут (синяя линия) на период эксплуатации скважин в 40 лет.

На рис. 7 представлены графики зависимости конденсатоотдачи при различных дебитах горизонтальной скважины. Значение конденсатоотдачи горизонтальной скважины при дебите 2700 тыс. м³/сут соответствует 620 м³/сут, в то время как в случае вертикальной скважины при дебите 900 тыс. м³/сут (при этом общий дебит трех вертикальных скважин будет соответствовать также 2700 тыс. м³/сут)

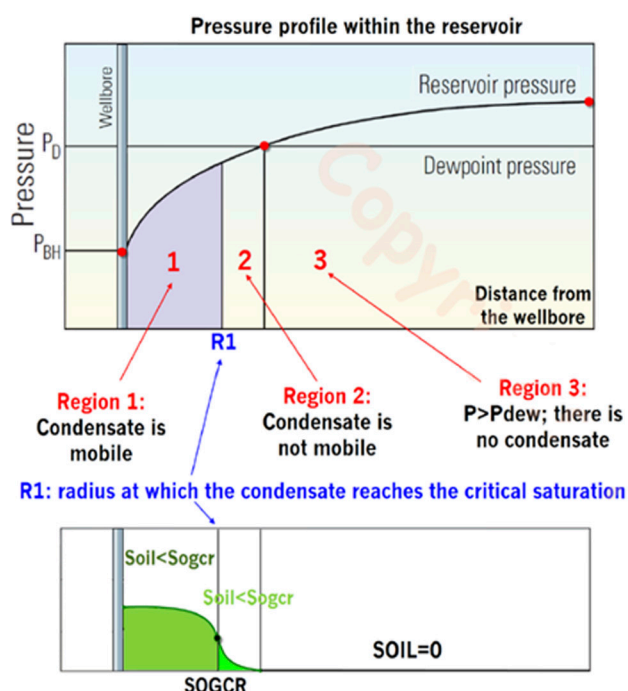


Рис. 4. Схема газоконденсатного потока в пласте [9]

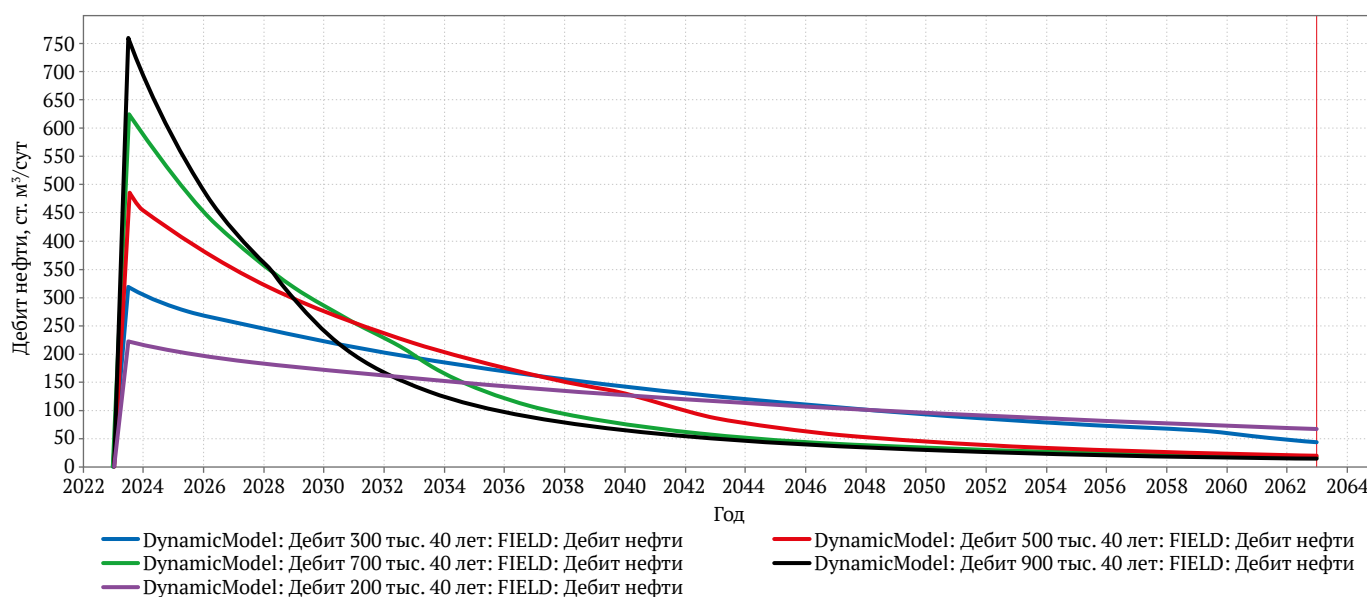


Рис. 5. Зависимость конденсатоотдачи при различных дебитах газа в случае вертикальных скважин (вариант 1)



конденсатоотдача будет соответствовать 760 м³/сут (см. рис. 5). Также на графиках мы можем наблюдать определенные «скачки», что скорее всего связано с образованием «конденсатной банки» в поровом пространстве с последующим достижением критической подвижности выпавшего конденсата. Более низкие значения конденсатоотдачи горизонтальной скважины можно объяснить меньшими значениями перепада давления в горизонтальном стволе, что приводит к более равномерному выпадению конденсата на большем расстоянии от скважины и к более значительным потерям конденсата в пласте в условиях низких фильтрационно-емкостных свойств, так как конденсат при этих условиях будет существовать в неподвижной форме.

На рис. 8 представлены зависимости накопленной добычи конденсата в случае горизонтальной скважины. Максимальная накопленная добыча конденсата наблюдается так же, как и в случае вертикальных скважин, при дебите горизонтального ствола в 900 тыс. м³/сут (соответствует случаю дебита

вертикальной скважины в 300 тыс. м³/сут). Однако накопленная добыча конденсата для горизонтальной скважины в период эксплуатации 40 лет достигает значения 1850 м³, в то время как в случае вертикальных скважин – 2100 м³.

На рис. 9 представлен график дебитов газа для трех вертикальных скважин на различных депрессиях, соответствующих 2, 3, 4, 5 и 6 МПа (при целевом дебите в 700 тыс. м³/сут) с последующим переходом на режим контроля по забойному давлению в 3,5 МПа при невозможности поддержания заданных значений депрессий. Анализ графиков показывает, что чем меньше депрессия, тем стабильнее в течение периода эксплуатации скважины можно выдерживать требуемые дебиты.

На рис. 10 представлены зависимости накопленной добычи конденсата при разных депрессиях вертикальных скважин, соответствующих 2, 3, 4, 5 и 6 МПа (при целевом дебите в 700 тыс. м³/сут). Анализ графиков показывает, что оптимальной депрессией в случае прогноза на 40 лет является 3 МПа.

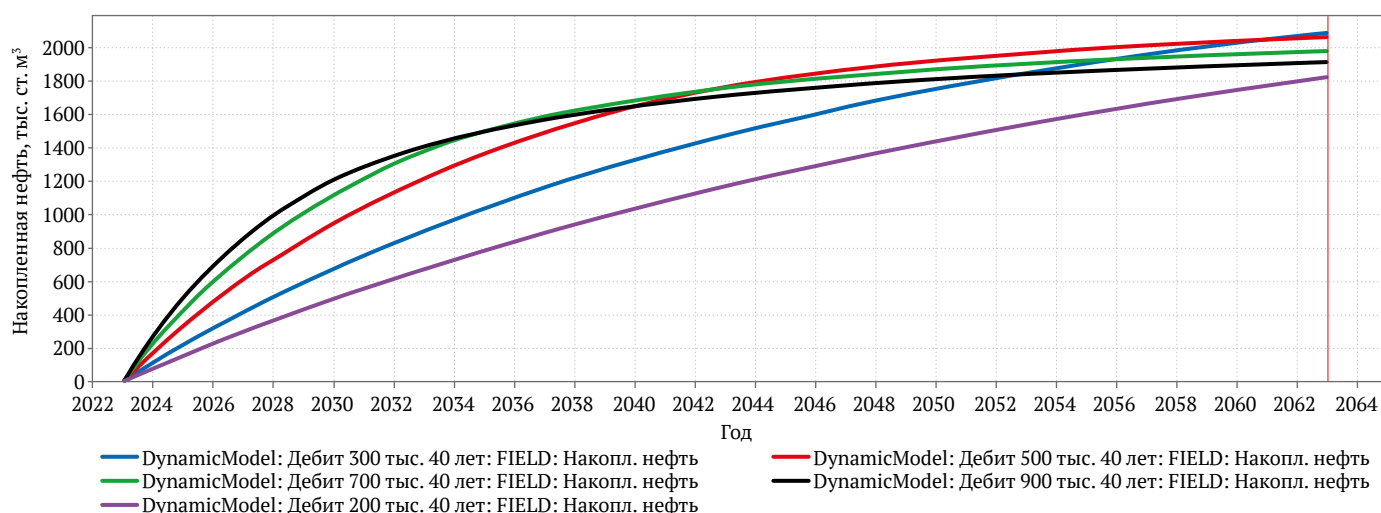


Рис. 6. Накопленная добыча конденсата при различных дебитах в случае вертикальных скважин (вариант 1)

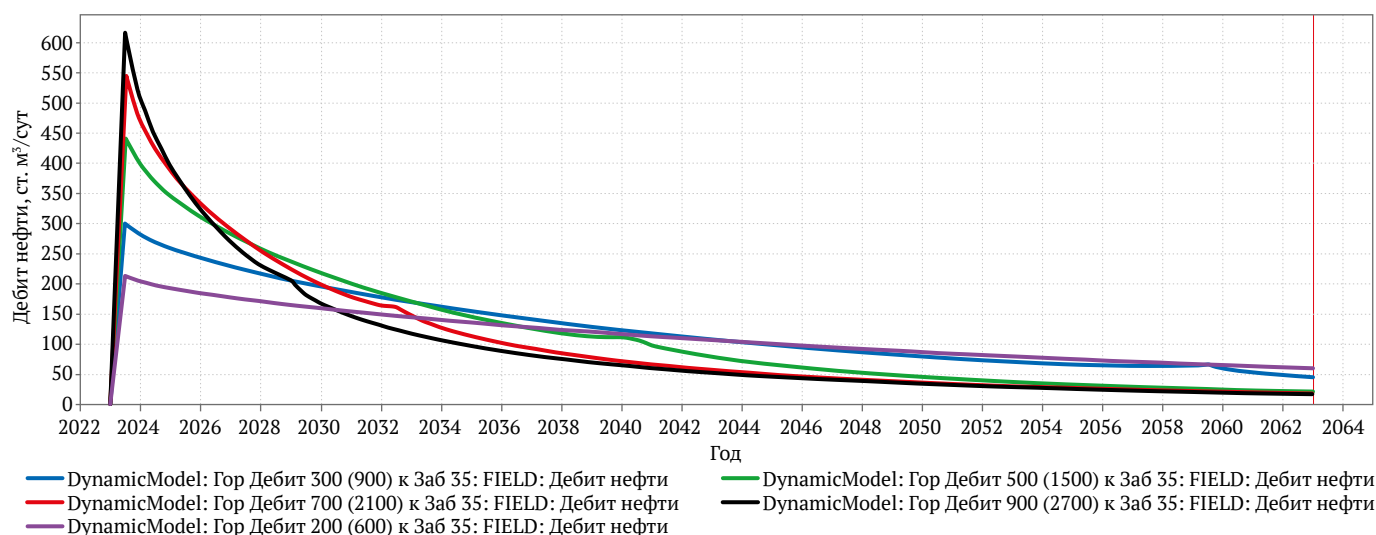


Рис. 7. Зависимость конденсатоотдачи при различных дебитах газа в случае горизонтальной скважины (вариант 2)

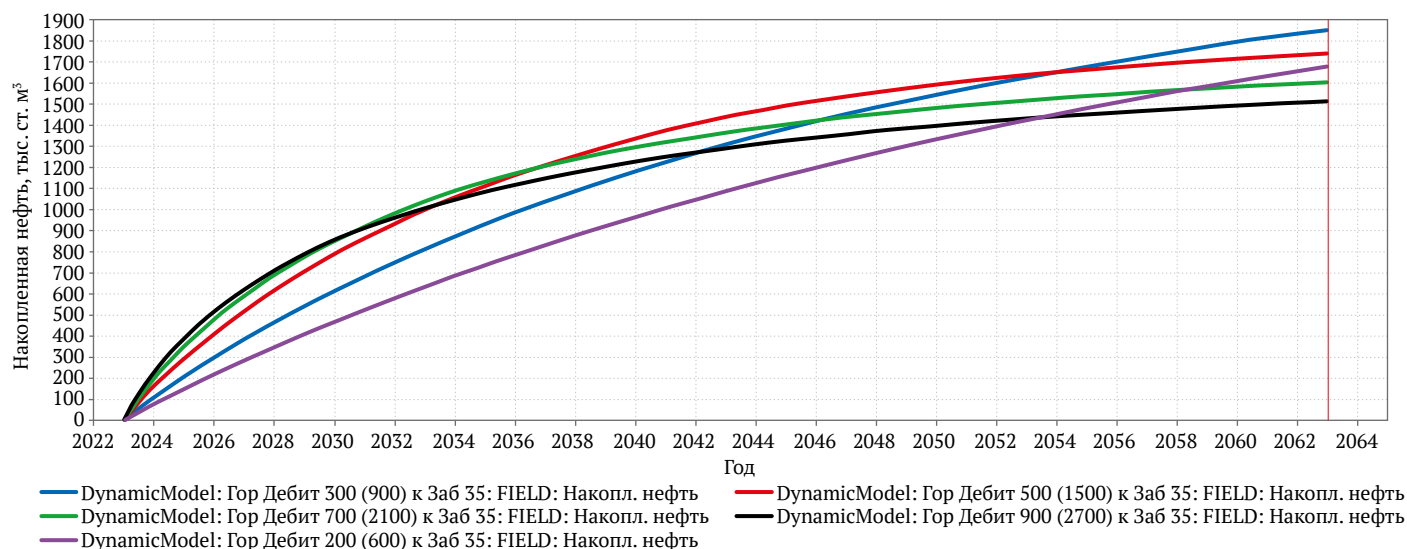


Рис. 8. Накопленная добыча конденсата при различных дебитах в случае горизонтальной скважины (вариант 2)

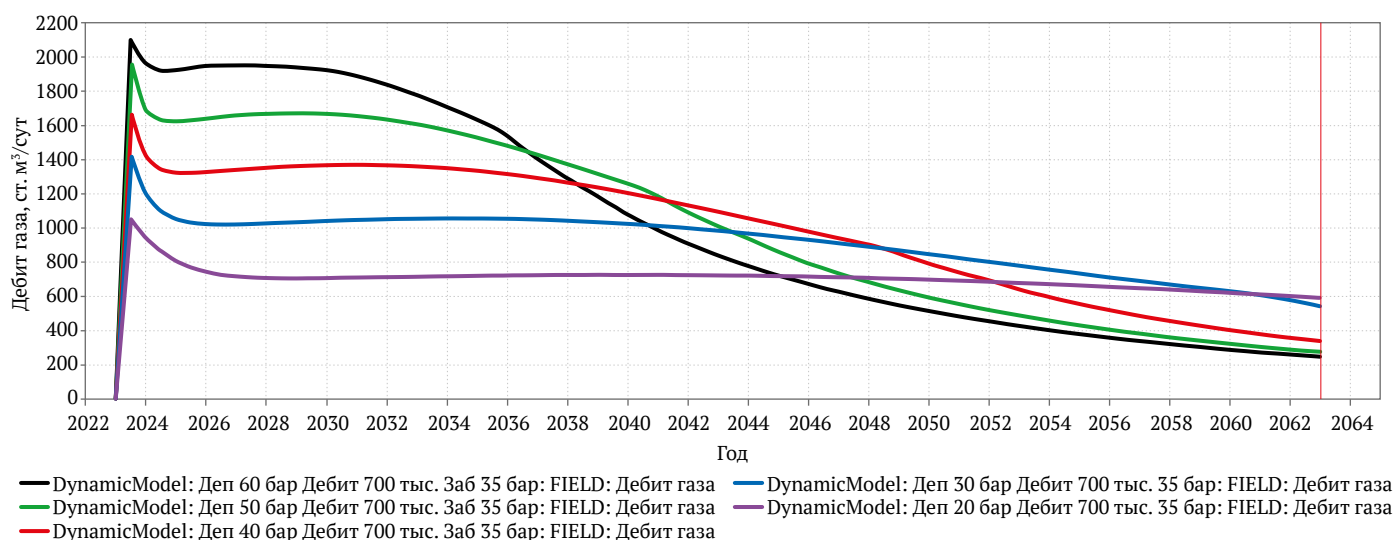


Рис. 9. График изменения дебитов газа для трех вертикальных скважин на различных депрессиях 2, 3, 4, 5 и 6 МПа (вариант 1)

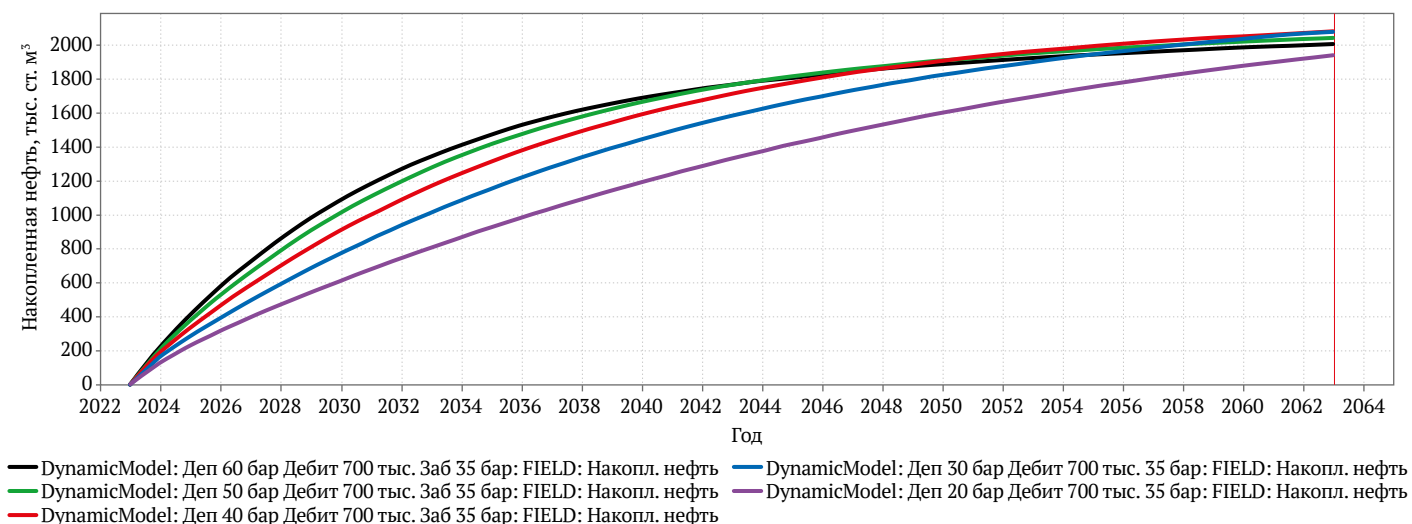


Рис. 10. Накопленная добыча конденсата при разных депрессиях в случае вертикальных скважин (вариант 1)

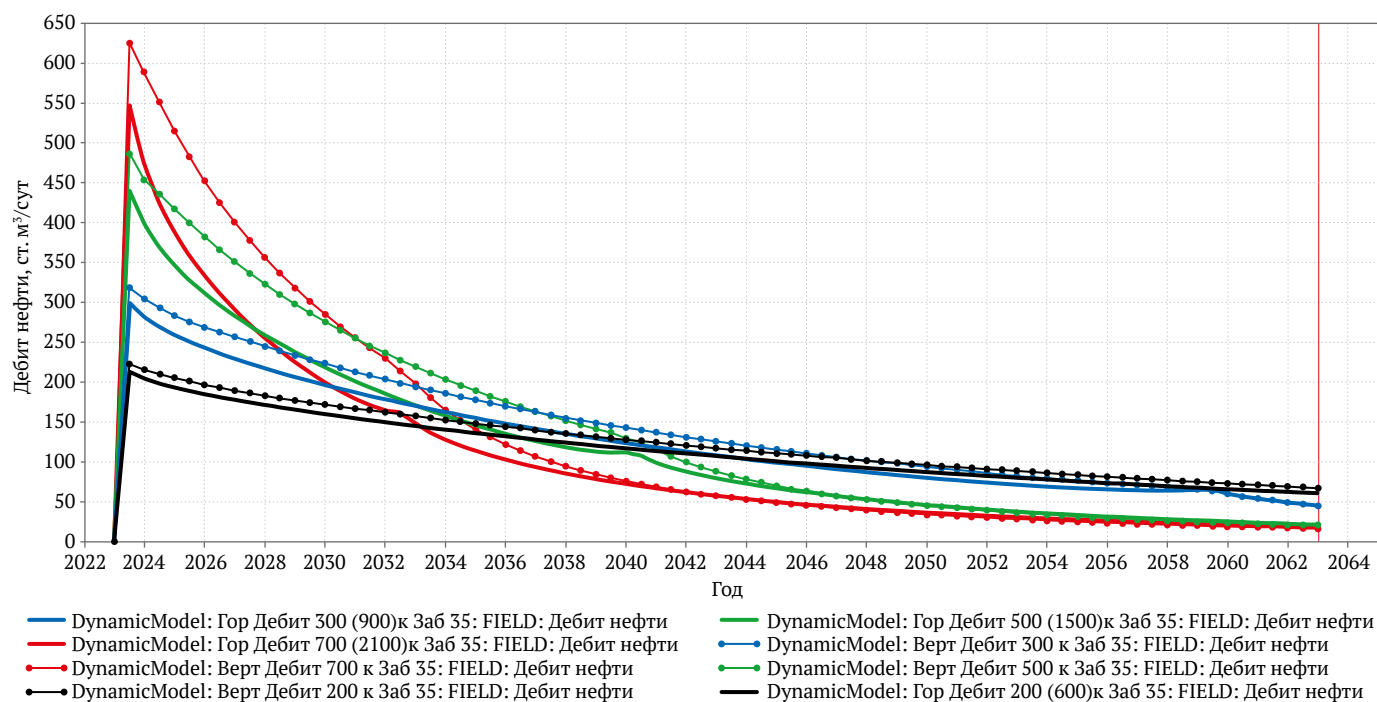


Рис. 11. Сравнение конденсатоотдачи вертикальных и горизонтальных скважин при различных дебитах (вариант 1 и 2)

На рис. 11 представлены сравнительные графики конденсатоотдачи в случае разработки газоконденсатной залежи вертикальными и горизонтальными скважинами. Анализ показывает, что конденсатоотдача горизонтальных скважин при всех случаях будет меньше, чем вертикальных. В случае высоких стартовых дебитов наблюдается сравнение конденсатоотдачи двух вариантов через 20 лет эксплуатации, а в случае низких стартовых дебитов (200 тыс. м³/сут для вертикальных скважин и 600 тыс. м³/сут для горизонтальной скважины) превышение конденсатоотдачи вертикальных скважин по сравнению с горизонтальными наблюдается в течение всего периода разработки.

Выводы

1. С помощью гидродинамического моделирования на основе многокомпонентной (композиционной) модели был проведен сравнительный анализ разработки газоконденсатной залежи вертикальными и горизонтальными скважинами, по результатам которого было выявлено преимущество разработки залежи вертикальными скважинами по сравнению с горизонтальными с точки зрения максимальной конденсатоотдачи пласта. Разработка залежи горизонтальными скважинами позволяет значительно

снижать депрессию на пласт по сравнению с вертикальными, при этом конденсат в пласте выпадает по большему объему, становится неподвижным и препятствует дальнейшей добыче газа, при этом снижая общую добычу конденсата. Увеличение конденсатоотдачи пласта при разработке газоконденсатной залежи вертикальными скважинами по сравнению с горизонтальными скважинами наблюдается при определенных пластовых условиях, соответствующих проделанному в настоящей работе моделированию, а именно: низкие фильтрационно-емкостные свойства пласта и наличие насыщенной газоконденсатной системы (давление начала конденсации соответствует начальному пластовому давлению).

2. Необходим дальнейший более глубокий анализ разработки горизонтальными скважинами газоконденсатной залежи, характеризующейся низкими фильтрационно-емкостными свойствами, с точки зрения других вариантов оптимального расположения горизонтального ствола в пласте в сравнении с другими вариантами расположения вертикальных скважин с целью определения области распространения неподвижного конденсата при разработке, который в итоге оказывает значительное влияние на накопленную добычу конденсата.

Список литературы / References

1. Азиз Х., Сеттари Э. *Математическое моделирование пластовых систем*. Пер. с англ. 2-е изд. Москва-Ижевск: Институт компьютерных технологий; 2004. 416 с. (Ориг. вер.: Aziz Kh., Settari A. *Petroleum reservoir simulation*. London: Applied Science Publishers LTD; 1979.) Aziz Kh., Settari A. *Petroleum reservoir simulation*. London: Applied Science Publishers LTD; 1979. (Trans. ver.: Aziz Kh., Settari A. *Petroleum reservoir simulation*. 2nd ed. Moscow-Izhevsk: Institute of Computer Technology; 2004. 416 p. (In Russ.)



2. Пятибратов П.В. *Гидродинамическое моделирование разработки нефтяных месторождений*. М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина; 2015. 167 с.
Pyatibratov P.V. *Hydrodynamic simulation of oil field development*. Moscow: Russian State University of Oil and Gas named after I.M. Gubkin Publ.; 2015. 167 p. (In Russ.)
3. Томский К.О., Иванова М.С., Ощепков Н.С., Соколов Н.Г. Определение оптимального расположения многозабойной скважины fishbone с учетом особенностей Среднеботуобинского НГКМ при помощи гидродинамического моделирования. *Математические заметки СВФУ*. 2022;29(4):95–112. <https://doi.org/10.25587/SVFU.2023.68.12.008>
Tomskiy K.O., Ivanova M.S., Oshchepkov N.S., Sokolov N.G. Determining the optimal location of a multi-lateral fishbone well, taking into account the peculiarities of the Srednebotuobinskoye oil and gas condensate eld using hydrodynamic modeling. *Mathematical notes of NEFU*. 2022;29(4):95–112. (In Russ.) <https://doi.org/10.25587/SVFU.2023.68.12.008>
4. Каневская Р.Д. *Математическое моделирование гидродинамических процессов разработки месторождений углеводородов*. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований; 2002. 140 с.
Kanevskaya R.D. *Mathematical simulation of hydrodynamic processes of hydrocarbon field development*. Moscow-Izhevsk: Institute for Computer Research Publ.; 2002. 140 p. (In Russ.)
5. Абасов М.Т., Оруджалиев Ф.Г. *Газогидродинамика и разработка газоконденсатных месторождений*. М.: Недра; 1989. 262 с.
Abasov M.T., Orudzhaliyev F.G. *Gas hydrodynamics and development of gas-condensate fields*. Moscow: Nedra Publ.; 1989. 262 p. (In Russ.)
6. Rodriguez F., Sancehs J., Galindo-Nava A. Mechanisms and main parameters affecting nitrogen distribution in the gas cap of the supergiant akal reservoir in the Cantarell Complex. In: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Houston, Texas, September 2004. <https://doi.org/10.2118/90288-MS>
7. Holditch S.A., Spivey J., Wang J.Y. Case history of a tight and abnormally pressured gas condensate reservoir. In: *SPE California Regional Meeting*. California, USA, 1985.
8. Afidick D., Kaczorowski N.J., Bette S. Production performance of retrograde gas reservoir: A case study of Arun field. In: *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference*. 1994.
9. Fan L., Harris B.W., Jamaluddin A., et al. Understanding gascondensate reservoirs. *Oilfield Review*. 2005;17(4):14–27.
10. Ursin J.R. Fluid flow in gas condensate reservoirs: The interplay of forces and their relative strengths. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2004;(4):253–267. <https://doi.org/10.1016/j.profnurs.2003.09.005>
11. Moses P.L., Wilson K. Phase equilibrium considerations in using nitrogen for improved recovery from retrograde condensate reservoirs. *Journal of Petroleum Technology*. 1981;33(02):256–262. <https://doi.org/10.2118/7493-PA>
12. Бергенов С.У., Чернова О.С., Зипир М.Г. Методика оценки ожидаемых запускных дебитов горизонтальных скважин на примере газоконденсатных месторождений. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020;331(3):207–212. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/3/2563>
Bergenov S.U., Chernova O.S., Zipir M.G. Methodology for assessing the expected starting flow rates of horizontal wells in gas and gas condensate fields. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020;331(3):207–212. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/3/2563>
13. Алиев З.С., Мараков Д.А. Влияние переходной зоны на достоверность запасов газа и на производительность скважин. *Нефть и газ: опыт и инновации*. 2017;1(1):3–12.
Aliiev Z.S., Marakov D.A. Transition zone impact on reliability of gas reserves and well productivity. *Petroleum and Gas: Experiens and Innovation*. 2017;1(1):3–12. (In Russ.)
14. Fevang O., Whitson C.H. Modeling gas-condensate well deliverability. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*. 1996;11(4):221–222. <https://doi.org/10.2118/30714-PA>
15. Шандрыгин А.Н., Казанцев М.А., Морев М.В., Бадалов Э.З. Методология определения продуктивности горизонтальных скважин по данным ГДИ разведочных скважин при гидродинамическом моделировании газоконденсатных месторождений. *Наука и техника в газовой промышленности*. 2021;(2):52–59.
Shandrygin A.N., Kazantsev M.A., Morev M.V., Badalov E.Z. Methodology for determining the productivity of horizontal wells based on the data of hydrodynamic modeling and exploration wells in gas condensate fields. *Science & Technology in the Gas Industry*. 2021;(2):52–59. (In Russ.)
16. Sayed M.A., Muntasheri G.A. Mitigation of the effects of condensate banking: a critical review. *SPE Production & Operations*. 2016;31(02):85–102. <https://doi.org/10.2118/168153-PA>
17. Николаев О.В., Шандрыгин А.Н., Байбурун Р.А. и др. Оптимизация конструкции и режимов эксплуатации горизонтальных скважин на газоконденсатных месторождениях со сложными геологическими и климатическими условиями. *Наука и техника в газовой промышленности*. 2021;(2):74–81.
Nikolaev O.V., Shandrygin A.N., Baiburin R.A. et al. Optimization of the design and operation modes of horizontal holes in gas-condensate fields with complicated geological and climatic conditions. *Nauka i Tekhnika v Gazovoy Promyshlennosti*. 2021;(2):74–81. (In Russ.)



18. Hale P., Lokhandwala K. Advances in membrane materials provide new gas processing solutions. In: *Proceedings of the Laurance Reid Gas Conditioning Conference*. Norman, Oklahoma, USA, 2004. Pp. 165–182.
19. Томский К. О., Никитин Е. Д., Иванова М. С. Анализ эффективности применения горизонтальных скважин для выработки запасов залежи газоконденсатного месторождения с низкими фильтрационно-емкостными свойствами. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2023;(9):172–181.
Tomskiy K. O., Nikitin E. D., Ivanova M. S. Analysis of the effectiveness of applying horizontal wells for the development of reserves of a gas condensate field with low filtration and capacitance properties. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2023;(9):172–181. (In Russ.)
20. Брусиловский А. И. *Фазовые превращения при разработке месторождений нефти и газа*. М.: Грааль; 2002. 575 с.
Brusilovsky A. I. *Phase transformations in the development of oil and gas fields*. Moscow: Graal Publ.; 2002. 575 p. (In Russ.)
21. Redlich O., Kwong J. N. S. On the thermodynamics of solutions: V: An equation of state. Fugacities of gaseous solutions. *Chemical Reviews*. 1949;44(1):233–244. <https://doi.org/10.1021/cr60137a013>

Информация об авторах

Кирилл Олегович Томский – кандидат технических наук, заведующий кафедрой недропользования, Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-7612-5393](https://orcid.org/0000-0001-7612-5393), Scopus ID [58080759000](https://orcid.org/58080759000); e-mail kirilltom@mail.ru

Мария Сергеевна Иванова – кандидат химических наук, доцент кафедры недропользования, Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-3272-9253](https://orcid.org/0000-0003-3272-9253), Scopus ID [7202135803](https://orcid.org/7202135803); e-mail ims.06@mail.ru

Егор Дмитриевич Никитин – аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0009-0002-8211-5479](https://orcid.org/0009-0002-8211-5479); e-mail egornd1998@gmail.com

Любовь А. Рудых – студент базовой кафедры ООО «Таас-Юрях Нефтегазодобыча» ПАО НК «Роснефть», Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета в г. Мирном, г. Мирный, Российская Федерация; ORCID [0009-0006-5231-5276](https://orcid.org/0009-0006-5231-5276); e-mail lubovrudyh93@gmail.com

Information about the authors

Kirill O. Tomskiy – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Subsoil Use, Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation; ORCID [0000-0001-7612-5393](https://orcid.org/0000-0001-7612-5393), Scopus ID [58080759000](https://orcid.org/58080759000); e-mail kirilltom@mail.ru

Mariya S. Ivanova – Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor of the Department of Subsoil Use, Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation; ORCID [0000-0003-3272-9253](https://orcid.org/0000-0003-3272-9253), Scopus ID [7202135803](https://orcid.org/7202135803); e-mail ims.06@mail.ru

Egor D. Nikitin – PhD-Student of the Department of Information and Communication Technologies, University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; ORCID [0009-0002-8211-5479](https://orcid.org/0009-0002-8211-5479); e-mail egornd1998@gmail.com

Lyubov A. Rudykh – Student of the Basic Department of Taas-Yuryakh Neftegazodobycha LLC, PJSC NK Rosneft, Polytechnic Institute (branch) Northeastern Federal University in Mirny, Mirny, Russian Federation; ORCID [0009-0006-5231-5276](https://orcid.org/0009-0006-5231-5276); e-mail lubovrudyh93@gmail.com

Поступила в редакцию 26.10.2023
Поступила после рецензирования 28.05.2024
Принята к публикации 07.08.2024

Received 26.10.2023
Revised 28.05.2024
Accepted 07.08.2024



ОБОГАЩЕНИЕ, ПЕРЕРАБОТКА МИНЕРАЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-03-229>

УДК 622.7

**«Невидимые» благородные металлы
в углеродистых породах и продуктах обогащения:
возможность выявления и укрупнения**Т.Н. Александрова  , А.В. Афанасова  , В.А. Абурова   

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

 aburovaleria@gmail.com**Аннотация**

По причине снижения качества поступающего на переработку сырья, вовлечения упорных руд, упорность которых обусловлена наличием сорбционно-активного по отношению к растворенным благородным металлам органического углеродистого вещества и вкрапленностью низкоразмерных благородных металлов в минералы-носители, актуальным направлением является разработка новых технологических решений с применением энергетических методов воздействия с целью снижения потерь ценных компонентов с хвостами обогащения. Обработка электромагнитным излучением сверхвысокой частоты обладает рядом преимуществ, среди которых отмечаются быстрый и селективный нагрев за счет различий в способности поглощать минералами данное излучение. В качестве объекта исследования приняты углеродсодержащие материалы, представленные углеродистым флотационным концентратом и модельными навесками активированного угля с адсорбированным серебром. На примере модельных навесок обоснована необходимость использования магнетита для достижения укрупнения низкоразмерного серебра при сверхвысокочастотной обработке. Подтверждено образование активных центров локального нагрева в местах добавления магнетита в процессе обработки. Обосновано необходимое содержание магнетита для укрупнения низкоразмерного серебра до сферических агрегатов, средний размер которых составил 20–40 мкм, равное 10 %. Получено укрупнение частиц благородных металлов в обработанных углеродистых концентратах до размеров 20–50 мкм, содержащих серебро и золото, при добавлении обоснованного количества магнетита. Укрупненные частицы благородных металлов возможно извлекать с применением традиционных методов обогащения.

Ключевые слова

СВЧ обработка, углеродистый концентрат, золотосодержащие руды, модельные навески, флотация, серебро, магнетит

Благодарности

Работа выполнена в рамках гранта РНФ (проект № 23-47-00109).

Для цитирования

Aleksandrova T.N., Afanasova A.V., Aburova V.A. "Invisible" noble metals in carbonaceous rocks and beneficiation products: feasibility of detection and coarsening. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):231–242. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-03-229>

BENEFICIATION AND PROCESSING OF NATURAL AND TECHNOGENIC RAW MATERIALS

Research paper

**"Invisible" noble metals in carbonaceous rocks and beneficiation products:
feasibility of detection and coarsening**T.N. Aleksandrova  , A. V. Afanasova  , V. A. Aburova   

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

 aburovaleria@gmail.com**Abstract**

The decrease in the quality of raw materials coming for processing requires involvement of refractory ores in processing, the refractoriness of which is caused by the presence of organic carbonaceous matter sorption-active in relation to dissolved noble metals and impregnation of fine noble metals in mineral-carriers. In this connection, the actual research line is the development of new technological solutions with the use of energy methods of action in order to reduce the losses of valuable components in beneficiation tailings. Treatment



with ultra-high frequency electromagnetic radiation has a number of advantages, including rapid and selective heating due to the differences in the ability of minerals to absorb this radiation. Carbon-containing materials represented by carbonaceous flotation concentrate and model samples of activated carbon with adsorbed silver were taken as the research subjects. Using the model samples as an example, the necessity of using magnetite to achieve coarsening fine silver particles during ultra-high frequency treatment was substantiated. The formation of active centers of local heating during the treatment in the points of magnetite addition was confirmed. The necessary content of magnetite of 10% for coarsening fine silver to spherical aggregates, the average size of which was 20–40 microns, was substantiated. Coarsening noble metal particles to sizes of 20–50 microns in treated carbonaceous concentrates containing silver and gold was achieved, when the substantiated amount of magnetite was added. Coarsened particles (aggregates) of noble metals can be recovered using traditional beneficiation methods.

Keywords

microwave treatment, carbonaceous concentrate, gold-bearing ores, model samples, flotation, silver, magnetite

Acknowledgments

The study was carried out within the framework of a grant from the Russian Science Foundation (Project No. 23-47-00109).

For citation

Aleksandrova T.N., Afanasova A.V., Aburova V.A. “Invisible” noble metals in carbonaceous rocks and beneficiation products: feasibility of detection and coarsening. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):231–242. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-03-229>

Введение

Развитие технологий переработки стратегических видов сырья в связи с истощением минерально-сырьевой базы необходимо для поддержания мировой экономики на текущем уровне. Снижение качества, поступающего в переработку золото- и серебросодержащего сырья, вовлечение бедных и упорных руд приводит к актуализации научных исследований, направленных на повышение извлечения ценных компонентов в концентраты [1]. Как показал анализ существующих исследований, одними из актуальных направлений в области обогащения полезных ископаемых являются повышение эффективности дезинтеграции минерального сырья [2, 3], применение технологии машинного зрения на различных этапах переработки, синтез новых флотационных реагентов [4–6] и разработка новых реагентных режимов [7–9].

Упорность золотосодержащих руд может быть обусловлена как наличием сорбционно-активных по отношению к растворенному золоту веществ, так и включениями низкоразмерных благородных металлов в минералы-носители, преимущественно в такие, как пирит, арсенопирит, галенит и т.д. Руды, в которых присутствуют два этих признака, относятся к рудам двойной упорности. «Невидимым» золотом называют субмикроскопическое золото, размер которого составляет 1–100 нм, оно не определяется с применением оптический или электронной микроскопии [10]. Наличие в рудах «невидимых» форм золота и серебра усложняет выбор технологических схем и, соответственно, переработку данных руд, что обуславливает необходимость разработки новых и совершенствования уже существующих технологических решений.

Углеродистое вещество, содержащееся в рудах, относящихся к категории двойной упорности, загрязняет получаемые концентраты и приводит к значительным потерям ценных компонентов на стадии металлургической переработки. Актуальной задачей существующих исследований является вовлечение

в переработку углеродистых продуктов, отправляемых на большинстве фабрик на хвостохранилище, с целью снижения потерь ценных компонентов, таких как золото и серебро [11–13].

Помимо самородной формы, серебро в рудах может быть представлено дисперсными включениями в минералы-носители как в виде металлического, так и химически связанного серебра. Под химически связанным серебром подразумеваются различные сульфиды серебра, например, Ag_2S . Наличие низкоразмерных форм серебра, ассоциированных с сульфидными минералами, так же как и в случае с золотом, приводит к возникновению трудностей, связанных с их извлечением на стадии цианирования [14]. Для решения данной проблемы требуется разрушение матрицы минералов-носителей с целью осуществления контакта реагентов с благородным металлом для перевода его в жидкую фазу.

На данный момент существует большое количество исследований, направленных на поиск технологических решений для переработки упорного сырья [15–17]. Для руд двойной упорности необходимо применение предварительной обработки, направленной на снижение упорности золотосодержащих руд. Чаще всего в качестве предварительной обработки применяют обжиг, хлорирование, окисление под давлением, биовыщелачивание, технологию Альбион. Однако, помимо традиционных методов, широкое распространение получили исследования возможности применения энергетических методов воздействия [18, 19]. СВЧ-обработка является одним из перспективных методов, к преимуществам которого относятся быстрый и селективный нагрев [20–22]. Селективность нагрева минералов обусловлена различием в скорости их нагрева, которая, в свою очередь, связана с удельной теплоемкостью, удельной теплопроводностью и относительной диэлектрической проницаемостью. Существующие исследования с применением СВЧ



обработки направлены на повышение эффективности дезинтеграции минерального сырья [23–25], изучение возможности применения микроволн для сортировки руд [26], снижение содержания вредных примесей в рудах [27], изучение влияния на поверхностные свойства и флотуемость минералов [28], вовлечение в переработку цианистых [29] и сульфидных [30] хвостов. Температура плавления «невидимых» благородных металлов значительно ниже температуры плавления видимых структур, что предопределяет возможность для их укрупнения в процессе энергетических воздействий. Так, например, для Au температура плавления кластера диаметром 1,6 нм составляет 257,85 °C [33], для кластера диаметром 1,9 нм – 318,85 °C [34]. Для Ag температура плавления кластера диаметром 4 нм составляет 449,85 °C, для кластера диаметром 5 нм – 509,85 °C [35]. Углеродистые продукты флотации, как правило, содержат незначительное количество рудных минералов, что требует достаточно длительного времени для СВЧ обработки с целью укрупнения частиц, в связи с чем добавление магнетита в процессе обработки позволяет создать центры локального нагрева. В табл. 1 систематизированы данные зависимости достигнутой максимальной температуры нагрева от времени обработки для сульфидных минералов-концентраторов золота и продуктов их деструкции после обжига.

Анализ существующих исследований подтверждает факт того, что магнетит более активен по отношению к электромагнитному излучению сверхвысокой частоты и в сравнении с другими минералами достигает значительно больших температур нагрева. Низкая температура плавления нанокластеров серебра подтверждает перспективность исследования возможности их укрупнения, поскольку она ниже нагрева магнетита в процессе обработки.

Таким образом, цель данной работы заключалась в установлении механизма укрупнения низкоразмерного серебра при СВЧ обработке с добавлением магнетита на модельных навесках и обосновании необходимого содержания магнетита для подтверждения возможности укрупнения серебра в процессе СВЧ обработки проб углеродистого флотационного концентрата для снижения потерь ценных компонентов с хвостами обогащения.

Таблица 1

Сводные данные с зависимостью максимальной температуры СВЧ нагрева от времени обработки

№	Минерал	Время обработки, мин	Максимальная температура, °C	Ссылка
1	Магнетит	2,75	1258	[31]
2	Пирит	6,75	1019	[31]
3	Пирротин	1,75	886	[31]
4	Арсенопирит	1,0	723	[31]
5	Гематит	7,0	182	[31]

Материалы и методы

1. Характеристика объектов исследования

В качестве объектов исследования выбраны углеродсодержащие материалы:

1) углеродистый флотационный концентрат (полученный после проведения углеродистой флотации из упорной сульфидной золотосодержащей руды);

2) модельные навески активированного угля (после адсорбции серебра).

Источником серебра в модельной навеске являлось сусальное серебро, процентное содержание Ag в котором составляет 99,9%. Подготовка модельных навесок включала в себя: измельчение активированного угля, подготовку выщелачивающего раствора, перевод в жидкую фазу сусального серебра в течение двух суток, последующее его контактирование с активированным углем в течение трех суток. Выщелачивающий реагент представляет собой смесь йодного комплекса, аминокислот, хлорида натрия, мочевины, хлористого аммония и карбоната натрия. После контактирования благородного металла с активированным углем проводилась фильтрация и сушка кека для последующей СВЧ обработки.

Для исходной углеродистой золотосодержащей руды характерно наличие низкоразмерных включений золота и незначительного количества серебра в минералы-концентраторы, такие как пирит и арсенопирит, а также сорбционно-активного по отношению к растворенному золоту органического углеродистого вещества. Основным ценным компонентом является золото, содержание которого в исходной руде составляет $5,99 \pm 0,29$ г/т, в качестве попутного компонента выступает серебро, содержание которого составляет $0,29 \pm 0,1$ г/т.

2. Опыты флотационного обогащения

Выделение углеродистого флотационного концентрата из упорной золотосодержащей руды проводилось с использованием пневмомеханической флотационной машины Flotation Bench Test Machine фирмы Laarmann с объемом камеры равным 1,5 л. Исходная руда подвергалась измельчению до крупности 60 % класса –71 мкм, после чего проводилась углеродистая флотация с добавлением в качестве пенообразователя оксала, расход которого составлял 85 г/т. Результаты изучения полученных продуктов флотации представлены в табл. 2.

Полученный углеродистый флотационный концентрат после сушки подвергался СВЧ обработке, хвосты углеродистой флотации при этом поступали на доизмельчение и последующую сульфидную флотацию.

3. СВЧ обработка

СВЧ обработка углеродсодержащих материалов без и с добавлением различного содержания магнетита (3, 5, 10, 15 % по массе навески) осуществлялась с применением микроволновой печи фирмы Sineo UWave-2000, диапазон возможного установления мощности которой составляет 100–1000 Вт. Крупность добавляемого магнетита составляла –50 мкм.

Таблица 2

Результаты исследования продуктов флотации упорной золотосодержащей руды

Наименование продукта	Выход, %	Содержание, % [*г/т]				Извлечение, %			
		Au*	Ag*	Cорг	Sобщ	Au	Ag	Cорг	Sобщ
Углеродистый флотационный концентрат	2,42	2,91	0,12	27,14	0,95	1,19	0,94	40,54	1,36
Хвосты углеродистой флотации	97,58	5,99	0,31	0,99	1,71	98,81	99,06	59,46	98,64
Исходная руда	100,00	5,92	0,31	1,62	1,69	100,00	100,00	100,00	100,00

4. Сканирующая электронная микроскопия

С целью подтверждения укрупнения низкоразмерного серебра в модельных навесках и углеродистом флотационном концентрате при СВЧ обработке с добавлением магнетита для создания активных центров локального нагрева изучение образцов до и после обработки осуществлялось с применением сканирующего электронного микроскопа Vega 3 LMN, совмещенного с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа Oxford Instruments INCA Energy 250/X-max 20. Исследование укрупнения низкоразмерного серебра проводилось с определением размеров не менее чем 200 частиц для каждой из полученных проб. Науглероживание образцов производилось с применением напылительной установки Q150R E производства Quorum Technologies Ltd.

5. Температура микроволнового нагрева

Установление достигнутой температуры СВЧ нагрева проб осуществлялось при помощи лазерного пирометра FinePower DIN21H. Диапазон температур измерения составляет от -50 до 1100°C с погрешностью $\pm 2\%$.

Результаты и обсуждение

1. Обработка серебросодержащих модельных навесок без добавления магнетита

С целью подтверждения возможности укрупнения низкоразмерного серебра в процессе СВЧ обработки для сравнения проведено исследование исходной модельной навески с адсорбированным серебром до обработки. На рис. 1 представлены результаты исследования пробы до проведения обработки с применением сканирующей электронной микроскопии. В табл. 3 показаны результаты исследования элементного состава для спектра, указанного на рис. 1.

На основании полученных результатов выявлено отсутствие видимого серебра, что подтверждается результатами исследования элементного состава, что позволяет подтвердить его «невидимость».

С целью подтверждения необходимости добавления магнетита в серебросодержащие модельные навески при СВЧ обработке для укрупнения низкоразмерного серебра проведены исследования на модельных навесках без его добавления. На рис. 2 представлены результаты исследования обработанных проб без добавления магнетита с применением сканирующей электронной микроскопии. Результаты исследования элементного состава для спектров в изучаемых пробах показаны в табл. 4.

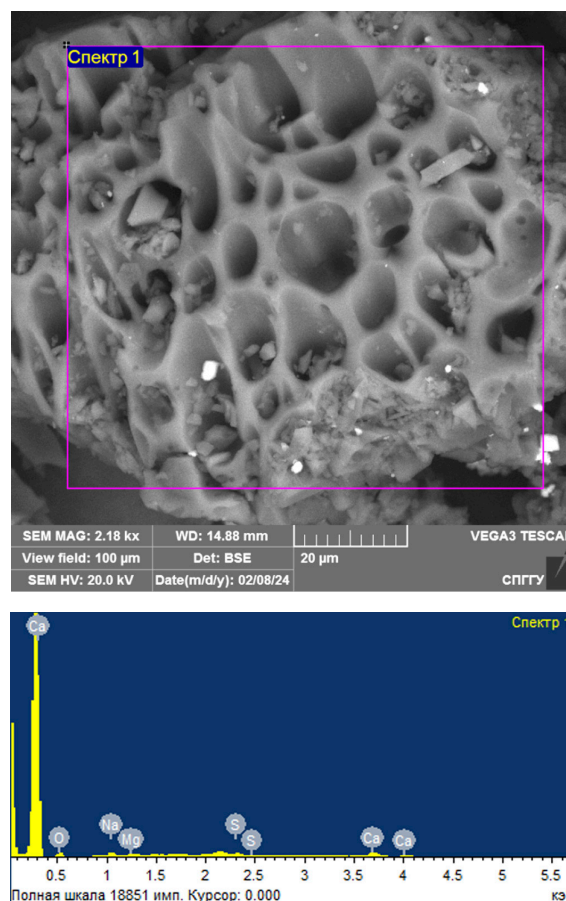


Рис. 1. Результаты исследования исходной модельной навески до СВЧ обработки с применением сканирующей электронной микроскопии

Таблица 3

Результаты исследования элементного состава для спектров, представленных на рис. 1

Номер спектра	Содержание, вес. %				
	O	Na	Mg	S	Ca
Спектр 1	73,67	8,21	2,74	2,56	12,82

Таблица 4

Результаты исследования элементного состава для спектров, представленных на рис. 2

Номер спектра	Содержание, вес. %					
	O	Na	Mg	S	Ca	Ag
Спектр 1	49,67	1,50	1,42	0,38	45,78	1,25
Спектр 2	76,10	–	–	–	16,16	7,74

Анализ полученных данных позволил подтвердить возможность укрупнения низкоразмерных частиц серебра при СВЧ обработке без добавления магнетита до среднего размера, равного 5–10 мкм. Несмотря на то что укрупнение достигается при обработке без добавления магнетита, достигнутая крупность

в результате проведенных исследований не позволяет извлечь укрупненные агрегаты традиционными методами обогащения, что предопределяет необходимость изучения влияния добавления различного содержания магнетита в исследуемые модельные навески на укрупнение частиц низкоразмерного серебра.

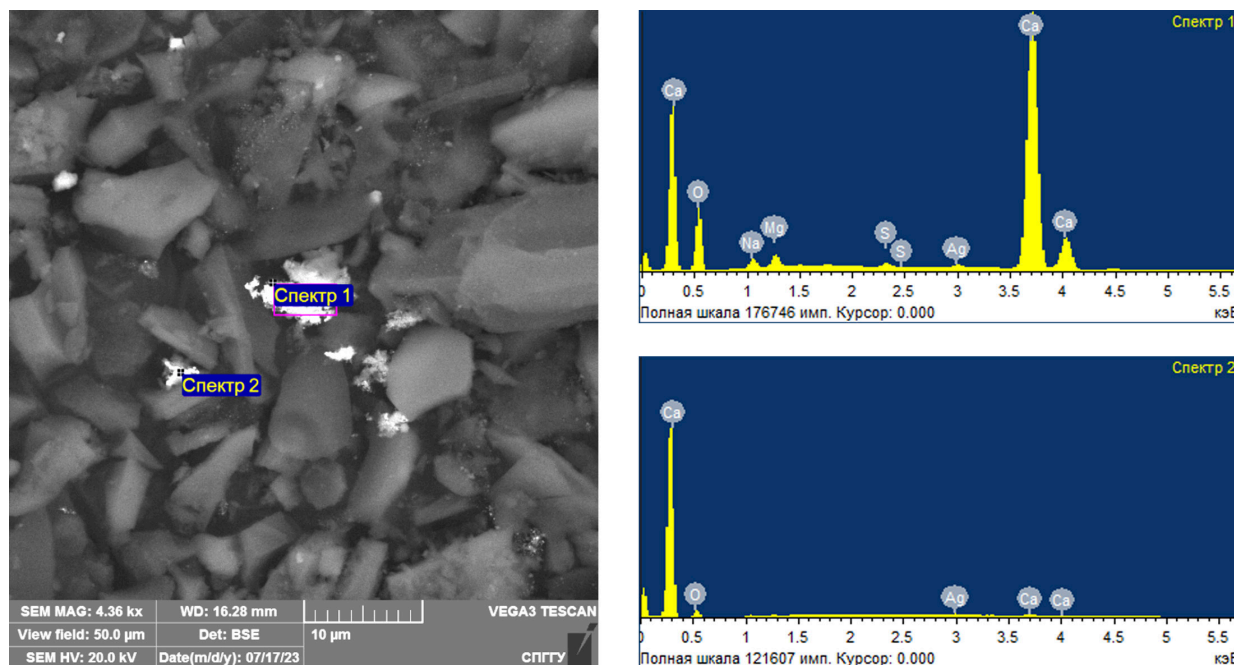


Рис. 2. Результаты исследования модельных навесок с укрупненным серебром после СВЧ обработки без добавления магнетита с применением сканирующей электронной микроскопии

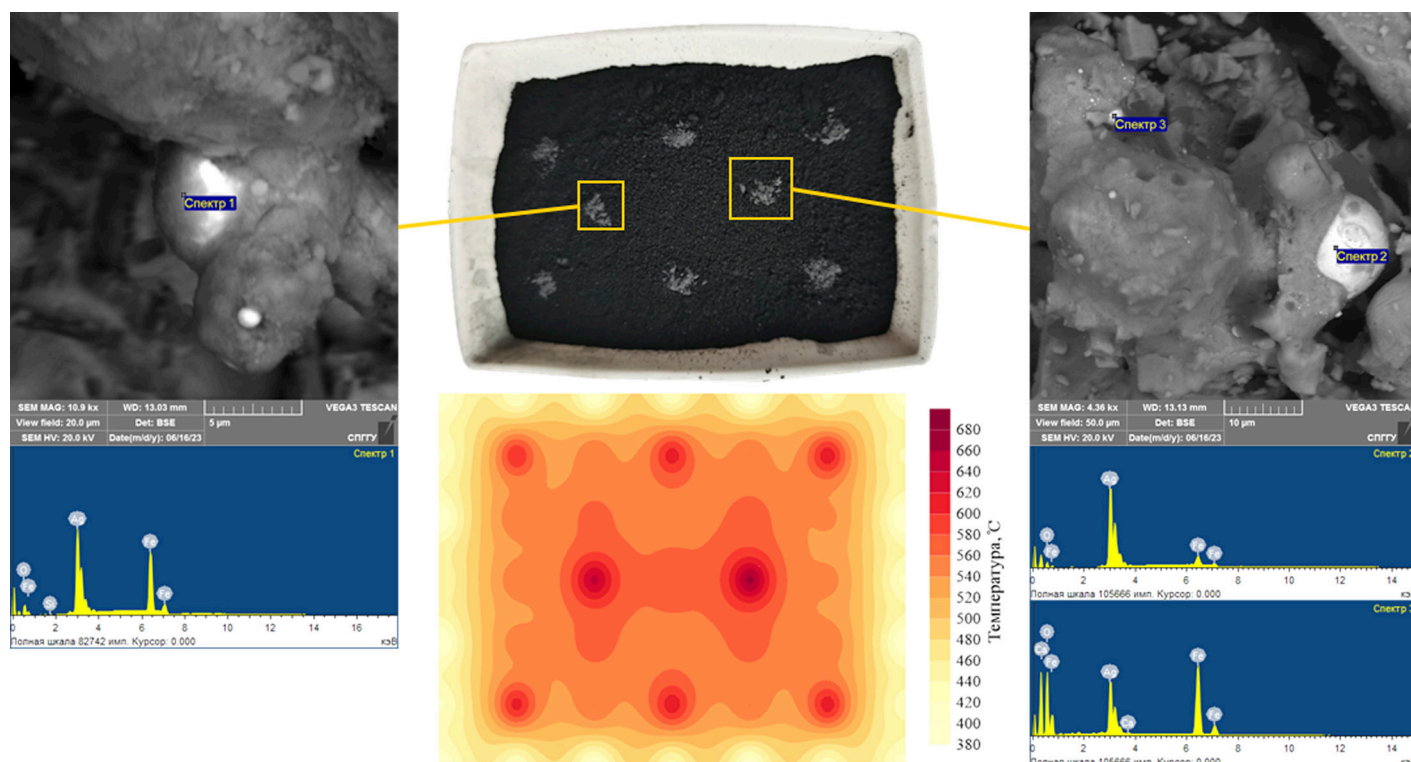


Рис. 3. Температурное картирование на примере серебросодержащей модельной навески при СВЧ обработке с добавлением 10 % магнетита с результатами исследования проб в выделенных местах отбора с применением сканирующей электронной микроскопии (серое – магнетит; черное – модельная навеска)

2. Обработка серебросодержащих модельных навесок с добавлением магнетита

Исследования, направленные на установление необходимого содержания магнетита для достижения наибольшего укрупнения низкоразмерного серебра при СВЧ обработке, проведены на серебросодержащих модельных навесках. Значения содержаний магнетита выбраны равными 3, 5, 10 и 15 %. Для подтверждения создания активных центров локального нагрева при СВЧ обработке модельных навесок с добавлением магнетита установлены температуры нагрева по всей площади обрабатываемых проб с применением лазерного пирометра. На рис. 3 представлено температурное картирование на примере СВЧ обработки серебросодержащей модельной навески с 10 % магнетита с примерами точек отбора образцов для исследования с применением сканирующей электронной микроскопии. Температура СВЧ нагрева замерялась непосредственно после обработки. Результаты исследования элементного состава для показанных на рис. 3 спектров представлены в табл. 5.

Интерпретация полученных данных позволяет подтвердить возникновение активных центров локального нагрева при добавлении магнетита в модельные навески в процессе СВЧ обработки. На рис. 3

отчетливо видны температурные пики в местах добавления магнетита, которые достигают порядка 600 °С и выше. Температура нагрева самой модельной навески при этом 540–560 °С. Наличие магнетита подтверждается результатами исследования элементного состава.

Обработанные серебросодержащие модельные навески с добавлением магнетита изучены при помощи сканирующего электронного микроскопа. На рис. 4 и 5 представлены результаты исследования данных навесок с содержанием магнетита 3, 5, 10 и 15 % соответственно. Результаты исследования элементного состава для спектров, указанных на рис. 4 и 5, показаны в табл. 6.

Таблица 5

Результаты исследования элементного состава для спектров, представленных на рис. 3

Номер спектра	Содержание, вес. %				
	O	Si	Ca	Fe	Ag
Спектр 1	10,17	0,12	–	42,22	47,48
Спектр 2	11,69	0,11	–	11,51	76,69
Спектр 3	35,06	–	0,24	41,40	23,30

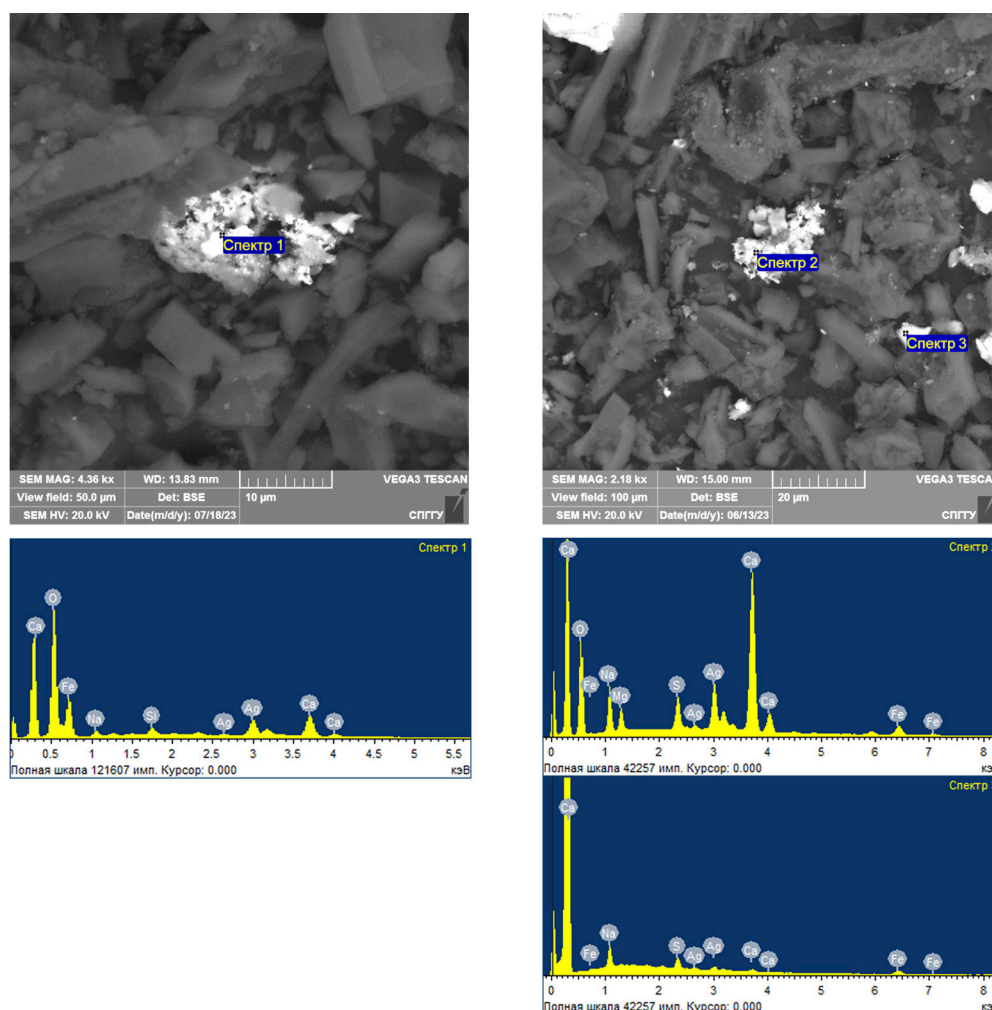


Рис. 4. Результаты исследования модельных навесок с укрупненным серебром после СВЧ обработки с добавлением 3 (слева) и 5 (справа) % магнетита с применением сканирующей электронной микроскопии

Интерпретация полученных данных позволяет подтвердить укрупнение низкоразмерного серебра при добавлении магнетита после СВЧ обработки до размеров, превышающих крупность частиц, образовавшихся в пробах без магнетита, а также увеличение содержания серебра в укрупненных агрегатах. Однако, стоит отметить, что при содержании магнетита, равном 10 %, в сравнении с укрупненным золотом, представленным ранее в работе [36], в серебросодержащих модельных навесках обнаружены частицы серебра сферической формы, средний размер которых достигает 20–40 мкм. Это объясняется тем, что температура плавления серебра значительно ниже, чем у золота.

Полученные результаты средних и максимальных размеров укрупнения благородного металла в за-

висимости от содержания магнетита представлены в табл. 7. Также в табл. 7 представлена степень укрупнения, полученная в результате отношения предполагаемой крупности «невидимого» серебра к среднему размеру укрупненного серебра.

На основе анализа полученных данных можно сделать вывод о том, что на укрупнение низкоразмерных частиц серебра при СВЧ обработке оказывает влияние добавление магнетита, образующего активные центры локального нагрева, поскольку обработка чистых модельных навесок позволила укрупнить благородный металл до меньших размеров в сравнении с навесками с магнетитом. Полученные результаты позволяют обосновать необходимое содержание магнетита, равное 10 %, для достижения наибольшего

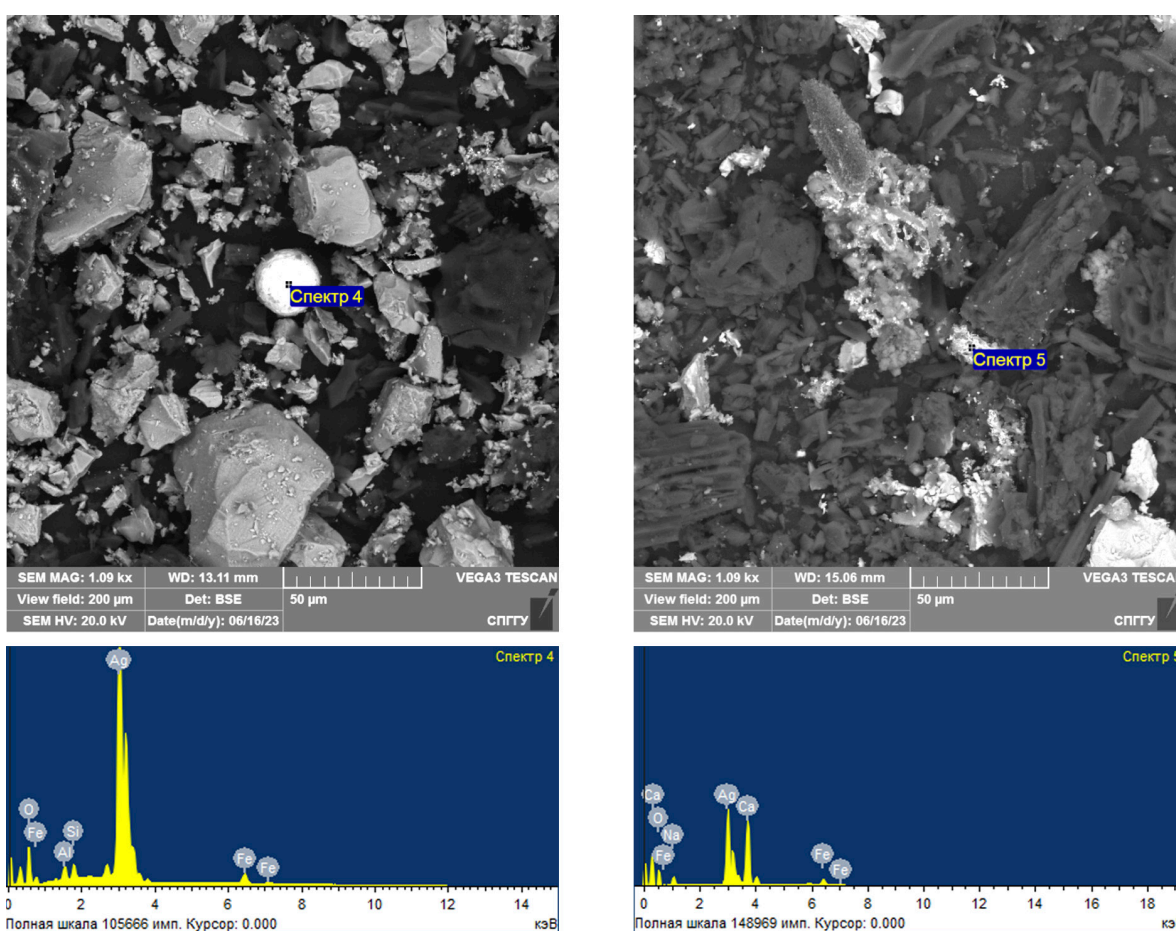


Рис. 5. Результаты исследования модельных навесок с укрупненным серебром после СВЧ обработки с добавлением 10 (слева) и 15 (справа) % магнетита с применением сканирующей электронной микроскопии

Таблица 6

Результаты исследования элементного состава для спектров, представленных на рис. 4 и 5

Номер спектра	Содержание, вес. %								
	O	Na	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Ag
Спектр 1	46,79	1,14	–	–	0,70	–	3,30	42,73	5,34
Спектр 2	49,52	6,06	2,04	–	–	2,65	22,60	3,74	13,39
Спектр 3	–	33,68	–	–	–	14,74	5,79	26,84	18,95
Спектр 4	20,02	–	–	0,94	0,98	–	–	2,97	75,09
Спектр 5	21,32	2,92	–	–	–	–	21,63	5,24	48,89



укрупнения низкоразмерного серебра при СВЧ воздействии до крупности 20–40 мкм соответственно. Образование сферических частиц серебра может быть обосновано более низкой температурой плавления в сравнении с золотом.

3. Обработка углеродистого флотационного концентрата с добавлением обоснованного содержания магнетита

Исследование возможности укрупнения серебра с добавлением ранее обоснованного содержания магнетита при СВЧ обработке проводилось на угле-

родистых флотационных концентратах. В работе [37] подтверждена возможность укрупнения низкоразмерных частиц Au с применением 10 % магнетита при СВЧ обработке углеродистого концентрата. На рис. 6 представлены результаты исследования обработанного углеродистого концентрата, полученные с применением сканирующего электронного микроскопа, подтверждающие укрупнение серебра в процессе СВЧ обработки с добавлением магнетита в количестве 10 % от массы навески. Элементный состав укрупненных частиц представлен в табл. 8.

Таблица 7

Результаты исследования влияния содержания магнетита на укрупнение низкоразмерного серебра в модельных навесках с и без СВЧ обработки

Параметры	Значения					
Содержание магнетита, %	0 (без обработки)	0	3	5	10	15
Средний размер укрупненного низкоразмерного серебра, мкм	1–100 нм	5–10	10–15	10–20	20–40	10–15
Максимальный размер укрупненного низкоразмерного серебра, мкм		39,0	43,0	92,3	123,1	102,0
Степень укрупнения		75–7500	125–12500	150–15000	300–30000	125–12500
Средняя крупность магнетита, мкм	10–15					
Максимальная крупность магнетита, мкм	49,0					

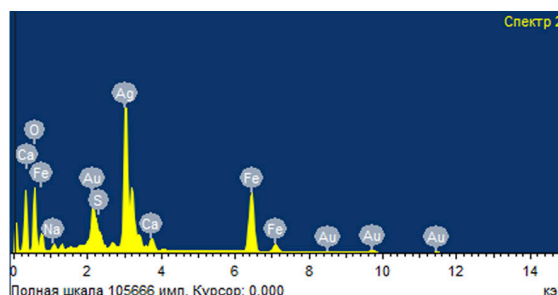
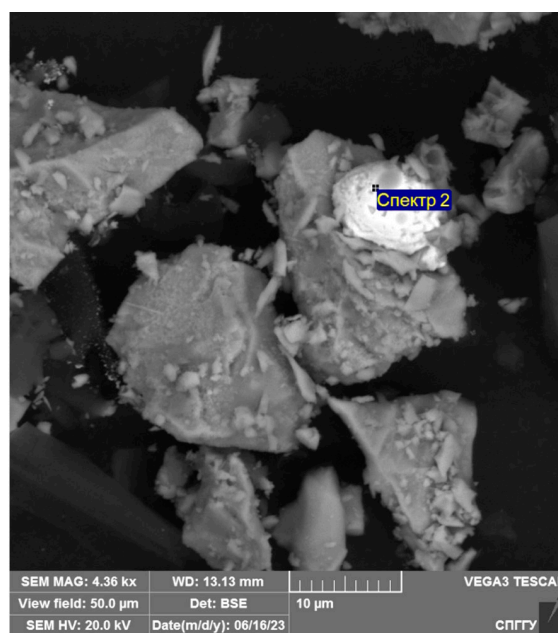
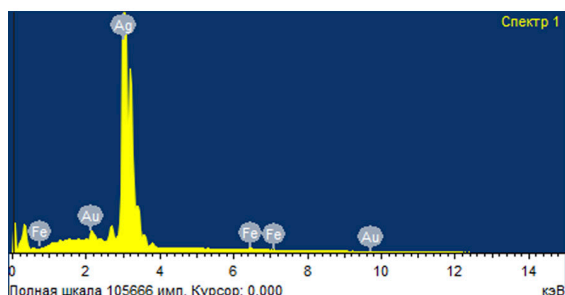
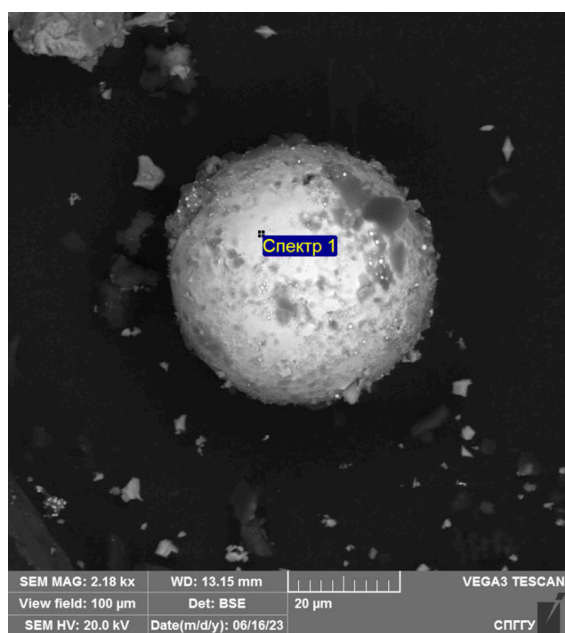


Рис. 6. Результаты исследования обработанных углеродистых концентратов с добавлением 10% магнетита с применением сканирующей электронной микроскопии

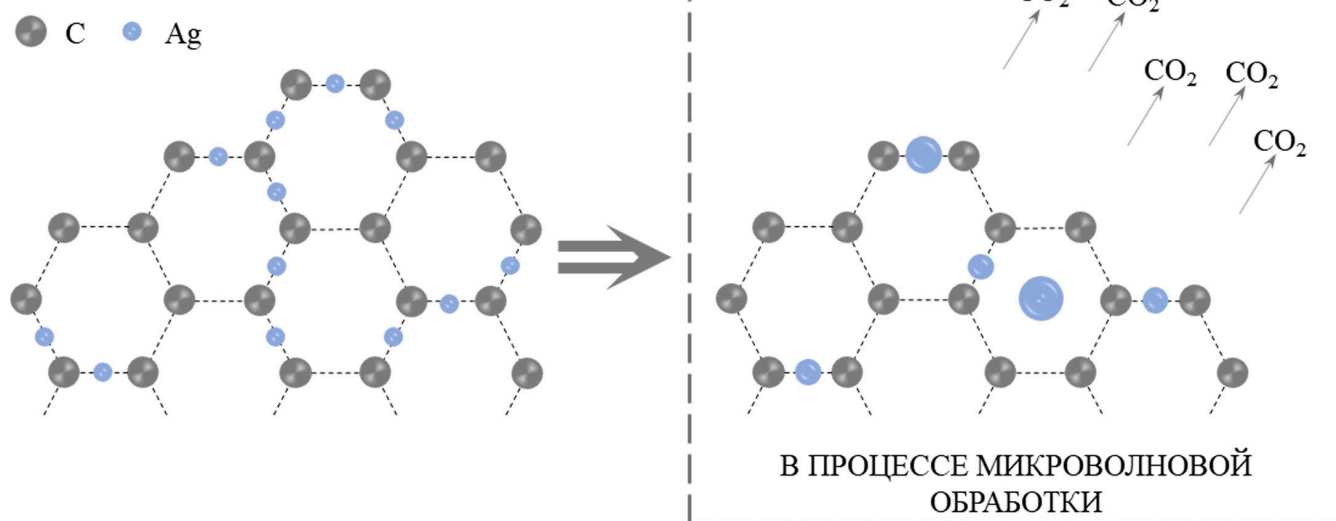


Рис. 7. Схематичное изображение укрупнения низкоразмерного серебра при СВЧ обработке

Результаты исследования элементного состава для спектров, представленных на рис. 6

Номер спектра	Содержание, вес. %						
	O	Na	S	Ca	Fe	Au	Ag
Спектр 1	–	–	–	–	0,96	3,84	95,20
Спектр 2	26,59	1,12	0,50	1,48	20,46	12,83	37,02

Интерпретация полученных результатов позволяет подтвердить укрупнение частиц серебра при СВЧ обработке углеродистого флотационного концентрата с добавлением 10 % магнетита. Размер укрупненных частиц, для которых характерна сферическая форма, после обработки составляет 20–50 мкм. Стоит отметить, что помимо серебра в укрупненных агрегатах по результатам исследования элементного состава обнаружены характерные пики для золота. Это указывает на то, что серебро укрупняется вместе с ним.

СВЧ обработка способствует повышению температуры модельной навески, основная часть которой представлена активированным углем. При его воспламенении в окислительной среде происходит:

- образование CO_2 ;
- плавление адсорбированных низкоразмерных частиц серебра после сгорания части активированного угля и нагревания магнетита;
- укрупнение вследствие перемещения в образовавшиеся дополнительные поры.

На рис. 7 представлено схематичное изображение механизма укрупнения низкоразмерного серебра в процессе СВЧ обработки.

Укрупнение низкоразмерного серебра подтверждается результатами исследования обработанных серебросодержащих модельных навесок с применением сканирующей электронной микроскопии. На рисунках, представленных в данной работе, наблюда-

ются укрупненные частицы как свободные (не связанные с активированным углем и магнетитом), так и на первоначальной стадии укрупнения непосредственно на самой поверхности активированного угля.

Результаты СВЧ обработки углеродистого флотационного концентрата с добавлением 10 % магнетита также подтвердили возможность укрупнения низкоразмерного серебра. Достигнутая крупность и содержание золота и серебра в укрупненных сферических частицах дает возможность дальнейшего их извлечения и, как следствие, снижения потерь ценных компонентов с хвостами обогащения. В качестве возможного метода извлечения укрупненных частиц можно рассмотреть центробежную концентрацию [38].

Заключение

В результате проведенных исследований СВЧ обработки серебросодержащих модельных навесок обоснована необходимость добавления магнетита для укрупнения низкоразмерного серебра. На основании составленного температурного картирования подтверждено образование активных центров локального нагрева в местах добавления магнетита в процессе обработки. Получено укрупнение низкоразмерного серебра при мощности СВЧ печи 1,0 кВт и времени обработки 3 мин с 10 % магнетита до сферических частиц серебра, средний размер которых составил 20–40 мкм. Выявлено, что при аналогичной мощности СВЧ печи и времени обработки, равном 5 мин, при добавлении 10 % магнетита достигаются наибольшие размеры укрупненных частиц, содержащих золото и серебро, равные 20–50 мкм. По результатам СВЧ обработки укрупнение серебра происходит в гравитационно-извлекаемую структуру, что позволяет в дальнейшем исследовать его извлечение с применением гравитационных методов обогащения.



Список литературы / References

1. Федотов П.К., Сенченко А.Е., Федотов К.В., Бурдонов А.Е. Исследования обогатимости сульфидных и окисленных руд золоторудных месторождений Алданского щита. *Записки Горного института*. 2020;242:218–227. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.2.218>
Fedotov P.K., Senchenko A.E., Fedotov K.V., Burdonov A.E. Studies of enrichment of sulfide and oxidized ores of gold deposits of the Aldan shield. *Journal of Mining Institute*. 2020;242:218–227. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.2.218>
2. Ефимов Д.А., Господариков А.П. Техничко-технологические аспекты использования валков с профилем в форме треугольника Рело в дробящих агрегатах на рудоподготовительном переделе. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(10–2):117–126. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_102_0_117
Efimov D.A., Gospodarikov A.P. Technical and technological aspects of the use of Reuleaux triangular profile rolls in crushing units in the ore processing plant. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(10–2):117–126. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_102_0_117
3. Николаева Н.В., Каллаев И.Т. Особенности процесса измельчения медно-молибденовых руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(1):52–66. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_1_0_52
Nikolaeva N.V., Kallaev I.T. Features of copper-molybdenum ore grinding. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(1):52–66. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_1_0_52
4. Lopéz R., Jordão H., Hartmann R. et al. Study of butyl-amine nanocrystal cellulose in the flotation of complex sulphide ores. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2019;579:123655. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123655>
5. Chanturia V.A., Matveeva T.N., Ivanova T.A., Getman V.V. Mechanism of interaction of cloud point polymers with platinum and gold in flotation of finely disseminated precious metal ores. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2016;37(3):187–195. <https://doi.org/10.1080/08827508.2016.1168416>
6. Matveeva T.N., Gromova N.K., Ivanova T.A., Chanturia V.A. Physicochemical effect of modified diethyldithiocarbamate on the surface of auriferous sulfide minerals in noble metal ore flotation. *Journal of Mining Science*. 2013;49(5):803–810. <https://doi.org/10.1134/S1062739149050158>
7. Owusu C., Agorhom E.A., Fosu S., Budu-Arthur E. Adsorption studies of sulphidic refractory gold ore. *Powder Technology*. 2020;375:310–316. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.07.063>
8. Яковлева Т.А., Ромашев А.О., Машевский Г.Н. Оптимизация дозирования флотационных реагентов при флотации руд цветных металлов с применением цифровых технологий. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(6–2):175–188. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_62_0_175
Yakovleva T.A., Romashev A.O., Mashevsky G.N. Digital technologies for optimizing the dosing of flotation reagents during flotation of non-ferrous metal ores. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(6–2):175–188. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_62_0_175
9. Александрова Т.Н., Прохорова Е.О. Модификация свойств породообразующих минералов при флотации. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(12):123–138. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_12_0_123
Aleksandrova T.N., Prokhorova E.O. Modification of properties of rock-forming minerals during flotation. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(12):123–138. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_12_0_123
10. Захаров Б.А., Меретуков М.А. *Золото: упорные руды*. М.: ИД «Руда и Металлы»; 2013. 452 с.
Zakharov B.A., Meretukov M.A. *Gold: refractory ores*. Moscow: Ruda i Metally Publ. House; 2013. 452 p. (In Russ.)
11. Шумилова Л.В., Костикова О.С. Сульфидизация серебро-полиметаллических руд месторождения «Гольцовое» для снижения потерь серебра с хвостами обогащения. *Записки Горного института*. 2018;230:160–166. <https://doi.org/10.25515/PMI.2018.2.160>
Shumilova L.V., Kostikova O.S. Sulfidization of silver-polymetallic ores of “Goltsovoe” deposit for decreasing loss of silver in mill tailings. *Journal of Mining Institute*. 2018;230:160–166. <https://doi.org/10.25515/PMI.2018.2.160>
12. Рассказова А.В., Секисов А.Г., Бурдонов А.Е. Активационное выщелачивание упорных первичных руд Малмыжского месторождения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(1):130–141. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_1_0_130
Rasskazova A.V., Sekisov A.G., Burdonov A.E. Activation leaching of difficult primary ore at Malmyzh deposit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(1):130–141. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_1_0_130
13. Лаврик А.В., Конарева Т.Г., Рассказова А.В. Результаты извлечения золота с субмикронными инкапсулированными формами нахождения из упорной руды месторождения Делькен. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(12–1):121–128. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_121_0_121
Lavrik A.V., Konareva T.G., Rasskazova A.V. Recovery of submicron encapsulated gold from rebellious ore of Delken deposit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(12–1):121–128. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_121_0_121



14. Лодейщиков В.В. *Технология извлечения золота и серебра из упорных руд: в 2 т. Т. 1.* Иркутск: ОАО «Иргиредмет»; 1999. 452 с.
Lodeyshchikov V.V. *Technology of gold and silver extraction from refractory ores: in 2 vol. v. 1,* Irkutsk: JSC Irgiredmet Publ.; 1999. 452 p. (In Russ.)
15. Григорьева В.А., Бодуэн А.Я. Перспективы переработки упорного золотосульфидного сырья. *Известия вузов. Цветная металлургия.* 2023;(6):22–34. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-6-22-34>
Grigoreva V.A., Boduen A.Ya. Prospects for refractory gold-sulfide ore processing. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy.* 2023;(6):22–34. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-6-22-34>
16. Петров Г.В., Гордеев Д.В., Бекирова В.Р. Сравнение способов повышения извлечения золота из золотосодержащих концентратов двойной упорности в технологии автоклавного окисления. *iPolytech Journal.* 2023;27(4):809–820. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-809-820>
Petrov G.V., Gordeev D.V., Bekirova V.R. Comparison of methods for enhancing gold recovery from double refractory concentrates using the technology of autoclave oxidation. *iPolytech Journal.* 2023;27(4):809–820. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-809-820>
17. Иваник С.А., Илюхин Д.А. Флотационное выделение элементарной серы из золотосодержащих кеков. *Записки Горного института.* 2020;242:202–208. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.2.202>
Ivanik S.A., Ilyukhin D.A. Flotation extraction of elemental sulfur from gold-bearing cakes. *Journal of Mining Institute.* 2020;242:202–208. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.2.202>
18. Amankwah R.K., Pickles C.A. Microwave roasting of a carbonaceous sulphidic gold concentrate. *Minerals Engineering.* 2009;22(13):1095–1101. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.02.012>
19. Chanturiya V.A., Bunin I.Z. Advances in Pulsed Power Mineral Processing Technologies. *Minerals.* 2022;12(9):1177. <https://doi.org/10.3390/min12091177>
20. Wei W., Shao Z., Zhang Y. et al. Fundamentals and applications of microwave energy in rock and concrete processing – a review. *Applied Thermal Engineering.* 2019;157:113751. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113751>
21. Haque K.E. Microwave energy for mineral treatment processes – a brief review. *International Journal of Mineral Processing.* 1999;57(1):1–24. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(99\)00009-5](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(99)00009-5)
22. Amini A., Latifi M., Chaouki J. Electrification of Materials Processing via Microwave Irradiation: A Review of Mechanism and Applications. *Applied Thermal Engineering.* 2021;193:117003. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117003>
23. Pressacco M., Kangas J.J.J., Saksala T. Numerical modelling of microwave irradiated rock fracture. *Minerals Engineering.* 2023;203:108318. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108318>
24. Shadi A., Ahmadihosseini A., Rabiei M. et al. Numerical and experimental analysis of fully coupled electromagnetic and thermal phenomena in microwave heating of rocks. *Minerals Engineering.* 2022;178:107406. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107406>
25. Qin L., Chen G., Xu G. et al. Microscopic liberation mechanisms of oolitic iron ore under microwave irradiation and optimization of irradiation parameters. *Minerals Engineering.* 2022;178:107402. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107402>
26. Duan B., Bobicki E.R., Hum S.V. Application of microwave imaging in sensor-based ore sorting. *Minerals Engineering.* 2023;202:108303. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108303>
27. Siva L.M. da, Nascimento M., Oliveira E.M. de et al. Evaluation of the diffusional coefficient in the acid baking process using microwave energy to reduce phosphorus content in iron ore particles. *Minerals Engineering.* 2020;157:106541. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106541>
28. Silva G.R. da, Espiritu E.R.L., Mohammadi-Jam S., Waters K.E. Surface characterization of microwave-treated chalcopyrite. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* 2018;555:407–417. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.06.078>
29. Li H., Long H., Zhang L. et al. Effectiveness of microwave-assisted thermal treatment in the extraction of gold in cyanide tailings. *Journal of Hazardous Materials.* 2020;384:121456. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121456>
30. Kamariah N., Kalebic D., Xanthopoulos P. et al. Conventional versus microwave-assisted roasting of sulfidic tailings: mineralogical transformation and metal leaching behavior. *Minerals Engineering.* 2022;183:107587. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107587>
31. Walkiewicz J.W., Kazonich G., McGill S.L. Microwave heating characteristics of selected minerals and compounds. *Minerals & metallurgical processing.* 1988;5:39–42. <https://doi.org/10.1007/BF03449501>
32. Farahat M., Elmahdy A.M., Hirajima T. Influence of microwave radiation on the magnetic properties of molybdenite and arsenopyrite. *Powder Technology.* 2017;315:276–281. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.04.023>
33. Головенько Ж.В., Гафнер С.Л., Гафнер Ю.Я. Компьютерный анализ структурных свойств нанокластеров золота. *Фундаментальные проблемы современного материаловедения.* 2010;7(2):11–16.
Golovenko Zh.V., Gafner S.L., Gafner Yu.Ya. Computer analysis of the structural properties of gold nanoclusters. *Fundamental Problems of Radio-Electronic Instrument Making.* 2010;7(2):11–16. (In Russ.)



34. Головенько Ж.В., Гафнер С.Л., Гафнер Ю.Я. Исследование структурных состояний нанокластеров золота методом молекулярной динамики. *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. 2008;8(2):83–86.
Golovenko Zh.V., Gafner S.L., Gafner Yu. Ya. Investigation of structural states of gold nanoclusters by molecular dynamics method. *Fundamental Problems of Radio-Electronic Instrument Making*. 2008;8(2):83–86. (In Russ.)
35. Самсонов В.М., Сдобняков Н.Ю., Мясниченко В.С. и др. Сравнительный анализ размерной зависимости температур плавления и кристаллизации наночастиц серебра: молекулярная динамика и метод Монте-Карло. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2018;(12):65–69. <https://doi.org/10.1134/S0207352818120168> (Перев. вер.: Samsonov V.M., Sdobnyakov N.Y., Myasnichenko V.S. et al. A comparative analysis of the size dependence of the melting and crystallization temperatures in silver nanoparticles via the molecular dynamics and Monte-Carlo methods. *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2018;12(6):1206–1209. <https://doi.org/10.1134/S1027451018050671>)
Samsonov V.M., Sdobnyakov N.Y., Myasnichenko V.S. et al. A comparative analysis of the size dependence of the melting and crystallization temperatures in silver nanoparticles via the molecular dynamics and Monte-Carlo methods. *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2018;12(6):1206–1209. <https://doi.org/10.1134/S1027451018050671> (Orig. ver.: Samsonov V.M., Sdobnyakov N.Y., Myasnichenko V.S. et al. A comparative analysis of the size dependence of the melting and crystallization temperatures in silver nanoparticles via the molecular dynamics and Monte-Carlo methods. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, Sinkhrotronnye i Neitronnye Issledovaniya*. 2018;(12):65–69. <https://doi.org/10.1134/S0207352818120168>)
36. Aleksandrova T.N., Nikolaeva N.V., Afanasova A.V. et al. Extraction of low-dimensional structures of noble and rare metals from carbonaceous ores using low-temperature and energy impacts at succeeding stages of raw material transformation. *Minerals*. 2023;13(1):84. <https://doi.org/10.3390/min13010084>
37. Афанасова А.В., Абурова В.А. Укрупнение низкоразмерных благородных металлов из углеродистых материалов с применением микроволновой обработки. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(1):20–35. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_1_0_20
Afanasova A.V., Aburova V.A. Growth of low-dimensional structure noble metals in carbonaceous materials under microwave treatment. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(1):20–35. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_1_0_20
38. Амдур А.М., Федоров С.А., Матушкина А.Н. Извлечение золота из труднообогатимых руд и техногенных отходов путем их высокотемпературной обработки и последующей центробежной сепарации. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(11–1):95–106. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_11_0_95
Amdur A.M., Fedorov S.A., Matushkin A.N. Extraction of gold from definitely processing ores and technogenic waste by their high-temperature treatment and subsequent centrifugal separation. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(11–1):95–106. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_11_0_95

Информация об авторах

Татьяна Николаевна Александрова – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-3069-0001](https://orcid.org/0000-0002-3069-0001), Scopus ID [57216873316](https://scopus.id/57216873316), ResearcherID [A-5418-2014](https://orcid.org/A-5418-2014); e-mail: Aleksandrova_TN@pers.spmi.ru

Анастасия Валерьевна Афанасова – кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-8451-2489](https://orcid.org/0000-0002-8451-2489), Scopus ID [57188630049](https://scopus.id/57188630049), ResearcherID [AAH-4333-2019](https://orcid.org/AAH-4333-2019); e-mail: Afanasova_av@pers.spmi.ru

Валерия Александровна Абурова – аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-1364-5006](https://orcid.org/0000-0002-1364-5006), Scopus ID [57503048800](https://scopus.id/57503048800); e-mail: aburovaleria@gmail.com

Information about the authors

Tayana N. Aleksandrova – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID [0000-0002-3069-0001](https://orcid.org/0000-0002-3069-0001), Scopus ID [57216873316](https://scopus.id/57216873316), ResearcherID [A-5418-2014](https://orcid.org/A-5418-2014); e-mail: Aleksandrova_TN@pers.spmi.ru

Anastasia V. Afanasova – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID [0000-0002-8451-2489](https://orcid.org/0000-0002-8451-2489), Scopus ID [57188630049](https://scopus.id/57188630049), ResearcherID [AAH-4333-2019](https://orcid.org/AAH-4333-2019); e-mail: Afanasova_av@pers.spmi.ru

Valeria A. Aburova – PhD-Student, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID [0000-0002-1364-5006](https://orcid.org/0000-0002-1364-5006), Scopus ID [57503048800](https://scopus.id/57503048800); e-mail: aburovaleria@gmail.com

Поступила в редакцию 13.03.2024
Поступила после рецензирования 23.04.2024
Принята к публикации 10.06.2024

Received 13.03.2024
Revised 23.04.2024
Accepted 10.06.2024



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-03-234>

УДК 658.386:622.867



Оценка готовности вспомогательных горноспасательных команд угольных шахт

В. А. Руденко  

ФГУП «Военизированная горноспасательная часть» (ФГУП «ВГСЧ»), г. Москва, Российская Федерация

 rescue@vgesch.ru

Аннотация

Эффективность ведения горноспасательных работ зависит от времени, когда приступили к локализации и ликвидации аварии. В связи с удалённостью некоторых горных предприятий было принято решение о создании вспомогательных горноспасательных команд из числа горнорабочих. При этом эффективность аварийно-спасательных работ, проводимых членами вспомогательных горноспасательных команд в настоящее время вызывает много споров. В данной работе приведены сведения по оценке готовности вспомогательных горноспасательных команд угольных шахт России. По всем отрядам и взводам было проведено анкетирование профессиональных горноспасателей по основным вопросам деятельности вспомогательных горноспасательных команд. Полученные методом экспертных оценок результаты позволили определить основные проблемы в подготовке членов вспомогательных горноспасательных команд, выявить направления совершенствования нормативно-правовой и методической базы по тактике ведения аварийно-спасательных работ. Во второй части работы представлены результаты проведенных контрольно-тактических учений, проведенных на семи шахтах. Учения проводились внепланово в конце рабочей смены. Проверялся целый спектр знаний, навыков, умений и физическая подготовка членов вспомогательных горноспасательных команд. А именно проверялись правильность выдачи заданий, тактическая подготовка отделений, правильность подготовки к спуску в шахту и применения горноспасательного оборудования, навыки оказания первой помощи, теоретические знания и физическая подготовка.

Ключевые слова

военизированные горноспасательные части, вспомогательная горноспасательная команда, угольная шахта, безопасность, авария, экспертная оценка, тактические учения

Для цитирования

Rudenko V.A. Assessment of readiness of auxiliary mine rescue teams in coal mines. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):243–249. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-03-234>

SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research paper

Assessment of readiness of auxiliary mine rescue teams in coal mines

V. A. Rudenko  

Federal State Unitary Enterprise “Militarized Mine Rescue Unit” (FSUE “VGSCH”), Moscow, Russian Federation

 rescue@vgesch.ru

Abstract

The efficiency of mine rescue operations largely depends on how quickly efforts to localize and mitigate an accident are initiated. Given the remoteness of some mining enterprises, a decision was made to form auxiliary mine rescue teams composed of miners. However, there is ongoing debate regarding the effectiveness of the rescue operations carried out by these auxiliary teams. This paper presents data on the assessment of the readiness of auxiliary mine rescue teams in Russian coal mines. A survey of professional mine rescuers was conducted across all units and platoons, focusing on key aspects of auxiliary team operations. The results, based on expert evaluations, revealed the main challenges in training auxiliary team members and highlighted areas for improving the regulatory and methodological framework for mine rescue tactics. The second part of the paper presents the results of control-tactical exercises held at seven mines. These unannounced



exercises took place at the end of a work shift and evaluated a wide range of knowledge, skills, abilities, and physical fitness among the auxiliary teams. Key evaluations included the accuracy of task allocation, tactical training, preparation for mine descent, the use of rescue equipment, first aid skills, theoretical knowledge, and physical fitness.

Keywords

militarized mine rescue units, auxiliary mine rescue team, coal mine, safety, accident, expert assessment, tactical exercises

For citation

Rudenko V.A. Assessment of readiness of auxiliary mine rescue teams in coal mines. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):243–249. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-03-234>

Введение

Безопасность ведения горных работ обусловлена квалификацией горнорабочих и инженерно-технических работников. Сегодня подготовкой кадров для горной промышленности заняты 38 высших учебных заведения и 114 колледжей [1, 2]. При этом обучение по дисциплине безопасности ведения горных работ и горноспасательное дело (обязательная дисциплина) в разных учебных организациях проходит на разном уровне, преподавателями с разной квалификацией и порой без должного учебного оснащения [3, 4]. Аварии происходят на горных предприятиях, как правило, из-за низкой квалификации сотрудников [5]. При этом только в нескольких вузах есть углубленная подготовка кадров в области горноспасательного дела [4, 6]. За рубежом, где наиболее развито горноспасательное дело, вспомогательных горноспасательных команд нет¹ [7]. Подготовкой сотрудников предприятий к локализации и ликвидации аварий на начальном этапе их развития занимаются только в подразделениях Федерального государственного унитарного предприятия «Военизированная горноспасательная часть» (ФГУП «ВГСЧ»).

Началом организации горноспасательной службы в России послужил 32 съезд горнопромышленников в 1907 г., на котором принято решение об организации спасательных станций на наиболее опасных шахтах и рудниках. К 1920 г. были организованы более 40 станций, они комплектовались из инженерно-технических работников и горнорабочих шахт и рудников, работающих по совместительству за небольшое дополнительное вознаграждение.

Но началом организации профессиональной Государственной горноспасательной службы России, построенной на принципах централизованного управления, считается 6 июля 1922 года, с принятием Правительством постановления «О горноспасательном деле в РСФСР»². Все горноспасательные станции были переданы в государственное управление и на них были возложены задачи по спасению людей

и ликвидации аварий во всех без исключения горнопромышленных предприятиях.

В 1932 г., учитывая экстремальный характер работы горноспасателей при ликвидации аварий в непригодной для дыхания атмосфере в условиях высокой температуры, единоначалия, беспрекословного выполнении приказов и с целью повышения уровня боеспособности, материального и технического обеспечения, постановлением Совета Труда и Обороны горноспасательные подразделения переведены на военизированное положение в составе Управления военспецчастей и противовоздушной обороны Наркомтяжпрома, что послужило быстрому развитию подразделений ВГСЧ и горноспасательного дела в стране. Вся оперативная работа стала строиться по разработанным уставам, положениям и инструкциям, были установлены должности рядового, младшего, среднего, старшего и высшего состава: боец – респираторщик, командир отделения, командир взвода и др. Установлена форма одежды и знаки различия.

До 2010 г. горноспасательное обслуживание объектов ведения горных работ обеспечивалось силами и средствами отраслевых военизированных горноспасательных служб ФГКУ «Управление ВГСЧ в строительстве», ОАО «ВГСЧ», ФГУП «СПО «Металлургбезопасность», решающих одинаковые профессиональные задачи – спасение людей и ликвидацию аварий, при ведении горных работ в угольной и горнорудной, а также при строительстве подземных объектов.

В 2010 г. в соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 6 мая 2010 г. № 554³ руководство деятельностью военизированных горноспасательных частей возложено на МЧС России.

В 2011 г., ФГУП «СПО «Металлургбезопасность» переименовано в ФГУП «Военизированная горноспасательная часть», в состав которого вошли все оперативные подразделения ОАО «ВГСЧ».

В настоящее время в состав МЧС России входят 5 военизированных горноспасательных организаций: ФГУП «ВГСЧ»; ФАУ «ВГСЧ в строительстве»; ФГКУ «Национальный горноспасательный центр»; ФГКУ «ВГСЧ ЛНР»; ФГКУ «ВГСЧ ДНР». Общая штатная численность организаций ВГСЧ МЧС России составляет 8584 человека.

³ Указ Президента Российской Федерации от 06.05.2010 г. № 554 «О совершенствовании единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций». URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/31043>

¹ Handbook of training in mine rescue and recovery operations. Workplace Safety North (WSN). North Bay Ontario; 2021. 378 p.; Western Canada Mine Rescue Manual Ministry of Energy and Mines. Office of the Chief Inspector of Mines; 2016. 195 p.

² Постановление Всероссийского Центрального Исполнительного комитета и Совета Народных комиссаров «О горноспасательном деле в РСФСР». URL: <https://scgss.narod.ru/Postanovlenie.gif>

Оперативные подразделения ВГСЧ МЧС России территориально расположены в 40 субъектах Российской Федерации (рис. 1) и включают в себя 26 военизированных горноспасательных отрядов, в составе которых действуют 71 военизированный горноспасательный взвод, включая 103 горноспасательных поста, и 25 военизированных горноспасательных пунктов, оснащенных специальной техникой, оборудованием, снаряжением, инструментами и материалами.

ВГСЧ МЧС России обеспечивают прикрытие 2350 опасных производственных объектов горнодобывающей отрасли (168 угольных шахт, 143 подземных объекта по добыче полезных ископаемых, 28 объектов подземного строительства, 1259 объектов по добыче полезных ископаемых открытым способом, 224 предприятия по переработке и обогащению полезных ископаемых и 528 прочих опасных производственных объектов).

Группировка сил ВГСЧ МЧС России составляет 5487 чел. и 978 единиц техники (соответственно: ФГУП «ВГСЧ» – 3922 человека и 756 ед. тех., ФАУ «ВГСЧ в строительстве» – 216 человек и 53 ед. тех., ФГКУ «Национальный горноспасательный центр» – 66 человек и 13 ед. тех., ФГКУ «ВГСЧ ЛНР» – 448 человек и 71 ед. тех., ФГКУ «ВГСЧ ДНР» – 835 человек и 85 ед. тех.), из них на круглосуточном дежурстве находятся 1364 спасателя и 276 единиц техники.

Функции по руководству ВГСЧ в составе центрального аппарата МЧС России возложены на Департамент спасательных формирований, который выполняет задачи по обеспечению руководства деятельностью ВГСЧ, их взаимодействию с территориальными органами МЧС России и разработке основ

единой государственной политики в области развития, подготовки и применения ВГСЧ.

При этом особая роль в системе противоаварийной защиты отводится вспомогательным горноспасательным командам (ВГК). На сегодня в организации обучено почти 100 000 членов ВГК.

Ежегодно обучение и переобучение проходят тысячи горнорабочих (рис. 2). Занятия проходят по разработанной и утвержденной учебной программе один раз в три года. Один раз в полгода члены ВГК проходят тренировку в изолирующих дыхательных аппаратах в составе отделения.

Для оценки необходимости и эффективности работы вспомогательных горноспасательных команд были проведены исследования, включающие в себя метод экспертных оценок и тактические учения на семи шахтах России.

Исследования эффективности действий ВГК

Среди командного состава ВГСЧ было проведено анкетирование, опрошено 334 человека. 89 % профессиональных спасателей уверены, что ВГК нужно создавать на горных предприятиях.

Однако 82 % опрошенных считают, что члены ВГК меньше рискуют жизнью, чем горноспасатели. И травм они практически не получают (5 % ответили, что члены ВГК получали травмы при локализации и ликвидации аварий).

Интересен ответ на вопрос «отказывались ли члены ВГК участвовать в аварийно-спасательных работах (АСР)». Голоса разделились почти пополам (да – 53 %, нет – 47 %). В связи с чем вопрос мотивации участия в АСР весьма актуален. Одно дело быть членом ВГК,



Рис. 1. Дислокация подразделений и состав сил ВГСЧ МЧС России



другое дело, идти в шахту при возникновении аварии и рисковать собственной жизнью и здоровьем.

К основным проблемам в подготовке ВГК сообщество горноспасателей видит в недостаточной физической подготовке, низкий уровень навыков работы с горноспасательным оборудованием, трудности с самоорганизацией. Также почти единогласно (75 %) все считают необходимым увеличить число часов на обучение членов ВГК. Сегодня в рамках аттестации членов ВГК обучение длится 72 часа.

Вопросы по количеству членов ВГК, которое необходимо, например, для оказания первой помощи или для пожара, также остались без однозначного ответа (рис. 3). Следовательно, возникает много вопросов по тактике ведения горноспасательных работ членами ВГК. Единого утвержденного документа для ВГК по тактике сегодня нет. В настоящее время при проведении АСР члены ВГК руководствуются нормативными документами профессиональных горноспасателей.

На вопрос «Чего не хватает членам ВГК?» почти все ответили, что именно навыков в работе в составе отделения.

Действительно важно понимать насколько эффективна аварийно-спасательная работа членов ВГК. Ведь они работают в совершенно других начальных

условиях нежели горноспасатели. Авария может произойти в конце рабочей смены, когда члены ВГК отработали на своих рабочих местах по 6–8 часов. У них нет отработанных навыков работы в дыхательных аппаратах, доведенных до автоматизма, как у профессиональных горноспасателей.

Эксперимент по готовности ВГК на угольных шахтах

Для объективной оценки на семи шахтах в конце рабочей смены были проведены контрольно-тактические учения (КТУ) по позиции «Пожар».

Например, как это было на шахте «1» (рис. 4). Выбиралось место аварии, вид аварии – пожар, и задействовалась соответствующая позиция ПЛА.

Тщательно отслеживались все недостатки, допущенные членами ВГК. В том числе критические, которые могли бы в реальной ситуации привести к гибели членов ВГК. Например, по данной шахте «1» командир не доложил отделению о зонах поражения и возможных путях распространения аварии. Также член ВГК не проверил шлем-маску. При входе в зону высоких температур (ЗВТ) отделение ВГК не применило охлаждающие элементы. Не осуществляло контроль температуры в ЗВТ и т.д.

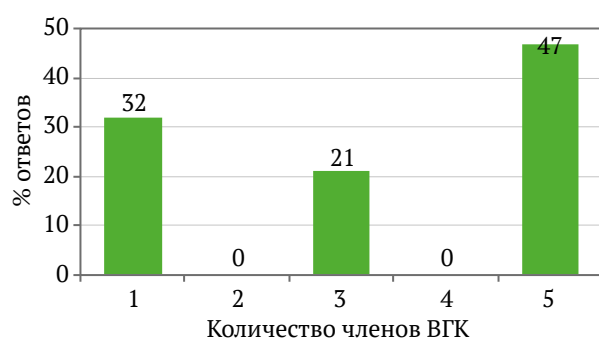


а

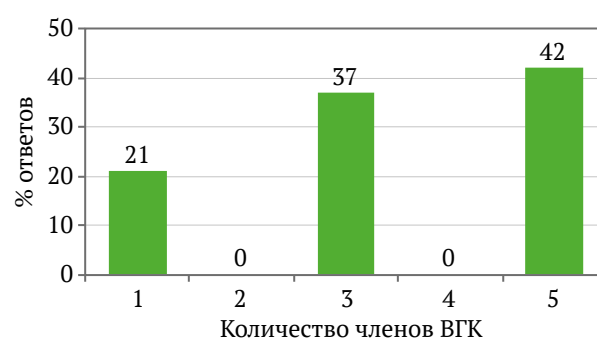


б

Рис. 2. Статистика по аттестации членов ВГК (а) и аварийно-спасательных служб (формирований) АСС(Ф) (б)



а



б

Рис. 3. Необходимое минимальное количество членов ВГК:
а – при оказании первой помощи пострадавшим, б – при тушении пожара

Подводя итог по всем шахтам, можно отметить, что везде есть критические замечания. На шахте «2», командир не провел отделению инструктаж по мерам безопасности, ошибся при производстве расчёта времени на движение вперёд в ЗВТ. На шахте «3» командир не подал команду о необходимости сцепки личного состава соединительными шнурами; не сообщил личному составу о газовой обстановке и возможности

В реальной обстановке эти и другие случаи могли бы привести к гибели членов ВГК и возможному усугублению аварии.





Заключение

На всех шахтах были критические недочеты. Суммарная оценка по всем шахтам приведена на сводной диаграмме (рис. 5). Совсем плохо дела обстояли с выдачей задания и применением горноспасательного оборудования. Лучше всего с тактической подготовкой и порядком оказания первой помощи. Вот на недостатки и будет направлена дальнейшая наша работа.

При проведении исследований следует отметить, что есть более сложные виды аварий [8], в которых не всегда быстро можно найти предполагаемое место аварии. Такие случаи могут случаться, в данном случае риск выполнения неправильных действий членами ВГК будет выше.

Возможные пути повышения безопасности и эффективности работы ВГК:

1. Повышение мотивации (путём кратного увеличения заработной платы (в настоящее время доплата

в диапазоне 3–10% от з/п; путём предоставления государственных гарантий помощи членам ВГК в случае получения ими травмы при выполнении ГСР; путём предоставления государственных гарантий помощи семьям в случае гибели или травмы членов ВГК.)

2. Увеличение количества часов обучения членов ВГК, проведение внеплановых проверок, организация соревнований среди всех организаций горнодобывающей отрасли.

3. Разработка тактики ведения горноспасательных работ с учетом численности членов ВГК, прибывших к месту аварии, возможного отсутствия слаженности собранного отделения и физических возможностей горнорабочих в разные периоды по рабочей смене.

Только реализуя весь представленный комплекс мероприятий, возможно повысить уровень безопасности аварийно-спасательных работ, проводимых членами ВГК.

Таблица

Оценка теоретической и физической подготовки

№ п/п	Год рождения	Занимаемая должность	Занимаемая должность в ВГК шахты	Образование	Стаж	Оценка по результатам тестирования	Общая оценка теоретической подготовки членов ВГК	Выполнение норматива по подтягиванию на перекладине (да/нет)	Выполнение норматива по сгибанию и разгибанию рук из положения «упор лежа» (да/нет)
1.	1978	Зам. гл. инженера	Руководитель ВГК	Высшее	18	4	3,3	Да	Да
2.	1978	Горный мастер	Ком. отд. ВГК № 1	Ср. техническое	15	3		Нет	Да
3.	1987	ГРП	Член ВГК	Высшее	5	4		Да	Да
4.	1993	ГРОЗ	Член ВГК	Среднее	7	3		Да	Да
5.	1992	МПУ	Член ВГК	Среднее	4	3		Нет	Да
6.	1983	ГРОЗ	Член ВГК	Среднее	15	3		Да	Нет
7.	1995	Зам. нач. участка	Ком. отд. ВГК № 2	Среднее	10	3		Да	Да
8.	1995	Проходчик	Член ВГК	Среднее	3	3		Да	Да
9.	1989	Проходчик	Член ВГК	Ср. техническое	9	3		Да	Нет
10.	1995	ГРП	Член ВГК	Среднее	4	3		Да	Да
11.	1983	ГРОЗ	Член ВГК	Среднее	12	4		Да	Нет

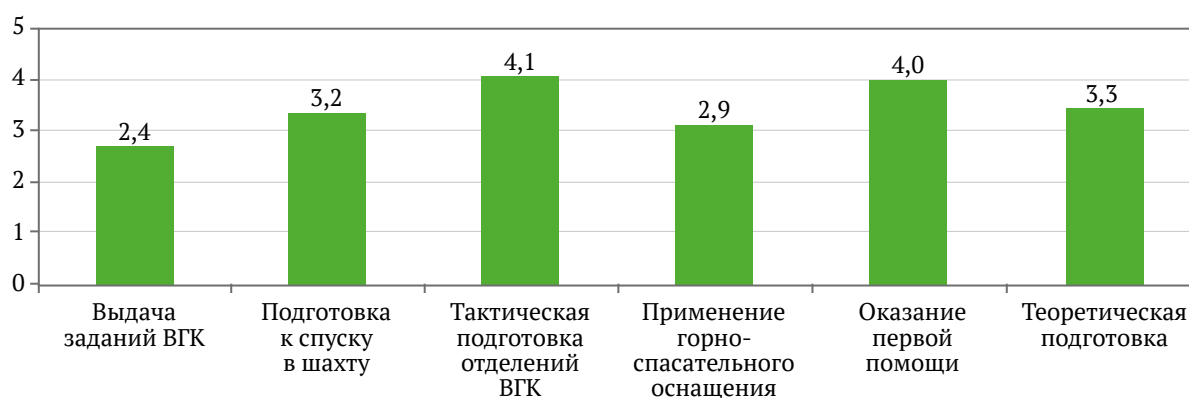


Рис. 5. Усреднённая диаграмма учета недостатков в подготовке членов ВГК при проведении КТУ



Список литературы / References

1. Petrov V.L., Puchkov L.A. The system of higher mining education in Russia. *Eurasian Mining*. 2017;(2):57–60. <https://doi.org/10.17580/em.2017.02.14>
2. Петров В.Л. Аналитический обзор системы подготовки горных инженеров в России. *Горные науки и технологии*. 2022;7(3):240–259. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-3-240-259>
Petrov V.L. Analytical review of the training system for mining engineers in Russia. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(3):240–259. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-3-240-259>
3. Каледина Н.О. Инженерная подготовка горноспасателей. *Горный журнал*. 2018;(5):86–89. <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.05.14>
Kaledina N.O. Engineer training of mine rescue men. *Gornyi Zhurnal*. 2018;(5):86–89. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.05.14>
4. Кобылкин С.С., Руденко В.А. Подготовка кадров в области горноспасательного дела. *Уголь*. 2023;(11):30–42. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-11-30-42>
Kobylkin S.S., Rudenko V.A. Training of miners in mine rescue. *Ugol'*. 2023;(11):30–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-11-30-42>
5. Коликов К.С., Гришин В.Ю., Ишкхнели О.Г. Аварийность и травматизм на предприятиях угольной отрасли. *Охрана труда и социальное страхование*. 2020;(6):34–44.
Kolikov K.S., Grishin V.Yu., Ishkhineli O.G. Accidents and injuries at coal industry enterprises. *Okhrana Truda i Sotsial'noye Strakhovaniye*. 2020;(6):34–44. (In Russ.)
6. Коликов К.С., Каледина Н.О., Кобылкин С.С. Кафедра «Безопасность и экология горного производства»: прошлое, настоящее и будущее. *Горный журнал*. 2018;(3):21–28. <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.03.04>
Kolikov K.S., Kaledina N.O., Kobylkin S.S. Mining Safety and Ecology Department: past, present and future. *Gornyi Zhurnal*. 2018;(3):21–28. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.03.04>
7. Enright C., Ferriter R.L. *Mine rescue manual. a comprehensive guide for mine rescue team members*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.; 2015. 196 p.
8. Кобылкин С.С., Харисов А.Р. Особенности проектирования вентиляции угольных шахт, применяющих камерно-столбовую систему разработки. *Записки Горного Института*. 2020;245;531–538. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.5.4>
Kobylkin S.S., Kharisov A.R. Design features of coal mines ventilation using a room-and-pillar development system. *Journal of Mining Institute*. 2020;245;531–538. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.5.4>

Информация об авторе

Виталий Александрович Руденко – первый заместитель генерального директора по оперативно-технической работе, ФГУП «Военизированная горноспасательная часть», г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0009-0002-7365-0015](https://orcid.org/0009-0002-7365-0015); e-mail rescue@vgsch.ru

Information about the author

Vitaly A. Rudenko – First Deputy General Director, Federal State Unitary Enterprise “Militarized Mine Rescue Unit” (FSUE “VGSCH”), Moscow, Russian Federation; ORCID [0009-0002-7365-0015](https://orcid.org/0009-0002-7365-0015); e-mail rescue@vgsch.ru

Поступила в редакцию 26.03.2024
Поступила после рецензирования 14.04.2024
Принята к публикации 22.05.2024

Received 26.03.2024
Revised 14.04.2024
Accepted 22.05.2024



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-02-223>

УДК 624



Исследование термодинамических параметров воздушной среды на линиях метрополитенов с однопутными и двухпутными тоннелями

С. Г. Гендлер¹  , М. С. Крюкова¹  , Е. Л. Алферова²  ¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация² Институт горного дела СО РАН им. Н. А. Чинакала, г. Новосибирск, Российская Федерация s215068@stud.spmi.ru

Аннотация

Актуальность проблемы термодинамических параметров воздушной среды на линиях метрополитенов заключается в существенной разнице температур воздуха городов России и городами зарубежных стран. Данная температурная разница определяет и закономерности формирования аэротермодинамических параметров воздушной среды, которые необходимо учитывать при выборе способов обеспечения нормативных климатических параметров воздуха. Исследование, представленное в статье, проводилось с целью установления на основе экспериментальных данных закономерностей протекания аэротермодинамических процессов для последующей разработки рекомендаций по нормированию параметров воздушной среды в тоннелях метрополитена (однопутных и двухпутных), расположенных на разной глубине заложения. Основные задачи сводятся к определению факторов, оказывающих влияние на установление распределения температур (влажностей) и закономерностей их изменения, проведение инструментальных измерений распределения температур (влажностей) воздуха по длине исследуемых участков перегонных тоннелей как при отсутствии поездов, так и при их движении с различной интенсивностью; разработке предложений по использованию выявленных закономерностей для обеспечения нормативных параметров воздушной среды. Идея статьи состоит в том, что в качестве основы для выбора технических решений по совершенствованию систем вентиляции метрополитенов следует принимать выявленные особенности формирования аэротермодинамических процессов, зависящих от конструктивных параметров перегонных тоннелей и глубины их заложения. На основе выполненных экспериментальных исследований были выявлены закономерности формирования вентиляционных и тепловых режимов однопутных, двухпутных тоннелей и участка сопряжения и предложены мероприятия по совершенствованию вентиляционного и теплового режимов, обеспечивающих нормативные климатические условия. В частности, было установлено, что в однопутных тоннелях глубокого заложения тепловой режим определяется наличием циркуляционных контуров между соседними станциями, которые возникают в результате поршневого эффекта, и тепловыделениями от движущихся поездов; отличием циркуляционных контуров, сформировавшихся в подземных сооружениях мелкого заложения однопутного типа, является наличие плотной аэродинамической связи с поверхностью. Тем самым подземные сооружения мелкого заложения насыщаются поверхностным воздухом, который поступает на станции и в тоннели по пешеходным путям и наклонным ходам; в подземных сооружениях двухпутного типа при отсутствии движения подвижных составов характер изменения температуры воздуха по длине перегона определялся количеством теплоты, которая была аккумулирована грунтом в период движения поездов. Во время движения теплоты, выделяемая поездами, движущимися навстречу друг другу при практическом отсутствии поршневого эффекта, равномерно распределяется по длине перегона. Это обуславливает постоянную температуру воздуха в тоннелях за исключениями участков, непосредственно прилегающих к станциям, где в период торможения и остановки поездов количество продуцируемой ими теплоты максимально, соответственно, температура тоннельного воздуха в пристанционных выработках увеличивается на 2–3 °С в сравнении с температурой на перегонах. На участках, включающих два типа подземных сооружений, возможный рост температуры воздуха на станции, прилегающей к однопутным тоннелям, связан с образованием циркуляционных контуров между участком сопряжения разных типов конструкции тоннелей и станцией, прилегающей к ним. Также разработаны рекомендации по нормализации аэротермодинамического режима для рассмотренных типов тоннелей: при установленной возможности превышения в летнее время температурой воздуха нормативных параметров (значений) необходимо предусмотреть или резерв по его расходу, или его охлаждение в сбойках, прилегающих к станциям. Для повышения температуры воздуха могут быть использованы организационные, аэродинамические и теплотехнические методы.

**Ключевые слова**

метрополитен, тоннели, однопутные тоннели, двухпутные тоннели, эксплуатация тоннелей, вентиляция тоннелей, схемы проветривания тоннелей, вентиляционный режим, тепловой режим

Для цитирования

Gendler S. G., Kryukova M. S., Alferova E. L. Investigation of thermodynamic parameters of the air environment in subway lines with single-track and double-track tunnels. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):250–262. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-02-223>

SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research paper

Investigation of thermodynamic parameters of the air environment in subway lines with single-track and double-track tunnels

S. G. Gendler¹  , M. S. Kryukova¹   , E. L. Alferova²  

¹ *Empress Catherine II St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation*

² *N. A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

 s215068@stud.spmi.ru

Abstract

The study of thermodynamic parameters in the air environment of subway lines is of particular relevance due to the substantial differences in air temperatures between Russian cities and those abroad. These temperature variations influence the formation of aerothermodynamic characteristics, which must be considered when selecting methods to ensure compliance with standard climatic parameters in subway systems. The objective of the study presented in this article was to identify, based on experimental data, the patterns governing aerothermodynamic processes, with the aim of providing recommendations for the standardization of air environment parameters in subway tunnels (both single- and double-track) located at different depths. The primary tasks of the research involved identifying the factors influencing the distribution and variation of temperature and humidity, conducting instrumental measurements of temperature and humidity distribution along the length of the transit tunnel sections under investigation, both in the absence of trains and during varying intensities of train movement. Proposals were then developed to apply the identified patterns in maintaining standard air parameters. The article posits that the selection of technical solutions for improving subway ventilation systems should be based on the unique features of aerothermodynamic processes, which depend on the structural characteristics of the transit tunnels and their depth. Experimental studies revealed the patterns governing the formation of ventilation and thermal regimes in single-track and double-track tunnels, as well as at junction sections, and provided recommendations for optimizing ventilation and thermal regimes to ensure compliance with climatic standards. Specifically, the study found that in deep single-track tunnels, the thermal regime is influenced by the presence of circulation loops between adjacent stations, created by the piston effect and the heat emissions from moving trains. Circulation loops in shallow single-track tunnels, by contrast, are characterized by strong aerodynamic connections with the surface, as surface air enters the stations and tunnels via pedestrian walkways and inclined passages. In double-track underground structures, in the absence of train movement, the variation in air temperature along the length of the transit tunnel is determined by the amount of heat accumulated in the surrounding ground during periods of train operation. When trains are in motion, the heat emitted by trains moving in opposite directions is evenly distributed along the tunnel, due to the near absence of a piston effect, resulting in a stable air temperature throughout the tunnel. However, the sections adjacent to stations experience localized increases in air temperature due to the maximum heat generated during braking and train stops, with tunnel air temperatures in these sections rising by 2–3 °C compared to those in the transit sections. In sections where both single-track and double-track tunnels are present, a potential rise in air temperature at the station adjacent to single-track tunnels is associated with the formation of circulation loops between the junction of different tunnel types and the station itself. Recommendations for normalizing the aerothermodynamic regime in the various tunnel types studied include provisions for mitigating potential summer air temperature increases above the standard levels by either increasing air flow or cooling the air in cross passages adjacent to stations. Methods for increasing air temperature may include organizational, aerodynamic, and heat engineering techniques.

Keywords

subway, tunnels, single-track tunnels, double-track tunnels, tunnel operation, tunnel ventilation, ventilation schemes, ventilation regime, thermal regime

For citation

Gendler S. G., Kryukova M. S., Alferova E. L. Investigation of thermodynamic parameters of the air environment in subway lines with single-track and double-track tunnels. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):250–262. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-02-223>



Введение

В настоящее время в России работают метрополитены в семи крупных городах. Каждый из метрополитенов обладает своей спецификой с части конструктивного исполнения, технологических подходов при сооружении и эксплуатации, инженерного обеспечения функционирования, включая системы вентиляции (табл. 1).

Как следует из табл. 1, подавляющее большинство линий метрополитенов состоит из однопутных тоннелей как глубокого, так и мелкого заложения. Вместе в тем в последние годы на метрополитенах Москвы и Санкт-Петербурга началось сооружение двухпутных тоннелей, чему способствовало развитие современных строительных геотехнологий на основе тоннельных механизированных проходческих щитов (ТМПК) [1]. Применение ТМПК позволяет осуществлять сооружение двухпутных тоннелей даже в сложных инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга [2].

Перспективы использования двухпутных тоннелей доказаны многолетним периодом их эксплуатации во многих мегаполисах мира. Как свидетельствуют публикации [3], даже в условиях жаркого климата проектные решения по вентиляции двухпутных тоннелей дают возможность обеспечить при их эксплуатации более комфортные условия по термодинамическим параметрам воздуха по сравнению с их однопутными аналогами.

В России тоннели с двумя путями в одном поперечном сечении благополучно эксплуатируются в Москве и Санкт-Петербурге. В будущем рассматривается проект создания двухпутных перегонов в Новосибирске и Екатеринбурге.

Данные исследований [4, 5] свидетельствуют о том, что к числу главных факторов, формирующих аэротермодинамические характеристики воздушной среды в тоннелях, относятся: метеорологические условия наружного воздуха (табл. 2); геометрические параметры трассы тоннеля, влияющие на энергетические затраты

Таблица 1

Характеристика метрополитенов России [составлено авторами]

№ п/п	Город	Количество станций, шт.	Состав линий метрополитена				Системы обеспечения НПВС	
			Линии с однопутными тоннелями		Линии с двухпутными тоннелями		Вентиляция	Прогрев (охлаждение)
			Протяженность, км	Глубина заложения, м	Протяженность, км	Глубина заложения, м		
1	Москва	306	~1010	~60	~11,57	~17–46	Да	Нет (Да)
2	Санкт-Петербург	72	~114	~70	~10,94	~10–68	Да	Нет (Да)
3	Нижний Новгород	16	~22	~10	–	–	Да	Да (Да)
4	Казань	11	~16,9	~10	–	–	Да	Нет (Нет)
5	Самара	10	~11,6	~20	–	–	Да	Да (Да)
6	Екатеринбург	9	~13,8	20	–	–	Да	Да (Да)
7	Новосибирск	13	~15,9	10	–	–	Да	Да (Да)

Таблица 2

Климатические условия в городах России, где эксплуатируется метрополитен [составлено авторами]

№ п/п	Город	Температуры атмосферного воздуха	
		Среднегодовая температура, °С	Температура ср. зимняя / ср. летняя / ср. январская / ср. июльская °С
1	Москва	7,00	–7,5 / 20,3 / –5,5 / 20,5
2	Санкт-Петербург	6,75	–6,75 / 19,17 / –4,5 / 19,5
3	Нижний Новгород	5,88	–11,75 / 19,67 / –8,5 / 20
4	Казань	5,25	–15,5 / 20 / –10 / 20,5
5	Самара	7,08	–13,25 / 7,08 / –9 / 22
6	Екатеринбург	4,08	–18,75 / 18,5 / –10,5 / 20
7	Новосибирск	2,67	–29,5 / 17,67 / –13,5 / 19
8	Мадрид	17,42	18,25 / 28 / 7 / 30,5
9	Рим	18,29	10,17 / 27,83 / 7,5 / 29
10	Лондон	13,29	13,25 / 20,16 / 6,5 / 21,5
11	Турин	13,71	10,25 / 22,67 / 5 / 24
12	Пекин	13,46	–4,25 / 26,33 / –2 / 27,5



на движение составов метрополитена; параметры движения поездов: скорость и интенсивность (парность, т.е. количество пар поездов в течение часа), глубина расположения относительно поверхности, тип перегонных тоннелей (однопутные или двухпутные), схема проветривания, наличие на перегонах между станциями дополнительных выработок (сбоек между однопутными тоннелями, вентиляционных сооружений для обеспечения подачи воздуха и т.п.).

В табл. 2 позиции 8–12 иллюстрируют разницу между температурами воздуха в городах России, где расположены метрополитены, и городами зарубежных стран, в которых этот вид транспорта получил значительное развитие.

Суровый климат России существенно влияет на характеристики аэротермодинамики атмосферного воздуха, что необходимо учитывать при разработке мер по поддержанию оптимальных климатических условий [6].

Целью данного исследования является установление на основе экспериментальных данных закономерностей протекания аэротермодинамических процессов для последующей разработки рекомендаций по нормированию параметров воздушной среды в тоннелях метрополитена (однопутных и двухпутных), расположенных на разной глубине заложения.

В работе использовалась методика экспериментальных исследований, описанная в [7]. Математический аппарат моделей для прогноза термодинамических параметров воздуха в системах подземного транспорта позволяет достаточно надежно верифицировать результаты экспериментов [8].

Экспериментальные исследования проводились в разных тоннельных сооружениях. В однопутных и двухпутных тоннелях глубокого и мелкого заложения метрополитена Санкт-Петербурга и в однопутных тоннелях мелкого заложения метрополитена Новосибирска.

Основные задачи, решаемые в ходе осуществления исследований, сводятся к следующему:

1. Инструментальные измерения распределения температур (влажностей) воздуха по длине исследуемых участков перегонных тоннелей как при отсутствии поездов, так и при их движении с различной интенсивностью (измеряемой количеством пар поездов в час, пар/ч);

2. Определение основных факторов, оказывающих влияние на установленные распределения температур (влажностей);

3. Установление закономерностей изменения температур и влажностей;

4. Разработка предложений по использованию выявленных закономерностей для обеспечения нормативных параметров воздушной среды.

Идея статьи состоит в том, что в качестве основы для выбора технических решений по совершенствованию систем вентиляции метрополитенов следует принимать выявленные особенности формирования аэротермодинамических процессов, зависящих от конструктивных параметров перегонных тоннелей и глубины их заложения.

Вентиляционные и тепловые режимы однопутных тоннелей глубокого заложения

Как следует из табл.1, основные линии метрополитенов Санкт-Петербурга включают однопутные тоннели, глубина заложения которых более 50 м.

Сотрудниками Санкт-Петербургского горного университета совместно с ГУП «Петербургский метрополитен» в течение летнего периода 2023 г. были выполнены натурные измерения температуры и относительной влажности тоннельного воздуха на участке третьей Невско-Василеостровской линии (перегоны между станциями «Приморская» – «Василеостровская» – «Гостиный двор»).

Измерения температуры в периоды движения и отсутствия поездов осуществлялись термографами iButton Temperature Loggers, имеющими погрешность $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Термографы были размещены по длине вышеуказанных перегонов (рис. 1).

В вентиляционных каналах термографы крепились на вертикальных тяжах, в транспортных зонах – прикреплялись к обделке тоннелей. Измерения проводились с интервалом 120 с в течение семи дней, а их значения сохранялись в запоминающем устройстве термографа. Раз в неделю датчики снимались, а информация переносилась на электронный носитель (персональный компьютер) через специальное устройство приема.

Регистрация значений температуры поверхности обделки и относительной влажности выполнялась в периоды отсутствия движения поездов и осуществлялась соответственно инфракрасным пирометром и гигрометром (TESTO 625).

Проветривание тоннелей на перегонах «Приморская» – «Василеостровская» и «Василеостровская» – «Гостиный двор» во время проведения замеров при отсутствии и движении поездов осуществлялось соответственно по схемам, предусматривающим подачу наружного воздуха на станции и близлежащие сбойки с последующим удалением воздуха по шахтам на перегоне, и при подаче наружного воздуха через станционную и перегонную шахты с удалением исходящей струи со станции «Гостиный двор».

На выбранном участке, в частности «Приморская» – «Василеостровская», в режиме притока/вытяжки работали вентиляционные агрегаты при 100%-ной мощности: BOM-24P, FTDA-REV-200 с расходами воздуха $\sim 46\text{--}56,4\text{ м}^3/\text{с}$ и скоростью воздуха $\sim 4,6\text{--}5,64\text{ м/с}$ при депрессии вентиляторов $\sim 922\text{--}1100\text{ Па}$.

На перегоне «Василеостровская» – «Гостиный двор» – BOM-18P, BOM-18-01, FTDA-REV-180, FTDA-REV-200. Расходы воздуха $\sim 48,6\text{--}74,8\text{ м}^3/\text{с}$ (скорость $\sim 4,86\text{--}7,48\text{ м/с}$) при депрессии вентиляторов $\sim 990\text{--}1520\text{ Па}$.

Результаты замеров представлены на рис. 2, 3.

На рис. 2 показан график распределения температуры воздуха, поверхности обделки и влажности в тоннелях на перегонах «Приморская» – «Василеостровская» – «Гостиный двор» при отсутствии движения поездов.

Изменение распределения температуры воздуха в тоннеле по длине перегонов имеет немонотонный характер. Максимальное значение наблюдается в районе станции, а минимальное в серединной части перегона. Это связано с особенностями использования разных схем вентиляции в разное время суток.

Следует отметить, что температура воздуха имеет более низкие значения, чем температура поверхности обделки тоннеля, из-за прогрева грунта в дневной период, когда движение поездов является дополнительным источником тепла. Относительная влажность воздуха варьируется в интервале 60–70 %.

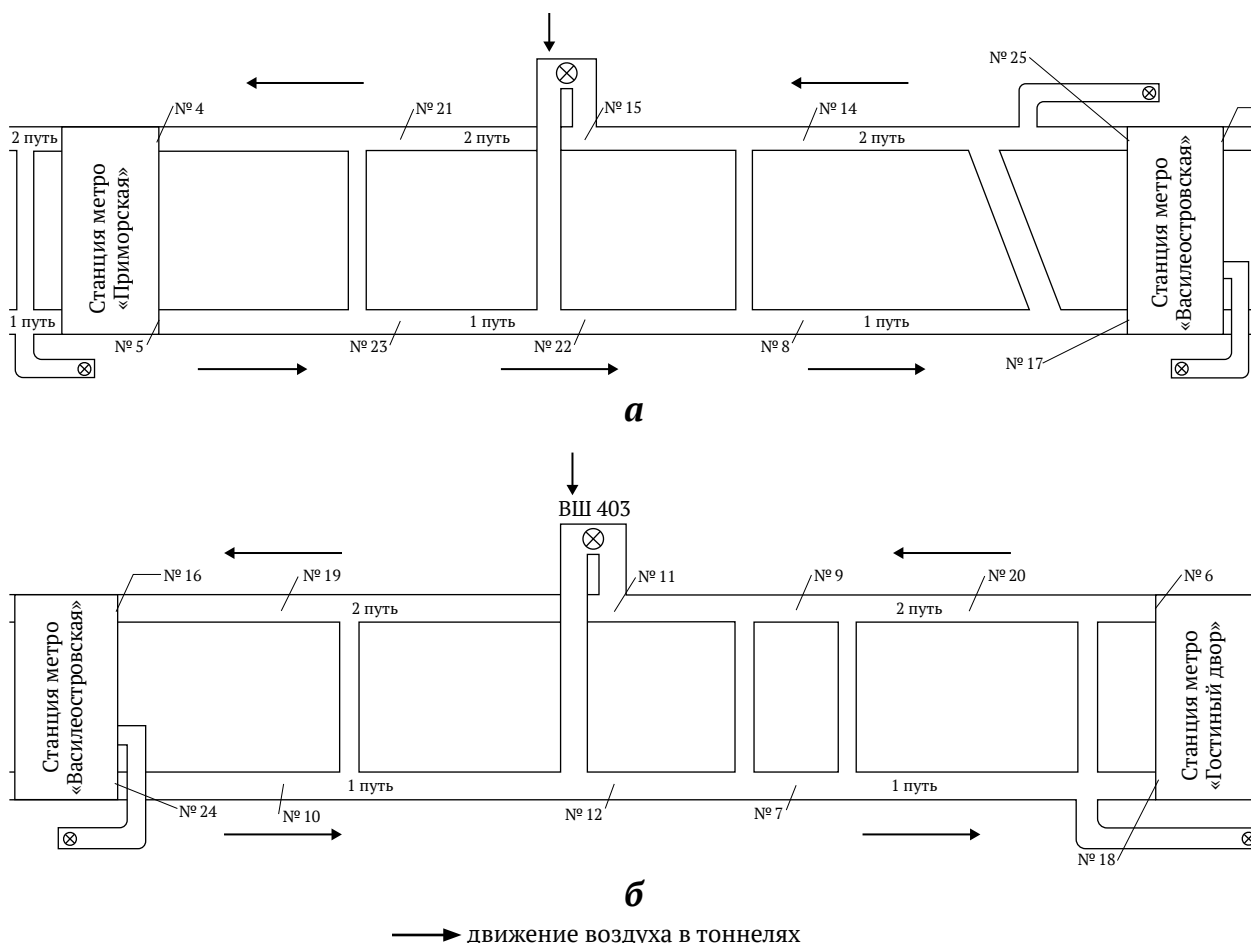


Рис. 1. Схема расположения датчиков для измерения температуры воздуха на участке однопутных тоннелей трех линий метрополитена:

а – перегон «Приморская» – «Василеостровская»; б – перегон «Василеостровская» – «Гостиный двор» [составлено авторами]

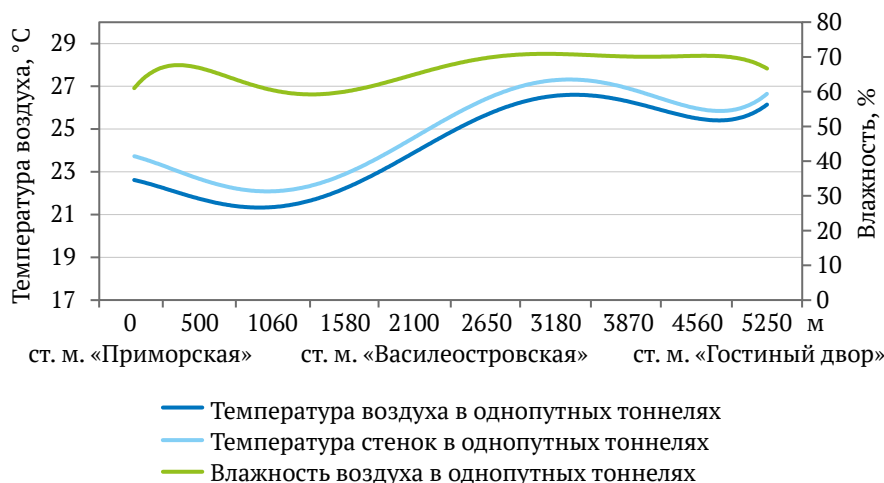


Рис. 2. Распределение температур воздуха и стенок, влажности воздуха на перегоне

«Приморская» – «Василеостровская» – «Гостиный двор» при отсутствии движения поездов [составлено авторами]

Распределение температур воздуха по длине перегонов при движении поездов представлено на рис. 3.

Анализ результатов измерений показывает, что характер изменения температуры воздуха по длине перегонов в целом повторяет аналогичное распределение при отсутствии движения поездов за исключением определенной разницы в их значениях для тоннелей на первом и втором путях.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что средняя температура воздуха на перегонах и станциях может превышать температуру воздуха на поверхности на $\sim 14^\circ\text{C}$.

Причинами этого явления являются: значительное выделение тепла на участках между станциями (перегонах); использование в дневное время схем подачи свежего воздуха через вентиляционные стволы, что приводит к образованию циркуляционных контуров.

На участке тоннеля от точки смешения с наружным воздухом до станции на изменение температуры воздуха оказывают влияние несколько факторов,

например, увеличение расхода воздуха и выделение тепла движущимися поездами, процессы теплообмена между воздухом, конструкциями тоннеля и вмещающимися породами, а также процессы массообмена [9].

В то же время рост интенсивности движения поездов создает двусторонний эффект: с одной стороны, возрастает общее количество выделяемого тепла, а с другой – увеличивается расход воздуха в циркуляционных потоках.

Опираясь на разработанное методическое обеспечение, позволяющее определять параметры воздухораспределения в пристанционной вентиляционной сбойке метрополитена с учетом поршневого действия поездов, авторы исследования провели ряд расчетов тепловыделения и расхода воздуха в циркуляционных потоках при движении поездов для количественной оценки взаимовлияния указанных факторов.

Исходные данные для расчетов: средняя скорость поезда – 50 км/ч; число вагонов – 8; сечение тоннеля – 21 м^2 ; длина перегонов – 500–3500 м. Основные результаты расчетов представлены на рис. 4.

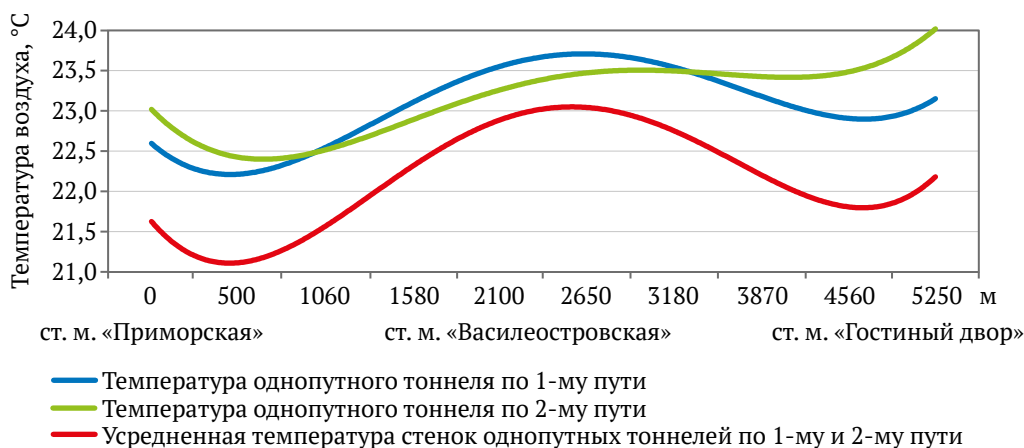


Рис. 3. Распределение температур воздуха и стенок, влажности на перегоне «Приморская» – «Василеостровская» – «Гостинный двор» при движении 24 пар поездов в часы пик [составлено авторами]

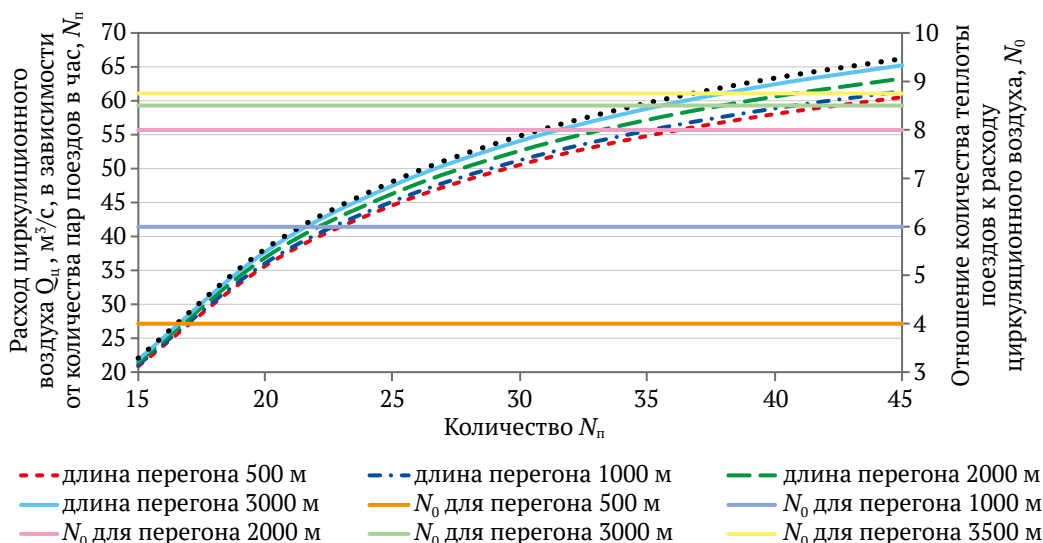


Рис. 4. Расход циркуляционного воздуха $Q_{\text{ц}}$, отношение количества теплоты от поездов к расходу циркуляционного воздуха (сплошная линия) в зависимости от интенсивности движения поездов $N_{\text{п}}$ (пар/ч)



Анализ полученных данных демонстрирует, что при одновременном увеличении парности поездов с 15 до 45 пар в час и длины перегона с 500 до 3500 м количество циркуляционного воздуха $Q_{\text{ц}}$ увеличивается в 2,5 раза. Вместе с тем, оказывается, что отношение количества теплоты, выделяемой от поездов, к расходу циркуляционного воздуха N_0 не зависит от интенсивности движения и при разных длинах перегонов варьируется от 4 до 8,75. При этом отношение N_0 постоянно для каждой длины перегона.

Таким образом, можно утверждать, что температура воздуха в транспортных зонах тоннелей практически не зависит от парности движения поездов.

Вместе с тем увеличение расхода циркуляционного воздуха может привести к другому негативному эффекту – увеличению концентрации взвешенной пыли, особенно в весенний период, когда наблюдается повышенная концентрация пыли в атмосфере. Это предположение подтверждается рядом проведенных исследований [12].

При эксплуатации однопутных тоннелей глубокого заложения в возникающих циркуляционных контурах аккумулируется часть теплоты от подвижного состава и других источников. В летний период это приводит к повышению температуры тоннельного воздуха, поступающего на станции (см. рис. 2, 3). Для снижения температуры воздуха можно предусмотреть установку вентиляционных сбоек непосредственно у станций холодильного оборудования, описанного в [10].

В зимний период циркуляционный воздух, смешиваясь на перегоне с холодным наружным воздухом, способствует достижению на станциях положительной температуры.

Таким образом, циркуляционные контуры играют двойную роль: в летний период теплота, аккумулированная в них, провоцирует дополнительный подогрев воздуха и прогрессирующий прогрев вмещающих пород; зимой, наоборот, циркуляционный воздух дает возможность обеспечить на станциях и в тоннелях положительную температуру [13].

Вентиляционные и тепловые режимы однопутных тоннелей мелкого заложения

Отличительной особенностью аэродинамических процессов в однопутных тоннелях мелкого заложения по сравнению с аналогичными процессами в тоннелях глубокого заложения является то, что образующиеся на перегонах между станциями (или сбояками) циркуляционные контуры имеют тесную аэродинамическую связь с поверхностью [14].

При глубоком заложении линий метрополитена распределения температур по длине циркуляционных контуров формируются в горизонтальной плоскости и определяются только расходом воздуха, инициируемым движущимися по параллельным тоннелям поездами, и количеством теплоты, выделяемой ими. При мелком заложении на распределение температуры оказывает значительное влияние наружный воздух, поступающий в выработки через сбойки и пешеходные пути, которым подпитываются циркуляционные контуры, в том числе даже при неработающих вентиляторах.

То есть можно утверждать, что циркуляционный контур формируется как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях. Данный вывод подтверждается данными измерений скоростей воздуха на станции «Площадь Гагарина-Михайловского», «Речной вокзал», «Сибирская» и др. в г. Новосибирске.

Смешение циркуляционного воздуха с наружным воздухом приводит к изменению температурного распределения по длине циркуляционного контура. Если в летний и весенний периоды такие изменения не приводят к нарушению нормативных показателей, то в зимний период температура воздуха на станциях может существенно отличаться от этих показателей в сторону понижения, что требует подогрева наружного воздуха, поступающего вследствие действия поршневого эффекта.

На основании выполненных экспериментальных исследований и численных расчетов можно сформулировать ряд предложений по управлению проветриванием линий метрополитена мелкого заложения в условиях Новосибирска (рис. 5) [15].



Рис. 5. Подходы по управлению проветриванием линий метрополитена мелкого заложения в условиях Новосибирска [составлено авторами]

Вентиляционные и тепловые режимы двухпутных тоннелей

Натурные исследования термодинамических параметров воздуха в двухпутных тоннелях на участках: «тупик» – «Беговая» – «Зенит» – точка сопряжения с однопутными тоннелями, выходящими на станцию «Приморская» (рис. 6), были также осу-

ществлены летом 2023 г. Расстановка датчиков для измерения термодинамических параметров воздуха показана на рис. 7.

Методика проведения измерений и используемое приборное обеспечение соответствовали методике и приборному обеспечению, использованному в однопутных тоннелях.

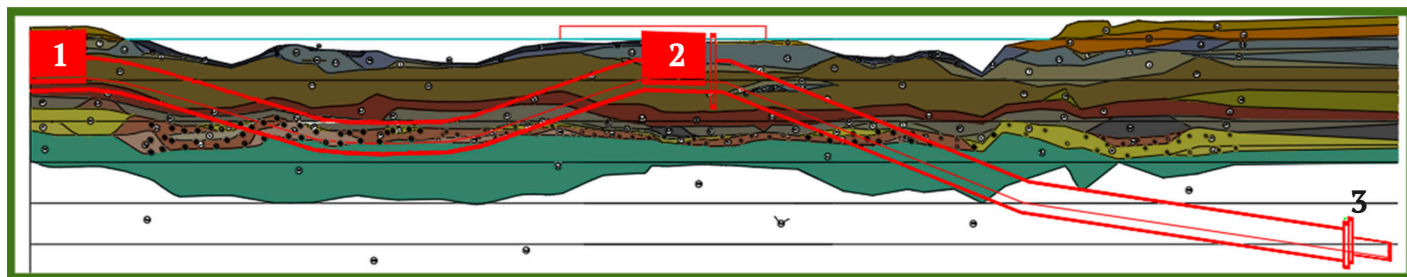


Рис. 6. Профиль перегона двухпутного участка:

1 – ст. м. «Беговая»; 2 – ст. м. «Зенит»; 3 – точка сопряжения однопутных и двухпутных тоннелей [составлено авторами]

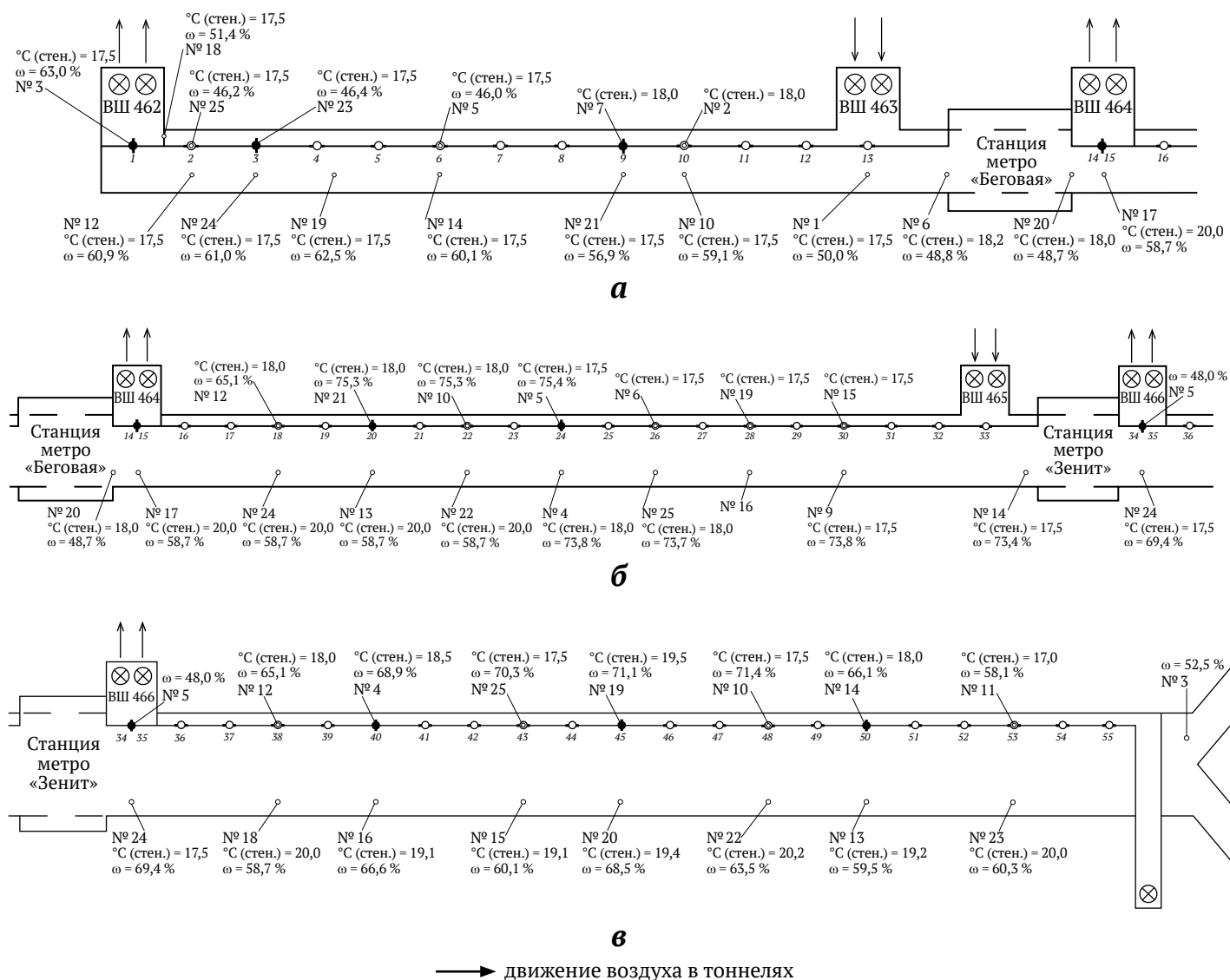


Рис. 7. Схема расположения датчиков температуры воздуха на двухпутном участке третьей линии метрополитена: а – перегон «тупик» – «Беговая»; б – перегон «Беговая» – «Зенит»; в – часть перегона «Зенит» – «Приморская» до точки сопряжения однопутных и двухпутных тоннелей [составлено авторами]



На выбранных перегонах («тупик» – «Беговая» – «Зенит» – «Приморская») для подачи свежего воздуха (через пристанционные вентиляционные шахты) использовались агрегаты Zitron ZVR1-18-75/6, ZVN 1-20-75/6, FTDA-REV-200. Работа при 80 % мощности обеспечивала ~51 м³/с и скорость воздуха ~5,6 м/с при депрессии вентиляторов 925 Па.

Удаление воздуха из тоннелей осуществлялось агрегатами FTDA-REV-180, расположенными в вентиляционных шахтах станций «Беговая», «Зенит» и в тупике. Работа агрегатов при 80 % мощности обеспечивала расходы воздуха ~42 м³/с (скорость ~5,6 м/с), депрессия вентиляторов 925 Па.

На рис. 8 и 9 представлены графики, демонстрирующие распределение температуры воздуха, температуры поверхности обделки тоннеля и уровня влажности на участке «Беговая» – «Зенит» в периоды отсутствия движения поездов. Во время проведения измерений температура наружного воздуха составляла 7 °С, а относительная влажность – 55 %.

В случае отсутствия движения подвижных составов вариации температурного режима вдоль участка пути обусловлены величиной тепла, запасенного почвой во время прохождения поездов, что подтверждается превышением температуры поверхности обделки над температурой воздуха и характером распределения по длине перегона подаваемого

вентиляторами воздуха. Несмотря на тепло, выделяемое грунтом, температура воздуха вдоль участка уменьшается по мере удаления от станции «Зенит» из-за притока наружного воздуха с существенно более низкой температурой, чем температура поверхности обделки. Относительная влажность воздуха вдоль участка колеблется в пределах 50–60 %.

Другая ситуация складывается в случае движения поездов (см. рис. 9). В период выполнения замеров температуры наружного воздуха показания были равны 7 °С.

В сравнении с однопутным исполнением двухпутные тоннели демонстрируют более комфортный температурный режим. Это обусловлено отсутствием циркуляционных потоков, возникающих в результате движения поездов. В однопутных тоннелях тепло, выделяемое движущимися составами, накапливается на протяжении длительного периода времени, поскольку его значительная часть не удаляется вместе с исходящей струей воздуха из метрополитена [16]. В метрополитенах с двухпутными перегонными тоннелями в связи с отсутствием циркуляционных воздушных потоков (поршневой эффект) основная масса тепла распределяется по участку пути с соблюдением равномерности [17]. Постоянство температуры воздуха обеспечивается за счёт удаления тепла, за исключением зон в непосредственной близости от станции.

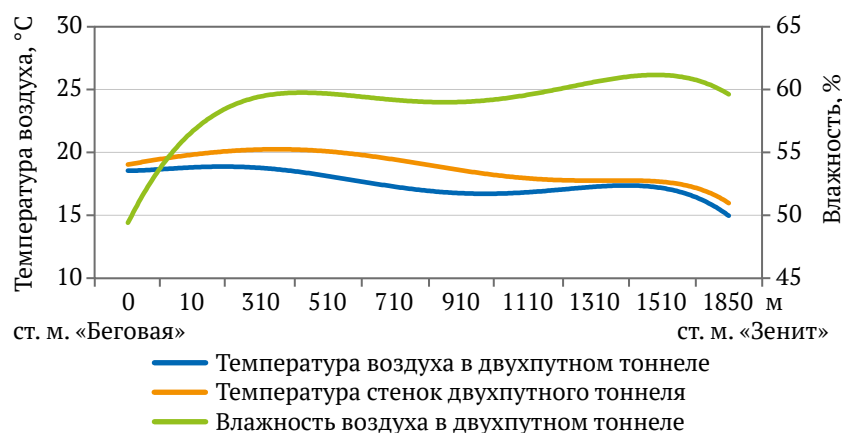


Рис. 8. Распределение температур воздуха, поверхности обделки и влажности на перегоне «Беговая»–«Зенит» при отсутствии движения поездов [составлено авторами]

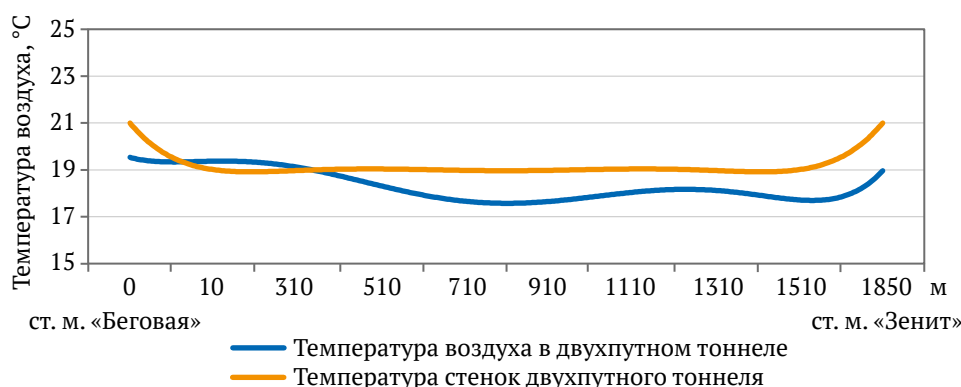


Рис. 9. Распределение температур воздуха на перегоне «Беговая» – «Зенит» при движении поездов в час пик (24 пар/ч) [составлено авторами]

В этих зонах во время торможения и остановки поездов интенсивность тепловыделения максимальна. В результате температура воздуха превышает температуру поверхности обделки, что указывает на передачу тепла грунту.

Для перегонов с двухпутными тоннелями характерно повышение температуры с увеличением интенсивности движения поездов, что связано с увеличением количества теплоты от поездов.

Вентиляционные и тепловые режимы на перегонах, включающих однопутные и двухпутные тоннели

Особенностью формирования вентиляционного и теплового режимов на рассматриваемых перегонах являются отличия в аэродинамике воздушных потоков в двухпутном и однопутном тоннелях. Участки с однопутными тоннелями проветриваются за счет принудительной вентиляции и поршневого эффекта, при этом на отрезке между точкой сопряжения двухпутных и однопутных тоннелей и станциями,

ближайшими к сопряжению, возникает циркуляционный контур [18].

Проветривание же двухпутных тоннелей осуществляется только за счет работы шахтных вентиляторов.

При отсутствии поездов распределение температур и влажностей по длине перегона от станции «Зенит» до станции «Приморская» идентично распределению для двухпутных и однопутных тоннелей (рис. 10). В период выполнения замеров температура и влажность наружного воздуха были равны 13 °C и 69% соответственно.

В ситуации движения поездов в условиях, когда температура воздуха за соединительным узлом с двухпутными тоннелями соответствует температурному распределению, характерному для однопутных тоннелей, возможна ситуация превышения температуры по абсолютной величине в сравнении с аналогичными показателями в однопутных тоннелях (рис. 11). В период выполнения замеров температуры наружного воздуха показания были равны 17 °C.

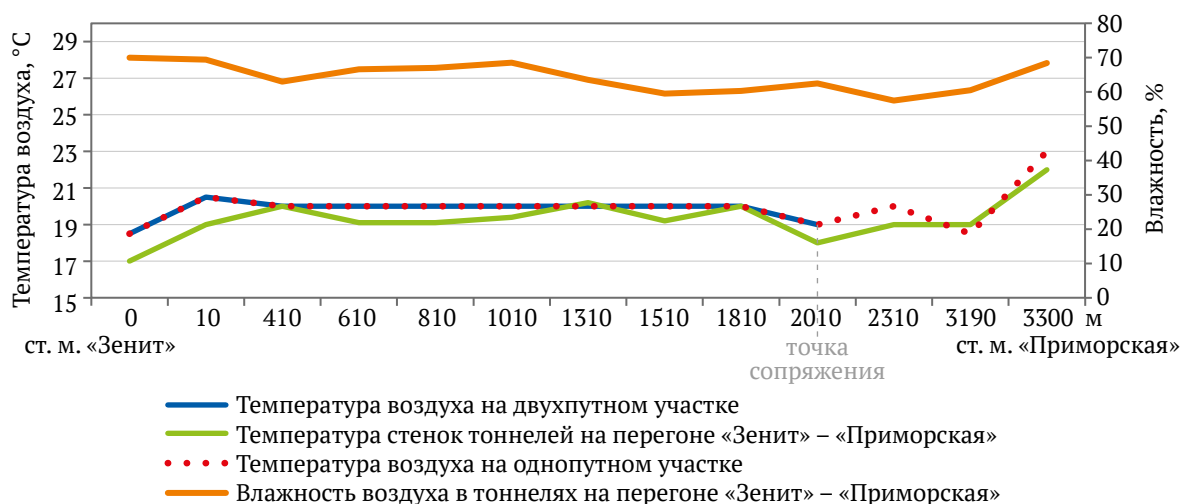


Рис. 10. Распределение температур воздуха на перегоне «Зенит»–«Приморская» при отсутствии движения поездов, точка сопряжения – место, где двухпутный тоннель переходит в два однопутных [составлено авторами]

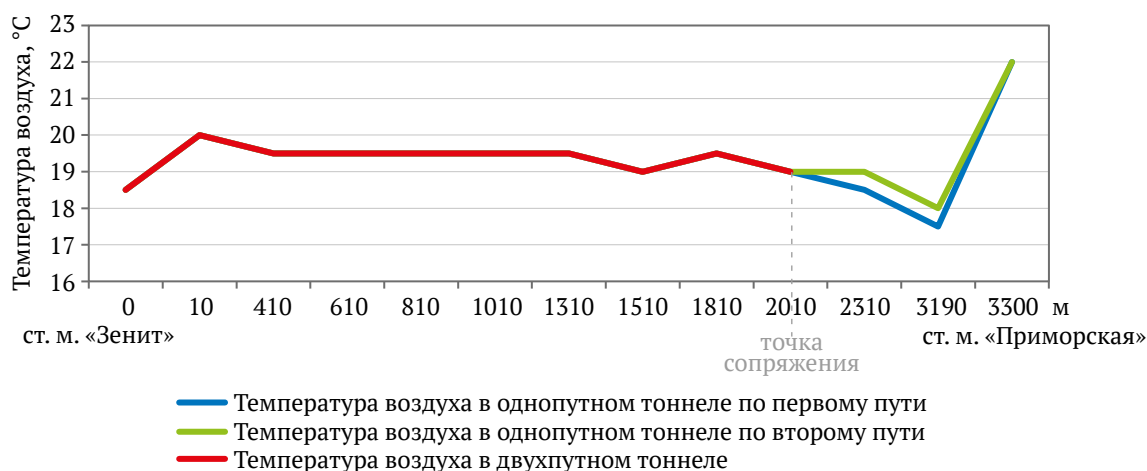


Рис. 11. Распределение температур воздуха на перегоне «Зенит» – «Приморская» при движении поездов в час пик (24 пар/ч) [составлено авторами]



Вышесказанное подтверждается результатами измерений, демонстрирующих, что температура воздуха, в двухпутном тоннеле перед точкой сопряжения на отметке 2010 м от станции «Зенит» составляющая 19,5 °С, на станции «Приморская» повышается до 22–23 °С. Причиной этого является подпитка циркуляционного контура на однопутном участке перегона воздухом из двухпутного тоннеля, который имеет более высокую температуру, чем наружный воздух, подаваемый с поверхности, как при классической схеме проветривания.

Для понижения температурного режима в однопутных тоннелях возможно применение метода вентиляции с использованием наружного воздуха. Данный метод предусматривает подачу свежего воздуха извне в двухпутный тоннель посредством специально спроектированной шахты, расположенной в конце двухпутного участка.

Выводы

На основе выполненных экспериментальных исследований были выявлены закономерности формирования вентиляционных и тепловых режимов однопутных, двухпутных тоннелей и участка сопряжения и предложены мероприятия по совершенствованию вентиляционного и теплового режимов, обеспечивающих нормативные климатические условия. В частности, было установлено, что:

1. В глубоких однопутных тоннелях температурный режим формируется под воздействием двух основных факторов: циркуляции воздуха между станциями, обусловленной поршневым эффектом, и тепловыделения от движущихся составов. Распределение температуры вдоль перегонов характеризуется неравномерностью, с минимальными значениями в середине и максимальными – на станциях. Это явление обусловлено схемой вентиляции, предусматривающей подачу свежего воздуха на перегоны и его удаление на станциях. При увеличении интенсивности движения поездов значительного изменения температуры воздуха не наблюдается, что объясняется ростом расхода циркуляционного воздуха.

2. В однопутных тоннелях мелкого заложения образующийся между станциями циркуляционный контур подпитывается наружным воздухом, поступающим на станции и тоннели по пешеходным путям. В летний период это явление не оказывает существенного влияния на характер распределения температур. В зимний период указанное явление может привести к понижению температуры на станциях до критических значений.

Обеспечение нормативных параметров воздуха на станциях в зимний период года может быть реализовано организационными, аэродинамическими и теплотехническими методами. Первые связаны со

снижением поршневого действия за счет уменьшения скорости прибывающих и уходящих поездов. Вторые – с повышением аэродинамического сопротивления участков вентиляционной сети, обеспечивающих движение холодного атмосферного воздуха или за счет внутренних циркуляционных контуров. Третьи – с применением систем подогрева поступающего наружного воздуха (воздушно-тепловые завесы).

3. В двухпутных тоннелях при отсутствии поездов характер изменения температуры воздуха по длине перегона определялся количеством теплоты, которая была аккумулирована грунтом в период движения поездов. Во время движения теплота, выделяемая поездами, движущимися навстречу друг другу при практическом отсутствии поршневого эффекта, равномерно распределяется по длине перегона. Это обуславливает постоянную температуру воздуха в тоннелях, за исключением участков, непосредственно прилегающих к станции, где в период торможения и остановки поездов количество продуцируемой ими теплоты максимально. В результате температура воздуха на этих участках повышается на 2–3 °С относительно температуры в тоннелях.

На перегонах, где присутствуют как двухпутные, так и однопутные тоннели, повышение температуры воздуха на станции, расположенной рядом с однопутными тоннелями, обусловлено образованием циркуляционных потоков между зоной соединения двухпутного и однопутных тоннелей и прилегающей к ним станцией.

4. Рекомендации по нормализации аэротермодинамического режима для рассмотренных типов тоннелей сводятся к следующему:

– при установленной возможности превышения в летнее время температурой воздуха нормативных параметров (значений) необходимо предусмотреть или резерв по его расходу, или его охлаждение в сбойках, прилегающих к станциям;

– для повышения температуры воздуха могут быть использованы организационные, аэродинамические и теплотехнические методы: первые связаны со снижением поршневого действия за счет уменьшения скорости подвижных составов; вторые заключаются в повышении аэродинамического сопротивления участка вентиляционной сети, связанного с притоком наружного воздуха; третьи – в создании систем подогрева холодного внешнего воздуха (воздушно-тепловые завесы);

– на перегонах, включающих двухпутный и однопутные тоннели, возможное повышение температуры воздуха на станции, прилегающей к однопутным тоннелям, может быть компенсировано за счёт подачи наружного воздуха в двухпутный тоннель через шахту, сооружённую в конце двухпутного участка.

Список литературы / References

1. Юнгмейстер Д. А., Ячейкин А. И. Обоснование рациональной конструкции исполнительного органа тоннелепроходческого щита для условий шахт Метростроя Санкт-Петербурга. *Записки Горного института*. 2021;249:441–448. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.13>
Yungmeister D. A., Yacheykin A. I. Rational design justification of the tunnel boring shield executive body for the conditions of the mines of Saint Petersburg Metrostroy. *Journal of Mining Institute*. 2021;249:441–448. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.13>



2. Дашко Р.Э., Лохматиков Г.А. Верхнекотлинские глины Санкт-Петербургского региона как основание и среда уникальных сооружений: инженерно-геологический и геотехнический анализ. *Записки Горного института*. 2022;254:180–190. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.13>
Dashko R.E., Lokhmatikov G.A. The Upper Kotlin clays of the Saint Petersburg region as a foundation and medium for unique facilities: an engineering-geological and geotechnical analysis. *Journal of Mining Institute*. 2022;254:180–190. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.13>
3. Maevski I. Features of tunnel ventilation systems design in hot climate. In: *Proceedings from 12th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*. Portoroz, Slovenia, 11–13 July 2006. BHR Group; 2006. Pp. 331–347.
4. Кияница Л.А. К вопросу определения аналитических зависимостей теплового потока в грунт из подземных сооружений станций закрытого типа метрополитена мелкого заложения с двухпутным тоннелем. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(2):89–102.
Kiyantsa L.A. Determining analytical dependences for heat flow in soil from enclosed-type shallow underground subway stations with double-track tunnels. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(2):89–102. (In Russ.)
5. Зедгенизов Д.В. К расчету коэффициентов автоматического регулятора производительности тоннельного вентилятора. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2021;2(3):213–218. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-2-3-213-218>
Zedgenizov D.V. To calculation of the coefficients of automatic regulator of tunnel fan capacity. *InterekspoGeo-Sibir*. 2021;2(3):213–218. (In Russ.) <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-2-3-213-218>
6. Цодиков В.Я. Глава III. Системы вентиляции тоннелей метрополитенов и основные положения их расчетов. В: *Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов*. 2-е изд. М.: Недра; 1975.
Tsodikov V.Ya. Chapter III. Ventilation systems of subway tunnels and the main provisions of their calculations. In: *Ventilation and Heat Supply of Subways*. 2nd ed. Moscow: Nedra Publ.; 1975. (In Russ.)
7. Vardy A., Hagenah B. Full-scale flow measurements in a tunnel air shaft. In: *Proceedings from 12th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*. Portoroz, Slovenia, 11–13 July 2006. BHR Group; 2006. Pp. 343–357.
8. Sahlin P., Eriksson L., Grozman P. et al. 1D models for thermal and air quality prediction in underground traffic systems. In: *Proceedings from 12th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*. Portoroz, Slovenia, 11–13 July 2006. Pp. 261–267.
9. Кияница Л.А., Унаспеков Б.А. Определение параметров воздухораспределения в пристанционной вентиляционной сбойке метрополитена от поршневого действия поездов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(12):99–109. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_12_0_99
Kiyantsa L.A., Unaspekov B.A. Estimate of air distribution in ventilation tunnel between subway station as function of piston effect. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(12):99–109. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_12_0_99
10. Гендлер С.Г., Крюкова М.С. Управление тепловым режимом линий метрополитена с однопутными тоннелями. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. 2022;(4):116–127.
Gendler S.G., Kryukova M.S. Thermal management of metro lines with single-track tunnels. *IzvestiyaTul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2022;(4):116–127. (In Russ.)
11. Гендлер С.Г., Крюкова М.С. Проблемы эксплуатации линий метрополитена с двухпутными тоннелями в условиях холодного климата. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. 2022;(2):77–87.
Gendler S.G., Kryukova M.S. Problems of operation of metro lines with double-track tunnels in a cold climate. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2022;(2):77–87. (In Russ.)
12. Смирняков В.В., Родионов В.В., Смирнякова В.В., Орлов Ф.А. Влияние формы и размеров пылевых фракций на их распределение и накопление в горных выработках при изменении структуры воздушного потока. *Записки Горного института*. 2022;253:71–81. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.12>
Smirnyakov V.V., Rodionov V.A., Smirnyakova V.V., Orlov F.A. The influence of the shape and size of dust fractions on their distribution and accumulation in mine workings when changing the structure of air flow. *Journal of Mining Institute*. 2022;253:71–81. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.12>
13. Лугин И.В., Павлов С.А., Иргibaев Т.И. Обоснование параметров кольцевых моделей при декомпозиции вентиляционной сети протяженной линии метрополитена для расчета воздухораспределения. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2022;2(3):214–220. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2022-2-3-214-220>
Lugin I.V., Pavlov S.A., Irgibaev T.I. Justification of the parameters of ring models in the decomposition of the ventilation network of an extended metro line for the calculation of air distribution. *Interekspo Geo-Sibir*. 2022;2(3):214–220. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2022-2-3-214-220>
14. Кияница Л.А., Лугин И.В., Красюк А.М. О структуре воздушного потока в пристанционных вентиляционных сбойках метрополитенов. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2021;2(3):219–229. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-2-3-219-229>
Kiyantsa L.A., Lugin I.V., Krasnyuk A.M. On air flow structure in station ventilation connections of subways. *Interekspo Geo-Sibir*. 2021;2(3):219–229. (In Russ.) <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-2-3-219-229>



15. Красюк А.М., Лугин И.В. Поддержание параметров микроклимата на тупиковой станции линии метрополитена. Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019;2(4):122–130. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2019-2-4-122-130>
Krasnyuk A.M., Lugin I.V. Keeping of microclimate parameters at terminal station of subway line. *InterekspoGeo-Sibir*. 2019;2(4):122–130. (In Russ.) <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2019-2-4-122-130>
16. Zhikharev S. Enhanced methodology for thermal management area assessment of metro lines. In: *E3S Web of Conferences. IV International Conference on Geotechnology, Mining and Rational Use of Natural Resources (GEOTECH-2024)*. 2024;525:05018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452505018>
17. Zhikharev S. Methodological approach to determining the area of air recycling on metro lines with double track tunnels. In: *E3S Web of Conferences. XIV International Conference on Transport Infrastructure: Territory Development and Sustainability (TITDS-XIV-2023)*. 2024;471:02022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447102022>
18. Каримов Д.Д. Численное моделирование аэродинамических процессов движения воздушных масс в тоннелях метрополитена с учетом «поршневого» воздействия подвижного состава. *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2022;19(1):17–27. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2022-19-1-17-27>
Karimov D. Numerical simulation of aerodynamic processes of air mass movement in underground tunnels taking into account piston impact of rolling stock. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2022;19(1):17–27. (In Russ.) <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2022-19-1-17-27>

Информация об авторах

Семен Григорьевич Гендлер – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой безопасности производств, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-7721-7246](https://orcid.org/0000-0002-7721-7246), Scopus ID [56168675100](https://orcid.org/56168675100), ResearcherID [I-9283-2017](https://orcid.org/I-9283-2017); e-mail sgendler@mail.ru

Милана Сергеевна Крюкова – аспирант кафедры безопасности производств, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-9632-3979](https://orcid.org/0000-0001-9632-3979), Scopus ID [58723622900](https://orcid.org/58723622900); e-mail s215068@stud.spmi.ru

Елена Леонидовна Алферова – инженер, научный сотрудник института горного дела СО РАН им. Н.А. Чинакала, г. Новосибирск, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-9453-2355](https://orcid.org/0000-0001-9453-2355), Scopus ID [57193708767](https://orcid.org/57193708767); e-mail alfenok.ru@gmail.com

Information about the authors

Simeon G. Gendler – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Industrial Safety, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID [0000-0002-7721-7246](https://orcid.org/0000-0002-7721-7246), Scopus ID [56168675100](https://orcid.org/56168675100), ResearcherID [I-9283-2017](https://orcid.org/I-9283-2017); e-mail sgendler@mail.ru

Milana S. Kryukova – PhD-Student of the Department of Industrial Safety, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID [0000-0001-9632-3979](https://orcid.org/0000-0001-9632-3979), Scopus ID [58723622900](https://orcid.org/58723622900); e-mail s215068@stud.spmi.ru

Elena L. Alferova – Engineer, Researcher at the Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation; ORCID [0000-0001-9453-2355](https://orcid.org/0000-0001-9453-2355), Scopus ID [57193708767](https://orcid.org/57193708767); e-mail alfenok.ru@gmail.com

Поступила в редакцию 22.02.2024

Поступила после рецензирования 12.04.2024

Принята к публикации 07.05.2024

Received 22.02.2024

Revised 12.04.2024

Accepted 07.05.2024



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-03-227>

УДК 504.4.054



Оценка эффективности очистки сточных вод угольных предприятий от взвешенных веществ различными фильтрующими материалами

Л.А. Иванова , А.Ю. Просеков  , П.П. Иванов  , Е.С. Михайлова  ,
И.В. Тимощук  , А.К. Горелкина 

Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация

✉ lyuda_ivan@mail.ru

Аннотация

Взвешенные вещества являются преобладающими загрязнителями сточных вод угольных предприятий. Базовая система очистки сточных вод, регламентируемая в НДТ № 15 ИТС-37–2017, не обеспечивает качества очистки до нормативных значений сброса в водоемы рыбохозяйственного назначения. Используемый в данной технологии метод гравитационного осаждения в прудах-отстойниках эффективен для грубодисперсных частиц. Однако формирующиеся коллоидные системы из мелкодисперсных нерастворимых фракций являются сложными для разделения в условиях гравитационного поля. В качестве эффективного метода удаления взвешенных веществ из сточных вод рекомендуем использовать фильтрование через стационарный слой фильтрующих зернистых материалов. В работе проведено исследование кинетики и динамики фильтрования взвешенных частиц из сточных вод угольных предприятий на фильтрующих материалах различной природы. Построены кривые гравитационного осаждения взвешенных веществ из карьерных сточных вод. Выявлена зависимость степени очистки сточных вод от размера фракций фильтрующих материалов. В работе приведены результаты оценки эффективности применения фильтрующих материалов природного происхождения для очистки сточных вод угольных предприятий от взвешенных веществ. Результаты экспериментов показали, что наиболее эффективным и доступным зернистым фильтрующим материалом является кварцит Бобровского месторождения, который мы рекомендуем использовать, комбинируя его фракции 2,0–5,0 и 0,7–1,2 (в соотношении 1 : 2). Определена оптимальная скорость подачи промывочных вод на этапе регенерации фильтра с зернистой загрузкой.

Ключевые слова

угольные предприятия, кварцит, взвешенные вещества, сточные воды, фильтрование, механическая очистка

Благодарности

Исследование выполнено в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 г. № 1144-р, при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, № соглашения 075-15–2022-1201 от 30.09.2022 г.

Для цитирования

Ivanova L.A., Prosekov A.Yu., Ivanov P.P., Mikhaylova E.S., Timoshchuk I.V., Gorelkina A.K. Assessment of the efficiency of wastewater treatment from coal enterprises for suspended solids using various filtering materials. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):263–270. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-03-227>



SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research paper

Assessment of the efficiency of wastewater treatment from coal enterprises for suspended solids using various filtering materials

L. A. Ivanova  , A. Yu. Prosekov  , P. P. Ivanov  , E. S. Mikhaylova  ,
I. V. Timoshchuk  , A. K. Gorelkina 

Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation

 lyuda_ivan@mail.ru

Abstract

Suspended solids are the predominant pollutants in the wastewater of coal enterprises. The basic wastewater treatment system regulated in BAT No. 15 ITC-37–2017 does not ensure water quality meets the discharge standards for fishery water bodies. The gravitational sedimentation method used in this technology is effective for coarse particles. However, colloidal systems formed from fine insoluble fractions are challenging to separate in a gravitational field. As an effective method for removing suspended solids from wastewater, we recommend filtering through a stationary layer of granular filtering materials. The study investigates the kinetics and dynamics of filtering suspended particles from the wastewater of coal enterprises using various filtering materials. Sedimentation curves of suspended solids from quarry wastewater have been constructed. The dependence of wastewater treatment efficiency on the size of filtering material fractions has been identified. The study provides an evaluation of the effectiveness of using natural filtering materials for treating wastewater from coal enterprises. The experiments demonstrated that the most efficient and cost-effective granular filtering material is quartzite from the Bobrovskoye deposit, which we recommend using in a combination of fractions 20–50 and 0.7–12 mm (in a ratio of 1 : 2). The optimal flow rate of wash water during the regeneration of the granular filter is also determined.

Keywords

coal enterprises, quartzite, suspended solids, wastewater, filtration, mechanical treatment

Acknowledgments

This research was conducted within the framework of the comprehensive scientific and technical program for the full innovation cycle “Development and Implementation of a Complex of Technologies in the Fields of Exploration and Mining of Mineral Resources, Ensuring Industrial Safety, Bioremediation, and Creating New Deep Processing Products from Coal Raw Materials while Sequentially Reducing Environmental Impact and Risks to Population Life” approved by the Government of the Russian Federation Decree No. 1144-r dated 11.05.2022, with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under Agreement No. 075-15–2022-1201 dated 30.09.2022.

For citation

Ivanova L. A., Prosekov A. Yu., Ivanov P. P., Mikhaylova E. S., Timoshchuk I. V., Gorelkina A. K. Assessment of the efficiency of wastewater treatment from coal enterprises for suspended solids using various filtering materials. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):263–270. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-03-227>

Введение

Одним из преобладающих загрязнителей сточных вод угольных предприятий являются взвешенные нерастворимые вещества, образование которых связано с буровзрывными работами, экскавацией и транспортированием угля и породы на угольных карьерах [1].

При организации оборотного водоснабжения, например, при использовании сточных вод для снабжения обогатительных фабрик повышенное содержание взвешенных веществ в воде может привести к снижению качества получаемых концентратов, а также повышенному износу труб и насосов.

Минеральные пылевые частицы формируют в воде в зависимости от степени дисперсности различные системы – суспензии, взвеси, коллоидные растворы и др.

Большинство угольных разрезов, расположенных в Кемеровской области – Кузбассе, имеют систему очистки сточных вод, соответствующую базовой очистке, регламентированной НДТ № 15 ИТС-37–2017 «Добыча и обогащение угля», которая включает в себя процесс осаждения взвешенных веществ под действием сил тяжести в прудах-отстойниках и фильтрацию через фильтрующий материал дамб [2].

Отстаивание карьерных сточных вод в прудах-отстойниках – наиболее распространенный метод и применяется на первой стадии очистки. Данный метод является эффективным для удаления крупнообломочных частиц, имеющих размер более 2 мм. Для таких частиц эффективность отстаивания составляет 90–100 %. Кроме того, этот же метод позволяет удалить до 40–60 % грубых и средних песча-



ных частиц с размером более 0,25 мм [3]. Содержание в карьерных сточных водах трудноосаждаемых пылеватых и глинистых частиц размером менее 10 мкм в больших концентрациях делают пруды-отстойники недостаточно эффективными. Чаще всего они не позволяют достичь нормативных концентраций по взвешенным веществам в сбрасываемых сточных водах даже при использовании каскада фильтрующих дамб. Кроме того, пруды-отстойники с регулируемым водосбросом не приспособлены для функционирования в условиях резких и значительных изменений расходов сточных вод, которые могут быть вызваны особенностями горной выработки и метеорологическими условиями [4].

Основное тело фильтрующего массива чаще всего выполнено из [5]:

- коренных пород вскрыши;
- крупного щебня фракции 100–200 мм;
- среднего щебня фракции 60–100 мм;
- горелой породы;
- кварцевого песка или цеолита.

Использование коренных пород вскрыши в качестве фильтрующего материала каскада дамб для очистки сточных вод карьеров имеет существенный недостаток, заключающийся в накоплении во время эксплуатации преобладающих загрязнителей с их последующим вымыванием, что приводит к увеличению их концентрации в очищенной воде.

Мониторинговый анализ качества сбрасываемых сточных вод угольных разрезов показал, что количественное содержание в них взвешенных веществ превышает нормативные значения и неравномерно в течение года, максимальный пик наблюдается в период май–июль [6].

Целью работы является оценка эффективности очистки сточных вод угольных карьеров от взвешенных нерастворимых загрязнений техногенного происхождения методом фильтрования через слой зернистой загрузки.

В задачи исследования входили:

- проведение натурных измерений содержания взвешенных веществ в сточных водах угольных разрезов;
- исследование кинетики гравитационного осаждения взвешенных веществ из сточных вод;
- анализ фильтрующей способности загрузок из материалов природного происхождения;

– определение эффективности очистки сточных вод от взвешенных веществ при формировании рабочего слоя путем комбинирования разных материалов и фракций;

– определение оптимальной скорости подачи промывочных вод на этапе регенерации фильтра с зернистой загрузкой.

Методы исследования

В качестве рекомендованного метода очистки карьерных сточных вод от взвешенных веществ предлагается использовать безреагентный способ очистки – фильтрование [7–9]. Данный способ в зависимости от концентрации контаминантов в исходной воде можно использовать как самостоятельно, так и одним из этапов комплексной технологии с «нулевым сбросом» [10].

Для анализа взвешенных веществ использовали методику ПНДФ 14.1:2:4.254–2009 «Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовых концентраций взвешенных веществ и прокаленных взвешенных веществ в пробах питьевых, природных и сточных вод гравиметрическим методом».

Дисперсный состав взвешенных частиц в сточных водах определяли с помощью анализатора размера частиц по ГОСТ 8.774–2011.

В лабораторных условиях проведены исследования по выбору фильтрующего материала для загрузки в фильтрующую колонну, установленную на входе в систему комплексной технологии очистки сточных вод, использующую концепцию «нулевого сброса».

Характеристика объектов исследования

Для анализа эффективности очистки сточных вод от взвешенных веществ фильтрованием в качестве объектов исследования были выбраны природные материалы разного химического состава (табл. 1).

Результаты исследования очистки сточных вод угольных предприятий от взвешенных веществ фильтрующими материалами

Исследование процесса осаждения взвешенных веществ в кинетических условиях было проведено на карьерной воде, отобранной из зумпфа осенью и весной (с концентрацией 103 и 126 мг/дм³ соответственно), в которой преобладающими веществами, формирующими взвеси, являлись суглинки с размером фракции 0,005 мкм.

Таблица 1

Химический состав фильтрующих материалов, %

Фильтрующий материал	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ общ	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
Цеолит Холинского месторождения (Читинская область, Россия)	56,27	5,37	2,30	< 0,01	14,90	1,26	0,14	1,24
Сорбент АС (каталитический алюмосиликатный) (Россия)	46,8	1,0	6,12	< 0,01	0,6	0,1	0,72	–
Filter-Ag (США)	70–73	14	1,5–3,5	0,2–2,5	–	–	2,5	1,5
Материал фильтрующий МФУ (Россия)	80	7	5	4	–	–	3	–
Сорбент МС (каталитический алюмосиликатный) (Россия)	16,9	0	9,53	1,7	0,34	6,2	0	–
Кварцит Бобровского месторождения (Россия)	98,7	1,3	0,6	–	–	–	–	–

Кинетика гравитационного осаждения взвешенных веществ из сточных вод приведена на рис. 1. Анализ кривых осаждения позволяет выделить два этапа, каждый из которых имеет разную скорость процесса. Так, в течение первых 100 мин наблюдается значительное снижение концентрации взвешенных веществ вследствие осаждения частиц с преобладающим размером больше 0,05 мкм. В последующем происходит значительное снижение скорости осаждения мелкодисперсных частиц размером менее 0,02 мкм, сложных для разделения в условиях гравитационного поля. Концентрация взвешенных веществ в пробах достигла своего минимального значения (20 мг/дм³) только на пятые сутки и потом не изменялась.

Результаты гравитационного осаждения показали, что на коллоидные примеси силы гравитации не оказывают достаточного для их осаждения действия. Другой характерной особенностью является седиментационная и агрегативная неустойчивость образованного осадка [11].

Полученные результаты подтверждают необходимость доочистки сточных вод от взвешенных веществ коллоидной группы после прудов-отстойников, в которых организовано ламинарное течение очищаемых вод, достаточное для удаления крупнодисперсных частиц. Эффективным методом доочистки сточных вод от коллоидных частиц является динамическая фильтрация с использованием аппаратов колонного типа с зернистой загрузкой [12].

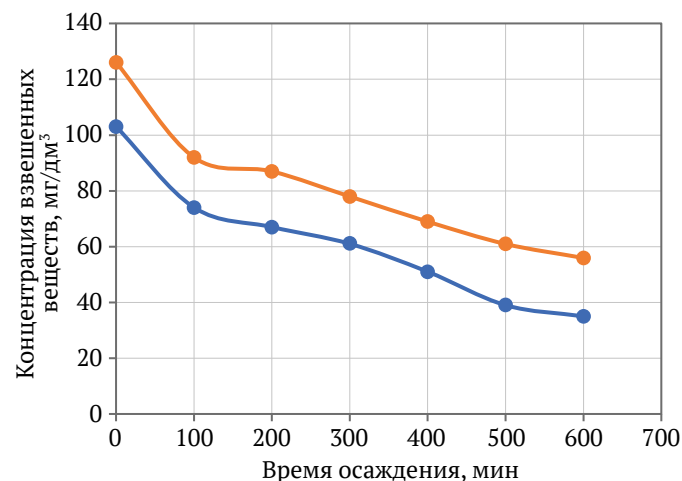


Рис. 1. Кинетика гравитационного осаждения взвешенных веществ

Сточные воды на выходе из прудов-отстойников, имеющие концентрацию взвешенных частиц на уровне 62 мг/дм³, с преобладающим размером частиц 0,005–0,02 мкм пропускались через лабораторную установку, схема которой представлена на рис. 2, в которой менялась фильтрующая зернистая загрузка.

Лабораторная установка представляет собой фильтрующую колонну с высотой фильтрующего слоя зернистой загрузки – 0,50 м, диаметром – 0,1 м. Очищаемая вода подается сверху с начальной скоростью 8 м/ч. Степень очистки сточных вод при использовании различных фильтрующих загрузок определялась после пропускания 200 л.

Перед началом механической фильтрации предварительно обработанная и отстоянная вода заливалась в ёмкость E1, откуда насосом Н1 подавалась на фильтровальную колонку Ф3 с зернистой загрузкой. Скорость фильтрации устанавливалась кранами K1 и K2. Получаемый фильтрат собирался в промежуточную ёмкость.

Расчет степени очистки сточных вод от взвешенных веществ выполнен по формуле [13]:

$$\varepsilon = \frac{C_0 - C_k}{C_0} 100,$$

где ε – степень очистки сточных вод, %; C_0 – начальная концентрация взвешенных веществ, мг/л; C_k – концентрация взвешенных веществ на выходе из колонки после пропускания 200 л сточных вод, мг/л.

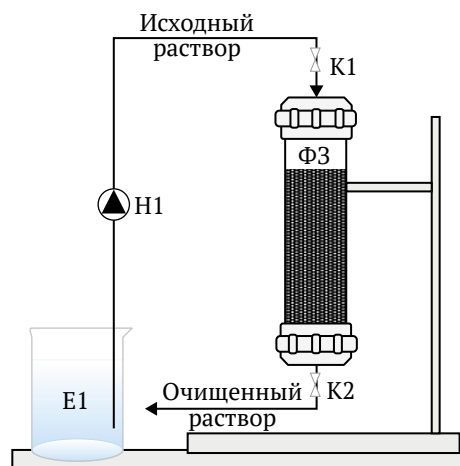


Рис. 2. Принципиальная схема лабораторной установки механической фильтрации

Таблица 2

Концентрация взвешенных частиц и степень очистки сточных вод

Фильтрующий материал	Начальная концентрация взвешенных веществ, мг/л	Концентрация взвешенных веществ на выходе из колонки после пропускания 200 л сточных вод	Степень очистки, %
Filter Ag	62,32	1,47	97,64
Материал фильтрующий МФУ	60,54	42,94	29,02
Сорбент АС	59,42	54,74	7,84
Цеолит Холинского месторождения	68,20	22,73	66,67
Сорбент МС	62,34	29,75	52,24
Кварцит Бобровского месторождения (фракция 2–5)	64,50	9,28	85,61



Результаты эксперимента приведены в табл. 2.

Данные лабораторного эксперимента показали, что наибольшую степень очистки модельных растворов от взвешенных веществ имеют Filter Ag и кварцит Бобровского месторождения.

Результаты исследования влияния фракционного состава фильтрующего материала на степень очистки модельных растворов от взвешенных веществ провели на кварцевом материале Бобровского месторождения. Результаты приведены на рис. 3.

Как показали экспериментальные данные, с увеличением размера фракций степень очистки уменьшается. Это объясняется увеличением размера канальцев между частицами зернистого материала, что способствует снижению гидравлического сопротивления стационарного слоя материала и, соответственно, недостаточному понижению кинетической энергии взвешенных частиц для их задержки в слое фильтрующей загрузки.

Обзор литературных данных показал, что одним из способов повышения эффективности очистки сточных вод от взвесей является формирование комбинированной загрузки зернистого материала [14]. При этом первым по ходу потока очищаемых сточных вод, как правило, используют материал с большим размером частиц, постепенно уменьшая его к выходу из колонны. Кроме того, использование принципа комбинирования фильтрующих материалов позволяет снизить стоимость очистки сточных вод [15, 16].

Для сравнения эффективности комбинирования зернистой загрузки собрали модельную установку, имеющую два слоя разных фракций или фильтрующих материалов. Результаты эксперимента приведены в табл. 3.

Анализ экспериментальных данных показал, что наиболее высокая степень удаления взвешен-

ных веществ достигается при использовании комбинации фильтрующих материалов – кварцевого песка и Filter Ag (в соотношении 1 : 2). Наименьшая степень удаления взвешенных веществ наблюдается при использовании комбинации фильтрующих материалов – кварцевого песка с частицами размером 1,0–2,0 мм и цеолита (в соотношении 1 : 2). При этом наибольшей удельной стоимостью очистки сточных вод обладают загрузки с комбинациями, включающими цеолиты (обладающие низкой степенью очистки от взвешенных веществ) и Filter Ag (обладающий высокой стоимостью и отсутствием локализации его производства в России).

Таким образом, наиболее эффективным и доступным зернистым фильтрующим материалом является кварцит Бобровского месторождения, который мы рекомендуем использовать, комбинируя его фракции 2,0–5,0 и 0,7–1,2 (в соотношении 1 : 2).

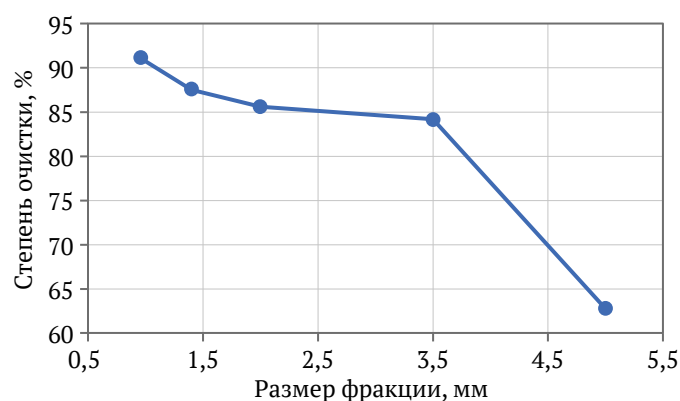


Рис. 3. Зависимость степени очистки на кварцевом материале Бобровского месторождения от размера фракции

Таблица 3

Степень очистки сточных вод от взвешенных частиц комбинированным слоем зернистой загрузки

Фильтрующий материал	Количество очищенной воды до достижения ПДК, л	Стоимость загрузки для лабораторной установки, руб.	Удельная стоимость очистки одного литра сточных вод, руб/л
Кварцит Бобровского месторождения, фракция 2,0–5,0/0,7–1,2 (в соотношении 1 : 2)	480	150	0,31
Кварцит Бобровского месторождения, фракция 2,0–5,0/0,8–2,0 (в соотношении 1 : 2)	250	145	0,58
Кварцит Бобровского месторождения, фракция 1,0–3,0/цеолит (в соотношении 1 : 1)	180	162	0,90
Кварцит Бобровского месторождения, фракция 1,0–3,0/цеолит (в соотношении 1 : 2)	100	123	1,23
Кварцит Бобровского месторождения, средняя фракция 1,0–3,0 / цеолит (в соотношении 2 : 1)	250	140	0,56
Кварцит Бобровского месторождения, фракция 2,0–5,0/Filter Ag (в соотношении 1 : 2)	720	433	0,60
Кварцит Бобровского месторождения, фракция 2,0–5,0/кварцит Бобровского месторождения, фракция 0,7–1,2/Filter Ag (в соотношении 1 : 1 : 1)	580	291	0,50

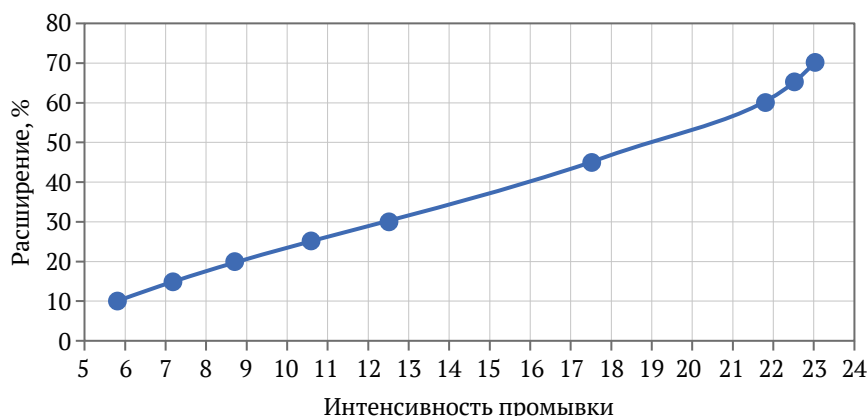


Рис. 4. Зависимость расширения загрузки кварцита Бобровского месторождения, фракция 2,0–5,0 / 0,7–1,2 (в соотношении 1 : 2), от интенсивности промывки

Для восстановления фильтрующей способности зернистой загрузки проводится ее регенерация путём обратноточной промывки.

Оптимальный процент расширения зернистой загрузки при её регенерации составляет 30% [17]. Для достижения заданного расширения для каждого типа зернистой загрузки требуется своя интенсивность подачи промывной воды.

С целью определения оптимальной интенсивности обратноточной промывки для исследованных фильтрующих материалов проведена серия экспериментов. Зависимость расширения фильтрующего слоя от расхода промывной воды снималась на фильтровальной колонне, описанной выше. Промывная вода подавалась в фильтрующую колонну снизу, а отводилась сверху, интенсивность промывки регулировалась краном, поз. К2.

Для каждого типа фильтровальной загрузки определена зависимость её расширения от интенсивности подачи промывной воды. График зависимости расширения загрузки в комбинации: кварцит Бобровского месторождения, фракция 2,0–5,0/0,7–1,2 (в соотношении 1 : 2), представлен на рис. 4.

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что для эффективной регенерации фильтрующей комбинированной загрузки: кварцит Бобровского месторождения, фракция 2,0–5,0/0,7–1,2 (в соотношении 1 : 2), оптимальная скорость подачи промывной воды составляет 12–13 л/м²·с.

Закключение

Нерастворимые взвешенные вещества являются преобладающими загрязнителями карьерных сточных вод. Наиболее простым и экономически обоснованным методом очистки сточных вод от этого типа загрязнителей является метод фильтрования через стационарный зернистый слой фильтрующего материала. На угледобывающих предприятиях широко используют систему очистки сточных вод, рекомендованную НДТ № 15 ИТС-37–2017 «Добыча и обогащение угля», включающую пруды-отстойники, представляющие собой открытые земляные емкости, изготавливаемые путем выемки грунта (например, отстойники котлованного типа) или путем перегораживания естественных логов дамбами из комбинированного минерального материала (например, отстойники овражно-балочного типа). В качестве доочистки карьерных сточных вод рекомендуем использовать фильтрование с использованием аппаратов с зернистой загрузкой.

Наиболее высокую эффективность среди исследованных материалов показал кварцит Бобровского месторождения в комбинации различных фракций, обеспечивающих двухступенчатое фильтрование. Для восстановления фильтрующей способности зернистой загрузки проводится ее регенерация путём обратноточной промывки. Для эффективной регенерации фильтрующей комбинированной загрузки: кварцит Бобровского месторождения, фракция 2,0–5,0/0,7–1,2 (в соотношении 1 : 2), оптимальная скорость подачи промывной воды составляет 12–13 л/м²·с.

Список литературы / References

1. Ivanova L.A., Salishcheva O.V., Timoshchuk I.V. et al. Major wastewater pollutants in coal mining. *Coke and Chemistry*. 2023;66(4):227–231. <https://doi.org/10.3103/S1068364X23700722>
2. Иванова Л.А., Голубева Н.С., Тимошук И.В. и др. Оценка эффективности очистки сточных вод угледобывающего предприятия и ее влияние на загрязнение малых рек. *Экология и промышленность России*. 2023;27(1):60–65. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-1-60-65>
Ivanova L., Golubeva N., Timoshchuk I. et al. Evaluation of the efficiency of wastewater treatment of a coal mining enterprise and its impact on the pollution of small rivers. *Ecology and Industry of Russia*. 2023;27(1):60–65. (In Russ.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-1-60-65>



3. Красавцева Е.А., Максимова В.В., Макаров Д.В., Маслобоев В.А. Методы очистки сточных вод горнопромышленных предприятий от взвешенных веществ. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2022;(3):136–146. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20220314> (Перев. вер.: Krasavtseva E.A., Maksimova V.V., Makarov D.V., Masloboev V.A. Removal of suspended solids from industrial wastewater. *Journal of Mining Science*. 202;58(3):466–475. <https://doi.org/10.1134/s1062739122030140>)
Krasavtseva E.A., Maksimova V.V., Makarov D.V., Masloboev V.A. Removal of suspended solids from industrial wastewater. *Journal of Mining Science*. 202;58(3):466–475. <https://doi.org/10.1134/s1062739122030140> (Orig. ver.: Krasavtseva E.A., Maksimova V.V., Makarov D.V., Masloboev V.A. Removal of suspended solids from industrial wastewater. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopyayemykh*. 2022;(3):136–146. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20220314>)
4. Блинов С.М., Караваева Т.И., Боков Д.А. Способ очистки воды от взвешенных веществ с использованием дражных отвалов. *Вестник Пермского университета. Геология*. 2012;(2):86–91.
Blinov S.M., Karavaeva T.I., Bokov D.A. Method of water clearing from suspended substances with use of drag's dumps. *Bulletin of Perm University. Geology*. 2012;(2):86–91. (In Russ.)
5. Чайковский Д.Я., Чайковская А.А., Арканова И.А. Целесообразность применения кварцевого песка в качестве фильтрующего зернистого материала для очистки воды от взвешенных веществ. *Вестник научных конференций*. 2016;(3–7):218–219.
Tchaikovsky D.Ya., Tchaikovsky A.A., Arkanova I.A. Expediency of using quartz sand as a filtering granular material for water purification from suspended solids. *Vestnik Nauchnykh Konferentsiy*. 2016;(3–7):218–219. (In Russ.)
6. Гронь В.А., Будник Е.В., Шахрай С.Г., Кондратьев В.В. Новые возможности для очистки сточных вод угольных месторождений. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2012;(9):183–189.
Gron V.A., Budnik E.V., Shakhrai S.G., Kondratyev V.V. New opportunities for coal deposit wastewater treatment. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2012;(9):183–189. (In Russ.)
7. Das A., Saha A.K., Sarkar Sh. et al. A multidimensional study of wastewater treatment. *International Journal of Experimental Research and Review*. 2022;28:30–37. <https://doi.org/10.52756/ijerr.2022.v28.005>
8. He L., Gao Z., Fan L., Tan T. The shock effect of inorganic suspended solids in surface runoff on wastewater treatment plant performance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019;16(3):453. <https://doi.org/10.3390/ijerph16030453>
9. Shi J., Huang W., Han H., Xu C. Pollution control of wastewater from the coal chemical industry in China: Environmental management policy and technical standards. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;143:110883. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110883>
10. Zhang Sh., Wu Q., Ji H. Research on zero discharge treatment technology of mine wastewater. *Energy Reports*. 2022;8(2):275–280. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.014>
11. Yuan N., Zhao A., Hu Z. et al. Preparation and application of porous materials from coal gasification slag for wastewater treatment: A review. *Chemosphere*. 2022;287(2):132227. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132227>
12. Mao G., Han Y., Liu X. et al. Technology status and trends of industrial wastewater treatment: A patent analysis. *Chemosphere*. 2022;288(2):132483. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132483>
13. Горелкина А.К., Тимошук И.В., Голубева Н.С. и др. Способы снижения воздействия горнодобывающей отрасли на водные экосистемы. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(7):64–75. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_7_0_64
Gorelkina A.K., Timoshchuk I.V., Golubeva N.S. et al. Reduction of impact of mining on water ecosystems. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(7):64–75. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_7_0_64
14. Иванова Л.А., Тимошук И.В., Горелкина А.К. и др. Выбор сорбента для элиминации ионов железа из сточных и природных вод. *Техника и технология пищевых производств*. 2024;54(2):398–411. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2516>
Ivanova L., Timoshchuk I., Gorelkina A. et al. Removing excess iron from sewage and natural waters: selecting optimal sorbent. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2024;54(2):398–411. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2516>
15. Михайлова Е.С., Иванова Л.А. Технологии полного цикла очистки карьерных и поверхностных сточных вод для предприятий по добыче угля открытым способом: тенденции и перспективы. *Уголь*. 2023;(9):63–69. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-9-63-69>
Mikhaylova E.S., Ivanova L.A. Technologies of full-cycle treatment of pit and surface wastewater for open-pit coal mining operations: trends and prospects. *Ugol'*. 2023;(9):63–69. (In Russ.). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-9-63-69>
16. Mkilima T., Meiramkulova K., Zandybay A. et al. Investigating the influence of column depth on the treatment of textile wastewater using natural zeolite. *Molecules*. 2021;26(22):7030. <https://doi.org/10.3390/molecules26227030>



17. Nikitin A.P., Dudnikova Y.N., Mikhaylova E.S., Ismagilov Z.R. Raman characteristics of Kuznetsk basin coal and coal-based sorbents. *Coke and Chemistry*. 2019;62(9):379–384. <https://doi.org/10.3103/S1068364X19090059>
18. Zvekov A.A., Zykov I.Y., Dudnikova Y.N. et al. Sorption of organic compounds by carbon sorbents from Kuzbass coals. *Coke and Chemistry*. 2019;62(6):240–244. <https://doi.org/10.3103/S1068364X19060103>

Информация об авторах

Людмила Анатольевна Иванова – кандидат технических наук, доцент кафедры техносферной безопасности, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-4103-8780; e-mail lyuda_ivan@mail.ru

Александр Юрьевич Просеков – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, ректор, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-5630-3196, Scopus ID 57194498125, ResearcherID C-7606-2014; e-mail rector@kemsu.ru

Павел Петрович Иванов – кандидат технических наук, доцент кафедры мехатроники и автоматизации технологических систем, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-8086-3273, Scopus ID 57214880844; e-mail ipp7@yandex.ru

Екатерина Сергеевна Михайлова – кандидат химических наук, директор Института нано-, био-, информационных, когнитивных и социогуманитарных технологий, доцент кафедры техносферной безопасности, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация, ORCID 0000-0002-0673-0747, Scopus ID 57189052967; e-mail: e_s_mihaylova@mail.ru

Ирина Вадимовна Тимошук – доктор технических наук, профессор кафедры техносферной безопасности, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-1349-2812, Scopus ID 56646335100, ResearcherID L-4795-2016; e-mail irina_190978@mail.ru

Алена Константиновна Горелкина – доктор технических наук, профессор кафедры техносферной безопасности, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-3782-2521; e-mail alengora@yandex.ru

Information about the authors

Ludmila A. Ivanova – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Technosphere Safety, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation; ORCID 0000-0002-4103-8780; e-mail lyuda_ivan@mail.ru

Alexander Yu. Prosekov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Rector, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation; ORCID 0000-0002-5630-3196, Scopus ID 57194498125, ResearcherID C-7606-2014; e-mail rector@kemsu.ru

Pavel P. Ivanov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Mechatronics and Automation of Technological Systems, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation; ORCID 0000-0002-8086-3273, Scopus ID 57214880844; e-mail ipp7@yandex.ru

Ekaterina S. Mikhaylova – PhD (Chem.), Director of the Institute of Nano-, Bio-, Information, Cognitive and Socio-Humanitarian Technologies, Department of Technosphere Safety, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation, ORCID 0000-0002-0673-0747, Scopus ID 57189052967; e-mail: e_s_mihaylova@mail.ru

Irina V. Timoshchuk – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Technosphere Safety, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation; ORCID 0000-0002-1349-2812, Scopus ID 56646335100, ResearcherID L-4795-2016; e-mail irina_190978@mail.ru

Alena K. Gorelkina – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Technosphere Safety, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation; ORCID 0000-0002-3782-2521; e-mail alengora@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.03.2024
Поступила после рецензирования 23.04.2024
Принята к публикации 10.06.2024

Received 11.03.2024
Revised 23.04.2024
Accepted 10.06.2024



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ



Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-11-184>

УДК 504.55.054:622(470.6)

Экологически чистые геотехнологии выщелачивания металлов из твердых и жидких отходов обогащения полиметаллического сырья

В.И. Голик^{1,2}  , Ю.И. Разоренов³  ,
Н.Г. Валиев⁴  , О.А. Гаврина⁵  

¹Московский политехнический университет (МПУ), г. Москва, Российская Федерация

²Северо-Кавказский горно-металлургический институт, (СКГТИ), г. Владикавказ, Российская Федерация

³Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова,
г. Новочеркасск, Российская Федерация

⁴Уральский государственный горный университет (УГГУ), г. Екатеринбург, Российская Федерация

⁵Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук,
г. Москва, Российская Федерация

✉ v.i.golik@mail.ru

Аннотация

Глобальные вызовы (рост потребления георесурсов, климатические изменения, ограниченность запасов) повышают актуальность проблем роста накопления отходов и экологической модернизации добычи минерального сырья. В связи с этим существующие подходы к проектированию геотехнологий добычи металлов нуждаются в совершенствовании на основе концепции циркуляционного управления отходами и экологизации технологических процессов. Статья посвящена вопросу формирования концептуальных основ и направлений экологизации геотехнологий при выщелачивании металлов из твердых и жидких отходов обогащения полиметаллического сырья. В исследовании предложены рекомендации по совершенствованию подземного выщелачивания руд в блоках, позволяющие определить оптимальные условия для повышения полноты использования недр и уменьшения ущерба окружающей среде. Выявлено, что при извлечении металлов с циркуляцией раствора через рассольные камеры содержание ионов (Na, Cl, SO₄ и Ca) в диализате было низким, а без циркуляции в рассоле существенно превышало ПДК (по Na, Cl, SO₄ и Ca). Это доказывает принципиальную возможность управления процессами подземного выщелачивания путем усиления окислительного потенциала растворителей за счет добавления промышленных окислителей. Установлено, что рост продолжительности агитационного выщелачивания (как с использованием, так и без механоактивации) приводит к равномерному расширению локальных максимумов выхода Pb из пульпы при снижении минимальной концентрации NaCl с 11–12 до 7 % при H₂SO₄ = 0,6 %. Одним из ключевых результатов исследования является обоснование расширения области использования дезинтеграторов для осуществления направленного активационного воздействия на хвосты обогащения. Практическое значение полученных результатов заключается в возможности оптимизации технологической схемы электрохимического извлечения металлов из техногенных стоков на основании полученных результатов применения циркуляции рассолов через рассольные камеры. Кроме того, совокупность полученных результатов использования дезинтегратора для повторного извлечения свинца из геоматериалов позволит разработать методику расчета параметров механоактивационного воздействия для повышения степени извлечения металлов из хвостов обогащения полиметаллического сырья РСО–Алания (Згидское, Садонское, Архонское месторождения). Наиболее перспективным направлением дальнейших исследований является обоснование путей использования подземного пространства для полного захоронения отходов (техногенных стоков и хвостов обогащения) после их многостадийной обработки.

Ключевые слова

хвосты обогащения, растворы/стоки, кислотное выщелачивание, механохимическая активация, извлечение Pb, геотехнологии, управление отходами

Для цитирования

Golik V.I., Razorenov Yu.I., Valiev N.G., Gavrina O.A. Environmentally sound geotechnologies for leaching metals from polymetallic ore processing wastes and wastewater. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):271–282. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-11-184>



SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research paper

Environmentally sound geotechnologies for leaching metals from polymetallic ore processing wastes and wastewaterV.I. Golik^{1,2}  , Yu.I. Razorenov³  , N.G. Valiev⁴  , O.A. Gavrina⁵  ¹ Moscow Polytechnic University (MPU), Moscow, Russian Federation² North Caucasian Mining and Metallurgical Institute (NCSTU), Vladikavkaz, Russian Federation³ M.I. Platov South Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russian Federation⁴ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation⁵ Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation v.i.golik@mail.ru**Abstract**

Global challenges (increased consumption of georesources, climatic changes, limited reserves) increase the relevance of the problems of growing waste accumulation and environmentally-sound modernization of mineral extraction. In this regard, the existing approaches to the design of geotechnologies for metal mining need to be improved based on a concept of so-called circulation waste management and ecologization of technological processes. The paper is devoted to the issue of formation of conceptual bases and directions of ecologization of geotechnologies at leaching metals from polymetallic ore processing wastes and wastewater. The study presents recommendations for improving in-situ leaching of ores in blocks, allowing to determine the optimal conditions for increasing the completeness of subsoil use and reducing environmental damage. It was revealed that at metal extraction with solution circulation through brine chambers the content of Na, Cl, SO₄ and Ca ions in dialysate was low, while without circulation through brine, it significantly exceeded corresponding MPCs. This proves the fundamental feasibility of controlling natural leaching processes by enhancing the oxidizing potential of natural solvents through the addition of industrial oxidizing agents. It was found that increasing the duration of agitation leaching (both with and without mechanoactivation) leads to a uniform expansion of the local maximums of Pb yield from the pulp when the minimum NaCl concentration decreases from 11–12 to 7% at H₂SO₄ concentration of 0.6%. One of key results of the study is justifying the expansion of the use of disintegrators to realize targeted activation of tailings. The practical significance of the obtained results lies in the proved feasibility of optimizing the flow sheet of electrochemical extraction of metals from wastewater on the basis of the obtained regularities of the use of brine circulation through brine chambers. In addition, the totality of the obtained results of using a disintegrator for re-extraction of lead from geomaterials will allow developing a methodology for calculating the parameters of mechanoactivation action to increase the degree of metal recovery from the tailings of North Ossetia-Alania's (Zgidskoe, Sadonskoe, Arkhonskoe deposits) polymetallic ores beneficiation. The most promising way for further research is to substantiate methods of using underground space for complete removal of wastes (wastewater and tailings) after their multistage treatment.

Keywords

tailings, wastewater, acid leaching, mechanochemical activation, Pb recovery, geotechnologies, waste management

For citation

Golik V.I., Razorenov Yu.I., Valiev N.G., Gavrina O.A. Environmentally sound geotechnologies for leaching metals from polymetallic ore processing wastes and wastewater. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):271–282. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-11-184>

Введение

Горнодобывающие предприятия по всему миру увеличивают темпы накопления различных видов отходов, обуславливая деградацию окружающей среды, в связи с ростом производства, постепенным переходом к отработке бедных и вкрапленных руд, а также вследствие усложнения горнотехнических условий отработки месторождений полезных ископаемых [1–3]. Большие объемы данных, полученных с предприятия,

могут быть использованы для снижения потребления ресурсов и оптимизации запасов на шахтах с использованием технологии цифровых двойников [4]. Цифровые модели геологических запасов полезных ископаемых в сочетании с ГИС технологиями позволяют формировать цифровые двойники месторождений, обуславливая проектирование более рациональных систем разработки [3]. При этом решения некоторых экологических проблем можно достичь



при оптимизации существующих технологических процессов, а также при повышении качества управления природно-техническими системами [5, 6].

Способы кучного выщелачивания, которые широко используются в мире, позволяют с большей прибылью извлекать металлы из различных видов низкосортных руд. При этом даже существующий уровень понимания фундаментальных его основ не позволяет полностью обеспечить экологически безопасные реализации при стремлении к устойчивому освоению минерально-сырьевой базы [7]. Это порождает проблему образования техногенных стоков, сухих отвалов и пылевых загрязнений. Для каждого объекта пыления характерны индивидуальные особенности, что позволяет использовать модели технологических процессов для минимизации выбросов в атмосферу, но не полностью решить данную проблему [8]. Минимизация последствий загрязнения гидросферы требует разработки мер, учитывающих целый комплекс взаимно обусловленных факторов [9, 10]. Хвостохранилища являются техногенными месторождениями, сложенными хвостами переработки руд, которые участвуют в загрязнении окружающей среды химическими ингредиентами в результате процессов выщелачивания [11–14]. Так, в нашей стране уже складировано более 45 млрд т твердых отходов (осуществляющих в том числе пыление) в виде отвалов, из которых отходы обогащения ежегодно добавляют в эту цифру около 140 млн м³/год [15].

Решение проблем отходов при извлечении полиметаллического сырья может быть достигнуто при экологизации и широком использовании геотехнологий подземного выщелачивания. Прогрессивные технологии подземного выщелачивания в блоках осваиваются в добывающих отраслях для сохранения и упрочнения минерально-сырьевой базы технологически развитых стран [16, 17]. История возникновения и освоения технологии с подземным блоковым выщелачиванием на предприятиях атомной энергетики СССР в Казахстане описана в [18], в то же время отдельные процессы остаются недостаточно изученными. Так, для Джимидонского рудного поля увеличение доступности для переработки низкокондиционных запасов полиметаллического сырья возможно достичь путем повышения качества разрушения и избирательного расхода энергии при взрывной подготовке руд [19]. На горных предприятиях России, прежде всего в атомной промышленности, технологии с подземным блоковым выщелачиванием используются при добыче большой доли товарной продукции, например, в Приаргунском ГХК. При этом используется неоптимальная топология сети поверхностных скважин, которая не позволяет использовать направленное бурение для минимизации количества нагнетательных скважин (при их бурении параллельно рудному телу), что приводит к росту отходов при низкой эффективности подземного выщелачивания [20].

Скорость процессов выщелачивания определяется содержанием металлов, толщиной диффузионного слоя и коэффициентом диффузии. Скорость

химической реакции имеет решающее значение для извлечения редкоземельных элементов в процессе подземного выщелачивания (которая (реакция) сопровождается миграцией ионов, что придает ей электрохимический характер), при этом наиболее важными являются два параметра: сопротивление раствора и сопротивление переносу заряда [21]. Кроме того, максимальное извлечение соответствует высокой скорости движения раствора относительно реакционной поверхности. На Кавказе большинство эксплуатируемых месторождений относится к типу кварц-полиметаллических месторождений в кварц-кератофировой формации, например, Садонское. Для него характерны полиметаллический и пирротинный виды оруденения. Воды являются причиной процесса гидролиза. При достижении определенной кислотности сульфат железа вступает в реакцию с образованием гидроксида железа. Из методов очистки растворов наиболее часто применяют химический, недостаток, которого заключается в возможности загрязнения окружающей среды реагентами при аварийном нарушении технологического режима.

Существующие математические методы управления процессами выщелачивания требуют большого объема априорной информации о структуре и свойствах месторождения, при этом одним из основных методов является метод экспертных оценок, который не обладает достаточной надежностью получаемых результатов [22, 23]. Отмеченные особенности горного производства наиболее остро проявляются при осуществлении процессов, где погрешность может снизить показатели технологического процесса до неприемлемого уровня [24, 25]. Так, при ошибке в параметрах отбойки руд для выщелачивания становится невозможно использовать высокоэффективную технологию с растворением металлов.

Существующие подходы к проектированию геотехнологий добычи металлов нуждаются в совершенствовании на основе концепции так называемого «циркуляционного» управления отходами и экологизации технологических процессов [26, 27]. В работе [28] убедительно доказана необходимость решения первостепенных задач для «форсирования перехода к «циркуляционной» экономике в условиях обращения с техногенными минеральными образованиями». Недостатком реализации авторской идеи о формировании путей для достижения цели является восприятие «циркуляционного» подхода, как «концепции замкнутых цепей поставок». В то время как, например, для шахтного метана ее формируют как «преобразование отходов (метана) в энергию» [29, 30]. В связи с этим авторская гипотеза «циркуляционного» управления хвостами обогащения заключается в: «оптимизации технологических процессов выщелачивания, механохимической активации геоматериалов или иных способов, позволяющих трансформировать отходы обогащения в дополнительно извлекаемые металлы с последующим использованием хвостов в производстве строительных материалов или в объектах захоронения (инертный заполнитель подземного пространства)».



В связи с этим **целью** исследования является формирование концептуальных основ и направлений экологизации геотехнологий выщелачивания металлов из твердых и жидких отходов обогащения полиметаллического сырья. В связи с этим необходимо решить следующие **задачи**: 1 – провести анализ и привести классификацию мер по совершенствованию подземных геотехнологий выщелачивания металлов; 2 – провести моделирование процесса электрохимического метода извлечения металлов из стоков (растворов); 3 – обосновать эффективность извлечения металлов с использованием предварительной механохимической активации сухих хвостов.

Методы

Объектом исследования являются техногенные месторождения РСО–Алании (Россия). Интенсивная эксплуатация рудных месторождений сопровождается образованием отвалов некондиционных руд и хвостов обогатительных фабрик, располагающихся в долинах рек.

Количественные значения и параметры промышленных стоков в условиях месторождения Садонского рудного узла приведены в табл. 1.

Объемы хранения хвостов обогащения фабрик Северного Кавказа приведены в табл. 2.

Таблица 1

Характеристика промышленных стоков

Месторождения	Объем стоков, м ³ /ч	Содержание металлов, г/м ³
Садонское	300	Свинец – 5, цинк – 7
Згидское	24	Свинец – 5, цинк – 12
Холстинское	70	Свинец – 8, цинк – 25
Архонское	30	Свинец – 65, цинк – 7
Хаником-Какадурское	150	Свинец – 5, цинк – 100
Урупское	350	Медь – 12, цинк – 41, железо – 0,2
Тырныаузское	400	Молибден – 37, вольфрам – 45

Таблица 2

Объемы хранения хвостов переработки руд

Хвостохранилища	Количество хвостов обогащения, т	Содержание металлов, %
Мизурская фабрика	3 000 000	Цинк – 0,15–0,25, свинец 0,13–0,19
Фиагдонская фабрика	3 000 000	Цинк – 0,18–0,24, свинец – 0,18–0,24
Завод «Электроцинк»	3 000 000	–
Урупская фабрика	4 000 000	Цинк – 0,25–0,40, медь – 0,36–0,46, железо – 30–35
Тырныаузская фабрика	120 000 000	Вольфрам – 0,25–0,40, медь – 0,36–0,46, железо – 30–35

Для оценки перспектив в области совершенствования подземных геотехнологий осуществлялся ретроспективный анализ теории и практики применения технологических новаций на предприятиях Министерства атомной энергетики и промышленности СССР.

При реализации второй задачи изучались техногенные растворы (стоки) с реагентами для выщелачивания, прошедшими электрохимическую обработку. Сульфатно-хлоридные с преобладанием катионов натрия стоки Архонского комбината (РСО–Алания) исследованы на установке во Всесоюзном научно-исследовательском институте химической технологии (г. Москва). Базой для определения эффективности выщелачивания металлов являются результаты выщелачивания руд и продуктов их переработки в перколяторных колоннах с использованием реагентов.

Третью задачу решали на основе испытаний технологий по переработке хвостов обогащения Мизурской обогатительной фабрики. Активацию пульпы проводили с помощью высокоэнергетического измельчения в DESI-11 с частотой вращения ротора 50 и 200 Гц в течение 0,25 и 1 ч соответственно. Для образования пульпы измельченные образцы хвостов пропускали через сито 2,0 мм и смешивали с фильтратом. Методика моделирования составлена по аналогии с методикой, рассмотренной в работах [31–33], и заключалась в обработке данных на основе фильтра Савицки–Голя в сочетании с трехмерной интерполяцией по методу R.J. Renka (Роберта Ренки) [34–36]. Реализация алгоритмов была выполнена в виде «скриптов» (с использованием ПО Vi IMproved (version 9.0)) на языке Python (version 2.7.10). Построение итоговых трехмерных графиков ПО Gnuplot (version 5.4).

Результаты

Совершенствование геотехнологии подземного выщелачивания металлов

Выщелачивание полиметаллического сырья является процессом фильтрации водного раствора через пласты породы под действием силы тяжести, капиллярных сил на межфазных границах либо из-за градиента давлений в нагнетательных и откачных (продуктивных) скважинах. Внутренняя структура пористой среды является случайной, и ее геометрия может быть описана лишь приближенно, соответственно определение параметров течения водных растворов на основе уравнений гидравлики возможно лишь приближенно, с некоторой вероятностью.

Основными параметрами процесса фильтрации являются вязкость, проницаемость, скорость и давление жидкости [37, 38]. Жидкость, движущаяся в пористой среде, является неньютоновской, для которой соотношение, связывающее скорость изменения деформации с напряжением, описывается реологическим законом:

$$\tau_{xy} = \tau_0 + \mu \frac{\partial u_x}{\partial y}, \quad (1)$$

где μ – динамическая вязкость; τ_0 – начальное напряжение сдвига; u_x – скорость течения в перпендикулярном оси OX направлении.



В пористой среде неньютоновская жидкость удовлетворяет уравнению движения и уравнению неразрывности при отсутствии притоков и стоков:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} &= -\nabla \bar{p} + \nabla(\bar{\tau} - \rho \bar{V}' \bar{V}'), \\ \frac{\partial(\rho m)}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{V}) &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где ρ – плотность среды; m – пористость; $\bar{V}$ – вектор скоростей; $\bar{p}$ – распределение давлений; $\bar{\tau}$ – тензор напряжений.

Проницаемость рудных пластов в зависимости от плотности различна, но в условиях хаотичного изменения характеристик фильтрации в каждой точке пласта можно принять его состояние однородно-проницаемым. Если же фильтрационные характеристики пласта пористость и проницаемость – на отдельных участках различны, то пласт является неоднородным.

В математической модели потенциального течения суммарный дебит пласта представляет собой сумму дебитов всех слоев. Для упрощения неоднородный пласт моделируется как квазиоднородный со средней проницаемостью пласта

$$k_{cp} = \sum_i \frac{k_i h_i}{h}, \quad (3)$$

где k_i – проницаемость i -го слоя; h_i – толщина i -го слоя; h – толщина всего пласта.

В обобщенном виде модель диффузии растворов для выщелачивания металлов из руд может быть представлена уравнением Фоккера–Планка:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \left[- \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} D_i^1(x_1, x_2, x_3) + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i \partial x_j} D_{ij}^2(x_1, x_2, x_3) \right] W, \quad (4)$$

где $W(\bar{V}, t)$ – плотность вероятности скоростей; D^1 – вектор сноса потока; D^2 – тензор диффузии.

Наличие в прилегающем к твердой фазе вещества слоя частиц крупностью более 5 мм увеличивает интенсивность переноса металлических частиц в извлекаемом растворе.

Оптимальным является способ выщелачивания, обеспечивающий перевод металлов в мобильное состояние с минимальными затратами на подготовку руд и обеспечение проницаемости раздробленной руды для выщелачивающих растворов. Технологии добычи полезных ископаемых, в том числе методами выщелачивания, и отдельные их элементы оцениваются по критерию полноты извлечения металлов из руд [39, 40]. Из анализа исследований [41] следует, что меры по совершенствованию подземного выщелачивания руд в блоках (с управляемой проницаемостью пород/руд для растворов) можно систематизировать (табл. 3).

Таблица 3

Меры совершенствования подземного выщелачивания руд в блоках

Процесс	Сущность процесса	Эффект осуществления
1	2	3
Отбойка и дробление взрывом	Горизонтальная подсечка взрыванием скважин с опережением на толщину вертикального слоя	Рационализация формирования компенсационного пространства, оптимизация крупности магазинируемой руды
	Отбойка слоями с переменной линией наименьшего сопротивления	
	Приближение формы слоя к вертикальной проекции фигуры выпуска	
Орошение растворами реагентов	Скважины с обсадкой и размещением тонкозернистого слоя в отбитой руде	Равномерное орошение растворов реагентов в объеме магазинированной руды и времени
	Гидравлический разрыв пород	
Сбор растворов	Улавливание утечек растворов электровакуумными установками	Оптимизация расхода реагентов
	Дренаж перфорированными трубами в днище блока	
	Создание противо фильтрационных экранов из полимерных материалов	Минимизация ущерба окружающей природной среде
Интенсификация процесса	Использование в скважинах в отбитой руде жидких взрывчатых веществ	Смещение кусков выщелоченной руды с разрушением кольматированных зон
	Подвижка руды при отбойке на нее новых слоев	
	Воздействие импульсами сжатого воздуха высокого давления	Повышение проницаемости при перемещении трещинных заполнителей и разрушении глинистых пленок
	Воздействие ультразвуком при электромагнитной обработке растворов с пропусканием их в поле электрического тока	
	Воздействие пульсирующим электрическим током с низкочастотными импульсами	
Комбинирование разработки разносортных руд	Выемка балансовых руд для традиционной переработки, магазинирование части балансовой и забалансовой руды и выщелачивание	Комплексное улучшение показателей разработки месторождений

Моделирование эффективности извлечения металлов из растворов

Метод электрохимического умягчения концентрированных растворов посредством электродиализного опреснения заключается в использовании явления селективности ионообменных мембран: катионообменные мембраны пропускают положительные ионы, а анионообменные мембраны – отрицательные ионы.

Мембранный электролиз обеспечивает безреагентное умягчение природных растворов и концентрирование микроэлементов. Перспективны электродиализ и активация в диафрагменных электролизерах с разложением солевых систем на кислоту и щелочь и нейтрализацией растворов. Недостатком метода является осаждение труднорастворимых соединений в рассольных камерах.

Параметры извлечения из раствора металлов определяются для вариантов с циркуляцией раствора через рассольные камеры и без циркуляции. В камеру обессоливания подаются растворы (стоки), а в камеру кислотно-щелочного образования – чистая вода. После этого в камеры подают реагенты, необходимые для образования щелочи и кислоты (выбранные для реализации технологического цикла). С ростом доли ионов магния, кальция и кислот проявляется ухудшение эффективности исследуемого процесса, обусловленное снижением качества контакта мембраны с рассолом вследствие налипания карбонатных отложений и оксида магния. Энергозатраты на удаление 1 кг соли составляют 0,6 кВт (при остаточных долях $Zn = 0,3–0,4$ мг/дм³ и $Pb = 0,06–0,08$ мг/дм³ соответственно).

Для реализации авторского подхода проведена серия опытов для различных схем циркуляции рассолов, полученные значения для которых представлены в табл. 4 и рис. 1, 2.

Из анализа поверхности, представленной на рис. 1, следует, что вариант электрохимического способа с циркуляцией рассолов через рассольные камеры является наиболее эффективным способом извлечения металлов из промышленных стоков. Извлечение металлов из рассолов осуществляется в сорбционных и отмывочных колоннах высотой до 4 м при диаметре 1–1,5 м. Расход реагентов на 1000 м³ раствора: катионита (анионита) – 0,8 кг; регенерирующего реагента – 100–150 кг.

Из анализа значений, представленных на рис. 3, следует, что значения для Na, Ca, Cl и SO₄ существенно превышают ПДК (Na – 6089, Ca – 650, Cl – 4600 и SO₄ – 153 мг/дм³).

Таблица 4

Эффективность извлечения металлов из растворов (стоков) при разном типе циркуляции раствора

Компонента	N	Исходный раствор (стоки)	Эффективность извлечения металлов из растворов (стоков)	
			с циркуляцией рассолов через рассольные камеры	без цир- куляции
			в дилуате	
Варианты модели		1	2	3
Pb	1	2,2±0,3	0,1±0,02	0,08±0,02
Zn	2	40±1,2	0,4±0,05	0,3±0,03
Mg	3	70±1,9	10±2	8±1,1
Ca	4	200±6	30±1,2	40±1,7
Na	5	450±15	72±1,5	90±1,3
SO ₄	6	580±20	100±11	95±4
Cl	7	900±5	114±19	105±5

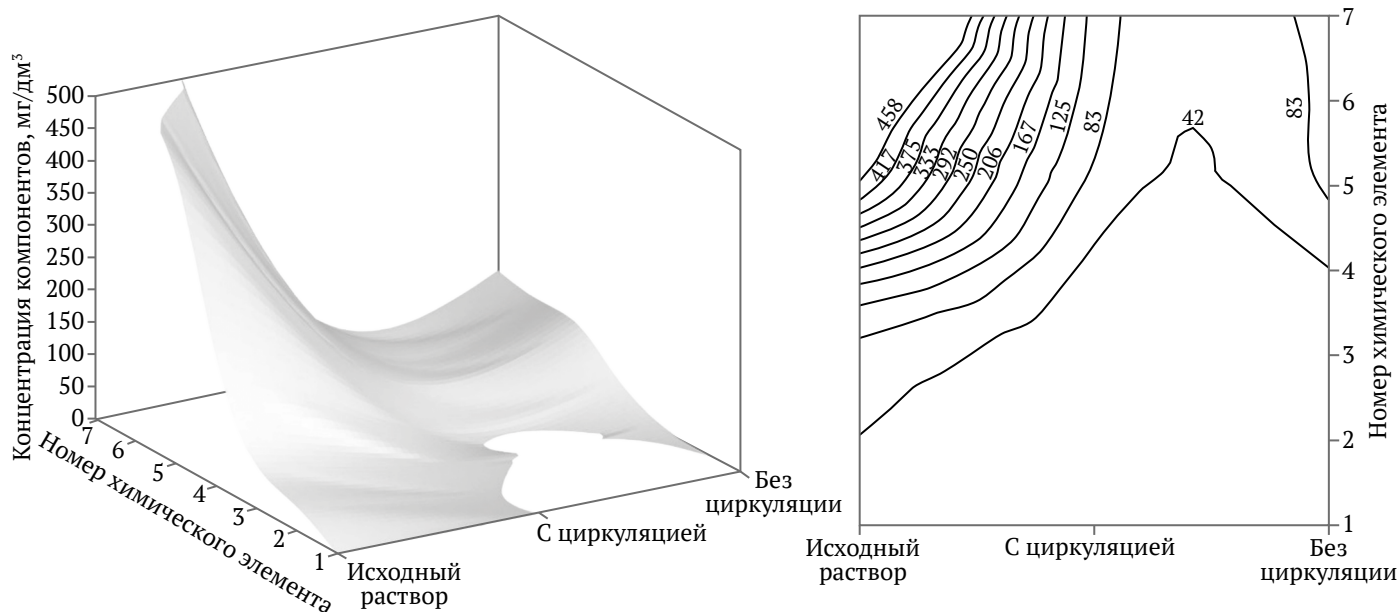


Рис. 1. Эффективность извлечения химических элементов при различных параметрах электрохимического способа

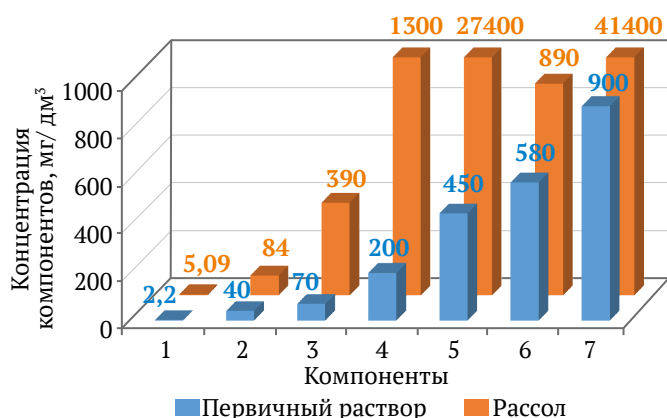


Рис. 2. Концентрация химических элементов в рассолах без циркуляции в сравнении с исходным раствором

Извлечение металлов при предварительной механохимической активации сухих хвостов

В связи с тем что механоактивация эффективно используется для превращения хвостов обогащения в вязущий компонент закладочного массива [42], было решено использовать эффект активации геоматериалов для повышения выхода свинца из хвостов. Геоматериалы были предварительно измельчены в лабораторной шаровой мельнице, пропущены через сито диаметром (отверстий) 4,0 мм и подвергались механоактивационному воздействию (сухим способом) в дезинтеграторе DESI-11. Скорость вращения ротора составляла 50 и 200 Гц. Программа экспериментальных работ включала в себя использование серной кислоты и хлорида натрия в различных пропорциях. Концентрация кислоты изменялась в диапазоне следующих значений 20, 90 и 160 г/л, а хлорида натрия при этом 2, 6 и 10 г/л. Подготовка жидкой фракции пульпы подразумевала предварительную подготовку химических реагентов (отдельные колбы) в пропорциях, указанных в методике проведения эксперимента. Все расчеты проводились для получения одного литра раствора для выщелачивания с выби-раемым соотношением твердой и жидкой фракций (S/L) = 1/4, 1/7 и 1/10 соответственно. После получения активированной твердой фракции геоматериала его смешивали с жидким раствором в указанном S/L соотношении фракций для образования пульпы. Затем проводили агитационное выщелачивание в лабораторных колоннах.

Массовая концентрация компонентов раствора для выщелачивания в итоговой пульпе, %, определялась по следующей формуле (на примере серной кислоты):

$$m_p(\text{H}_2\text{SO}_4) = \frac{m_L(\text{H}_2\text{SO}_4)}{M_p} \times 100, \quad (5)$$

где M_p – масса пульпы, состоящая из массы раствора (меняющегося в зависимости от соотношения концентраций реагентов в 1 л) и постоянной массы навески твердых сухих отходов, равной 50 г; $m_L(\text{H}_2\text{SO}_4)$ – масса серной кислоты в жидкой фракции пульпы при разном содержании в ней кислоты и хлорида натрия, г.

Концентрацию свинца в пульпе определяли стандартным способом на атомно-абсорбционном спектрометре «KVANT-AFA» (ООО «КОРТЭК»). Построение Q-Q графиков (квантиль-квантиль графики – критерий «goodness-of-fit» качества построения моделей) осуществляли в ПО Microsoft Excel 2010. Результаты эффективности извлечения свинца при предварительной активации хвостов и времени выщелачивания 0,25 ч (вариант I), а также при предварительной активации хвостов сухим способом в дезинтеграторе и выщелачивании в течение 1 ч (вариант II) представлены в табл. 5 и на рис. 3.

Из анализа рис. 3, а следует, что активационное воздействие при $\nu = 50$ Гц и продолжительности выщелачивания 0,25 ч обуславливает рост продуктивности обогащения при $\text{H}_2\text{SO}_4 = 0,8\text{--}0,9\%$ и $\text{NaCl} = 11,5\text{--}14\%$. Кроме того, прослеживается ярко выраженный второй максимум: $\text{Pb} = 28\%$ при $\text{H}_2\text{SO}_4 = 0,32\text{--}0,45\%$ и $\text{NaCl} = 5\text{--}7,6\%$. Изменение времени выщелачивания с 0,25 до 1 ч и ν до 200 Гц приводит к росту абсолютных значений и площади второй зоны локального максимума, которая существенным образом меняет представление о процессе (рис. 3, б). При $\text{H}_2\text{SO}_4 = 0,9\%$ рост доли NaCl с 1 до 14 % приводит к монотонному росту выхода свинца с 4 % до более чем 40 % ($\text{NaCl} = 13,5\%$). Площадь локального максимума ограничена областью от 0,5 до 0,7 % по H_2SO_4 и от 7 до 14 % по NaCl . Критерием goodness-of-fit для проверки качества четырех трехмерных моделей Q-Q служит график, приведенный на рис. 4.

Из анализа поверхностей отклика следует в целом согласованность полученных данных с результатами работ [43, 44] по обработке халькопиритов в мельнице тонкого измельчения, где рост концентрации H_2SO_4 был выше на 30 %. Выщелачивание Cu серной кислотой из руды [39] подтверждает увеличение продуктивности процесса с ростом числа оборотов ротора в дезинтеграторе с 50 до 200 Гц. В исследованиях [45, 46] также подтверждается эффективность применения DESI-15 для механоактивационного воздействия на геоматериалы.

Таблица 5

Эффект от предварительной механоактивации хвостов сухим способом

N эксперимента	$m_p(\text{H}_2\text{SO}_4)$, массовая концентрация кислоты в пульпе	$m_p(\text{NaCl})$, массовая концентрация хлорида натрия в пульпе	Варианты опытов	
	%	%	I	II
1	0,16	1,58	0,81	1,43
2	0,79	1,58	0,95	0,86
3	0,15	11,79	17,62	3,33
...	...	...	...	...
12	0,83	13,36	38,1	38,1
13	0,54	1,80	6,04	5,21
14	0,50	13,38	17,56	50,88

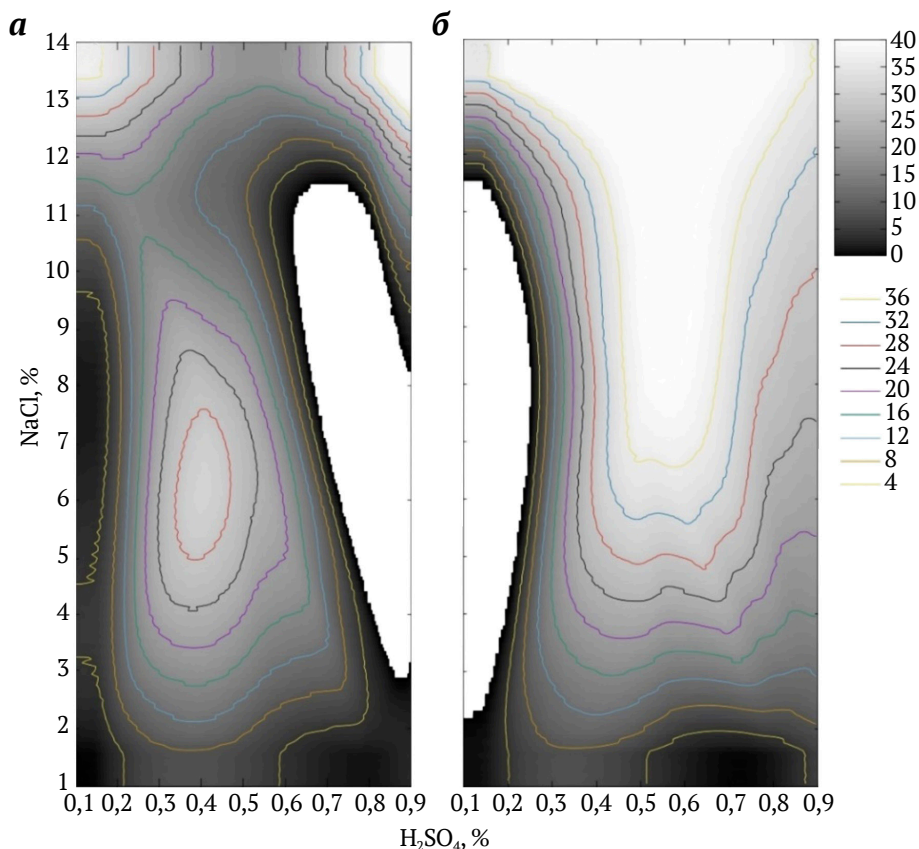


Рис. 3. Распределение выхода свинца из хвостов Мизурской фабрики:

a – выщелачивание Pb из предварительно активированных хвостов $\nu = 50$ Гц продолжительностью 0,25 ч (вариант II);
б – выщелачивание Pb из предварительно активированных хвостов $\nu = 200$ Гц продолжительностью 1 ч (вариант IV)

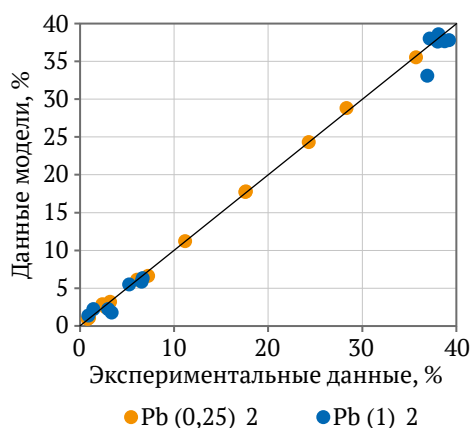


Рис. 4. Q–Q для двух вариантов моделей

Практическое применение

Значение полученных результатов заключается в возможности оптимизации технологической схемы электрохимического извлечения металлов из промышленных стоков на основании полученных закономерностей использования циркуляции рассолов через рассольные камеры. Кроме того, совокупность полученных результатов использования дезинтегратора для повторного извлечения свинца из геоматериалов позволит разработать методику расчета

параметров механоактивационного воздействия для повышения степени извлечения металлов из хвостов обогащения полиметаллического сырья РСО–Алания (Згидское, Садонское, Архонское месторождения).

Направления дальнейших исследований

Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию параметров существующих геотехнологий не только в отношении экологизации отдельных компонентов или технологических процессов. В связи с этим наиболее перспективным направлением является обоснование путей использования подземного пространства для полного удаления отходов (промышленных стоков и хвостов обогащения) после их многостадийной обработки.

Заключение

Основным направлением трансформации парадигмы природопользования должно быть циркуляционное управление отходами при добыче полезных ископаемых. Спад горного производства с выходом из строя действующих богатых и удобных для эксплуатации месторождений может быть минимизирован при освоении технологии подземного выщелачивания с освоением некондиционных запасов. Предлагаемые рекомендации по совершенствованию подземного выщелачивания руд в блоках позво-



ляют определить оптимальные условия для повышения полноты использования недр и уменьшения ущерба окружающей среде.

Деградация окружающей среды жидкими продуктами выщелачивания руд при их добыче может быть минимизирована технологическими средствами. Для очистки рудничных стоков перспективен метод электролиза и активации в диафрагменных электролизерах. При извлечении металлов с циркуляцией раствора через рассольные камеры содержания в дилуате с циркуляцией были низкими, а без циркуляции существенно превышали ПДК (для Na, Cl, SO₄ и Ca). Это доказывает принципиальную возможность управления процессами выщелачивания путем уси-

ления окислительного потенциала растворителей за счет добавления промышленных окислителей.

Хвостохранилища являются техногенными месторождениями, в пределах которых осуществляется естественное выщелачивание. Одним из ключевых результатов исследования является обоснование расширения области использования дезинтеграторов при направленном механо-химически-активационном воздействии. Рост продолжительности агитационного выщелачивания (как с использованием, так и без использования механоактивации) приводит к равномерному расширению локальных максимумов выхода Pb из пульпы при снижении минимальной концентрации NaCl с 11–12 до 7 % при H₂SO₄ = 0,6 %.

Список литературы / References

1. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects. *Hydrometallurgy*. 2015;157:306–324. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.08.022>
2. Liang W., Wang J., Leung C., Goh S., Sang S. Opportunities and challenges for gas coproduction from coal measure gas reservoirs with coal-shale-tight sandstone layers: A review. *Deep Underground Science and Engineering*. 2024. <https://doi.org/10.1002/dug2.12077>
3. Январёв Г.С., Бобомуротов Б.Б. Объемная цифровая модель глубоких горизонтов главной рудной залежи Урупского медно-колчеданного месторождения. *Геология и геофизика Юга России*. 2023;13(1):125–135. <https://doi.org/10.46698/VNC.2023.90.90.009>
Yanvarev G.S., Bobomurotov B.B. Volumetric digital model of deep horizons of the Main ore deposit of the Urupsky copper-cruste deposit. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023;13(1):125–135. (In Russ.) <https://doi.org/10.46698/VNC.2023.90.90.009>
4. Kukartsev V., Kozlova A., Kuimova O., Nelyub V., Gantimurov A. Using digital twins to create an inventory management system. *E3S Web of Conferences*. 2023;431:05016. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343105016>
5. Захаров В.Н., Каплунов Д.Р., Клебанов Д.А., Радченко Д.Н. Методические подходы к стандартизации сбора, хранения и анализа данных при управлении горнотехническими системами. *Горный журнал*. 2022;(12):55–61. <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.12.10>
Zakharov V.N., Kaplunov D.R., Klebanov D.A., Radchenko D.N. Methodical approaches to standardization of data acquisition, storage and analysis in management of geotechnical systems. *Gornyi Zhurnal*. 2022;(12):55–61. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.12.10>
6. Reddivari B.R., Vadapalli S., Sanduru B., Buddi T., Vafaeva K.M., Joshi A. Fabrication and mechanical properties of hybrid fibre-reinforced polymer hybrid composite with graphene nanoplatelets and multiwalled carbon nanotubes. *Cogent Engineering*. 2024;11(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2343586>
7. Ghorbani Y., Franzidis J.-P., Petersen J. Heap Leaching technology current state, innovations, and future directions: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2016;37(2):73–119. <https://doi.org/10.1080/08827508.2015.1115990>
8. Панфилов И.А., Антамошкин О.А., Федорова Н.В., Дерюгин Ф.Ф., Бянкин В.Е. Профилактика загрязнения воздушной среды при открытой разработке рудных месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(11-1):252–264. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_252
Panfilov I.A., Antamoshkin O.A., Fedorova N.V., Deryugin F.F., Byankin V.E. Prevention of air pollution during openpit mining of ore deposits. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(11-1):252–264. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_252
9. Chaikin L., Shoppert A., Valeev D., et al. Concentration of rare earth elements (Sc, Y, La, Ce, Nd, Sm) in bauxite residue (red mud) obtained by water and alkali leaching of bauxite sintering dust. *Minerals*. 2020;10(6):500. <https://doi.org/10.3390/min10060500>
10. Евдокимов С.И., Макоева А.К., Макисмов Р.Н., Дятлова Д.И. Разработка метода и прибора для измерения сил в контактах частиц в условиях флотации микродисперсий золота. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2023;15(1):81–96. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-1-81-96>
Evdokimov S.I., Makoeva A.K., Maksimov R.N., Dyatlova D.I. Development of a method and apparatus for measuring the forces in particle contacts under conditions of flotation of gold microdispersions. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023;15(1):81–96. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-1-81-96>
11. Shoppert A., Loginova I., Valeev D. Kinetics study of al extraction from desilicated coal fly ash by NaOH at atmospheric pressure. *Materials*. 2021;14:7700. <https://doi.org/10.3390/ma14247700>



12. Jiang H., Zhang H., Zhang X., Zhang J., Jiang Y. Experimental study on the influence of content and fineness of fly ash on the mechanical properties of grouting slurries. *Deep Underground Science and Engineering*. 2024. <https://doi.org/10.1002/dug2.12070>
13. Rasskazova A.V., Sekisov A.G., Kirilchukirilchu M.S., Vasyanovvasyanov Y.A. Stage-activation leaching of oxidized copper-gold ore: Theory and technology. *Eurasian Mining*. 2020;(1):52–55. <https://doi.org/10.17580/em.2020.01.10>
14. Chen T., Lei C., Yan B., Xiao X. Metal recovery from the copper sulfide tailing with leaching and fractional precipitation technology. *Hydrometallurgy*. 2014;147–148:178–182. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.05.018>
15. Хайрутдинов М.М., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Тюляева Ю.С., Хайрутдинов А.М. Бесцементные закладочные смеси на основе водорастворимых техногенных отходов. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020;331(11):30–36. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/11/2883>
Khayrutdinov M.M., Kongar-Syuryun Ch.B., Tyulyaeva Yu.S., Khayrutdinov A.M. Cementless backfill mixtures based on water-soluble manmade waste. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020;331(11):30–36. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/11/2883>
16. Vrancken C., Longhurst P.J., Wagland S.T. Critical review of real-time methods for solid waste characterisation: Informing material recovery and fuel production. *Waste Management*. 2017;61:40–57. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.019>
17. Zhao H., Zhang Y., Zhang X., et al. The dissolution and passivation mechanism of chalcopyrite in bioleaching: An overview. *Minerals Engineering*. 2019;136:140–154. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.03.014>
18. Подрезов Д.Р. Задачи совершенствования управления и повышения эффективности функционирования технологических блоков рудника подземного скважинного выщелачивания урана. *Горные науки и технологии*. 2020;5(2):131–153. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-131-153>
Podrezov D.R. Issues of improving control and increasing efficiency of production blocks at an ISL uranium mine. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(2):131–153. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-131-153>
19. Гарифулина И.Ю., Абдулхалимов А.Г., Засеев И.А., Майстров Ю.А. Перспективы разработки Садонских месторождений подземным выщелачиванием. *Горные науки и технологии*. 2020;5(4):358–366. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-4-358-366>
Garifulina I.Y., Abdulkhalimov A.H., Zaseev I.A., Maystrov Y.A. Prospects for development of sadon deposits by in-situ leaching. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(4):358–366. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-4-358-366>
20. Джиоева А.К. Совершенствование технологии подземного выщелачивания при обеспечении экологически безопасной отработки рудных месторождений. *Безопасность труда в промышленности*. 2022;(9):62–68. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2022-9-62-68>
Dzhioeva A.K. Improvement of underground leaching technology while ensuring environmentally safe development of ore deposits. *Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti*. 2022;(9):62–68. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2022-9-62-68>
21. Feng X., Wang X. Characteristics of Electrical Resistance Alteration during in situ leaching of ion-adsorption-type rare earth ore. *Minerals*. 2024;14:92. <https://doi.org/10.3390/min14010092>
22. Wu Zh., Liao H., Lu K. Mining consensus sequence in multi-criteria group decision making with incomparability of alternatives and conflicts of experts. *Information Sciences*. 2022;610:359–380. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2022.07.058>
23. Deveci M., Gokasar I., Brito-Parada P.R. A comprehensive model for socially responsible rehabilitation of mining sites using Q-rung orthopair fuzzy sets and combinative distance-based assessment. *Expert Systems with Applications*. 2022;200:117155. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117155>
24. McManus S., Rahman A., Coombes J., Horta A. Uncertainty assessment of spatial domain models in early stage mining projects – A review. *Ore Geology Reviews*. 2021;133:104098. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104098>
25. Абас Висам Махди Абас, Арутюнян Р.В. Моделирование нелинейных динамических и стационарных систем на основе интегро-функциональных рядов Вольтерры и различных классов квадратурных формул. *Математическое моделирование и численные методы*. 2021;(2):68–85. <https://doi.org/10.18698/2309-3684-2021-2-6885>
Abas Wisam Mahdi Abas, Arutyunyan R.V. Modeling of nonlinear dynamic and stationary systems based on Volterra integro-functional series and various classes of quadrature formulas. *Mathematical Modeling and Computational Methods*. 2021;(2):68–85. (In Russ.) <https://doi.org/10.18698/2309-3684-2021-2-6885>
26. Yan J., Xu M. Energy and circular economy in sustainability transitions. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021;169:105471. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105471>
27. Shutaleva A. Ecological Culture and critical thinking: building of a sustainable future. *Sustainability*. 2023;15:13492. <https://doi.org/10.3390/su151813492>



28. Игнатьева М.Н., Юрак В.В., Душин А.В., Стровский В.Е. Техногенные минеральные образования: проблемы перехода к экономике замкнутого цикла. *Горные науки и технологии*. 2021;6(2):73–89. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-73-89>
Ignatyeva M.N., Yurak V.V., Dushin A.V., Strovsky V.E. Technogenic mineral accumulations: problems of transition to circular economy. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(2):73–89. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-73-89>
29. Brigida V., Golik V.I., Voitovich E.V. et al. Technogenic reservoirs resources of mine methane when implementing the circular waste management concept. *Resources*. 2024;13(2):33. <https://doi.org/10.3390/resources13020033>
30. Ma L., Ghorbani Y., Kongar-Syuryun C.B., Khayrutdinov M.M., Klyuev R.V., Petenko A. Dynamics of backfill compressive strength obtained from enrichment tails for the circular waste management. *Resources, Conservation and Recycling Advances*. 2024;23:200224. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2024.200224>
31. Ключев Р.В., Бригида В.С., Лобков К.Ю. и др. К вопросу мониторинга трещинообразования в природно-технических системах при сдвигении земной поверхности. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(11–1):292–304. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_292
Klyuev R.V., Brigida V.S., Lobkov K.Y. et al. On the issue of monitoring crack formation in natural-technical systems during earth surface displacements. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(11–1):292–304. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_292
32. Ayaz A., Ozyurt O., Al-Rahmi W.M., et al. Exploring gamification research trends using topic modeling. In: *IEEE Access*. 2023;11:119676–119692. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3326444>
33. Klyuev R., Tekiev M., Silaev V., et al. Sustainable operation analysis of the mining industry power supply system. In: *E3S Web of Conferences*. 2021;326:00016. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132600016>
34. Бригида В.С., Мишулина С.И., Стась Г.В. Перспективные направления экологизации структурных элементов туристского продукта краснодарского края (на примере транспортной составляющей). *Устойчивое развитие горных территорий*. 2020;12(1):24–25. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2020-12-1-18-25>
Brigida V.S., Mishulina S.I., Stas G.V. Perspective directions of “ecologisation” of structural elements of a tourist product of Krasnodar region (case study of transportation component). *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020;12(1):24–25. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2020-12-1-18-25>
35. Pavlov M.V., Vafaeva K.M., Karpov D.F. et al. Impact of environmental factors on indoor air temperature in gas-fired radiant heated cultivated structures. In: *E3S Web of Conferences. International Conference on “Advanced Materials for Green Chemistry and Sustainable Environment” (AMGSE-2024)*. 2024;511:01036. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202451101036>
36. Vafaeva K.M., Karpov D.F., Pavlov M.V. et al. Analyzing thermal images to evaluate thermal protection in residential structures: lessons from russian practices. In: *E3S Web of Conferences. International Conference on “Advanced Materials for Green Chemistry and Sustainable Environment” (AMGSE-2024)*. 2024;511:01037. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202451101037>
37. Li G., Zhou Q., Zhu Z., et al. Selective leaching of nickel and cobalt from limonitic laterite using phosphoric acid: An alternative for value-added processing of laterite. *Journal of Cleaner Production*. 2018;189:620–626. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.083>
38. Конгар-Сюрюн Ч.Б., Ковальский Е.Р. Твердеющие закладочные смеси на калийных рудниках: перспективные материалы, регулирующие напряжённо-деформированное состояние массива. *Геология и геофизика Юга России*. 2023;13(4):177–187. <https://doi.org/10.46698/VNC.2023.34.99.014>
Kongar-Syuryun Ch.B., Kovalski E.R. Hardening backfill at potash mines: promising materials regulating stress-strain behavior of rock mass. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii*. 2023;13(4):177–187. <https://doi.org/10.46698/VNC.2023.34.99.014>
39. Кондратьев Ю.И., Выхребенц А.С., Бетров З.С., Дзеранова К.Б. Снижение энергозатрат на подземное электрохимическое выщелачивание металлов из руд. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2017;(4):419–426. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2017-9-4-419-426>
Kondratyev Yu.I., Vyskrebets A.S., Betrozov Z.C., Dzeranova K.B. Energy costs reduction on underground electrochemical metal leaching from ores. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2017;(4):419–426. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2017-9-4-419-426>
40. MacCarthy J., Nosrati A., Skinner W., Addai-Mensah J. Atmospheric acid leaching mechanisms and kinetics and rheological studies of a low grade saprolitic nickel laterite ore. *Hydrometallurgy*. 2016;160:26–37. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.11.004>
41. Ляшенко В.И., Хоменко О.Е., Голик В.И. Развитие природоохранных и ресурсосберегающих технологий подземной добычи руд в энергонарушенных массивах. *Горные науки и технологии*. 2020;5(2):104–118. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-104-118>
Lyashenko V.I., Khomenko O.E., Golik V.I. Friendly and Resource-Saving Methods of Underground Ore Mining in Disturbed Rock Masses. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(2):104–118. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-104-118>



42. Ковальский Е.Р., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Петров Д.Н. Проблемы и перспективы внедрения многостадийной выемки руды при отработке запасов калийных месторождений. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2023;15(2):349–364. <https://doi.org/10.17073/10.21177/1998-4502-2023-15-2-349-364>
Kovalski E., Kongar-Syuryun C., Petrov D. Challenges and prospects for several-stage stoping in potash minining. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023;15(2):349–364. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-2-349-364>
43. Palaniandy S. Impact of mechanochemical effect on chalcopryrite leaching. *International Journal of Mineral Processing*. 2015;136:56–65. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2014.10.005>
44. Minagawa M., Hisatomi Sh., Kato T., et al. Enhancement of copper dissolution by mechanochemical activation of copper ores: Correlation between leaching experiments and DEM simulations. *Advanced Powder Technology*. 2018;29(3):471–478. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2017.11.031>
45. Bumanisa G., Bajarea D. Compressive strength of cement mortar affected by sand micro filler obtained with collision milling in disintegrator. *Procedia Engineering*. 2017;172:149–156. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.037>
46. Basturkcü H., Achimovicova M., Kanuchova M., Acarkan N. Mechanochemical pre-treatment of lateritic nickel ore with sulfur followed by atmospheric leaching. *Hydrometallurgy*. 2018;181:43–52. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.08.016>

Информация об авторах

Владимир Иванович Голик – доктор технических наук, профессор кафедры техники и технологии горного и нефтегазового производства, Московский политехнический университет (МПУ), г. Москва, Российская Федерация; профессор кафедры горного дела, Северо-Кавказского горно-металлургического института (СКГТИ), г. Владикавказ, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-1181-8452](https://orcid.org/0000-0002-1181-8452), Scopus ID [6602135324](https://orcid.org/6602135324); e-mail v.i.golik@mail.ru

Юрий Иванович Разоренов – доктор технических наук, профессор, ректор, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, г. Новочеркасск, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-8171-0749](https://orcid.org/0000-0001-8171-0749), Scopus ID [57194146509](https://orcid.org/57194146509); e-mail rektorat@npi-tu.ru

Нияз Гадым оглы Валиев – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой горного дела, Уральский государственный горный университет (УГТУ), г. Екатеринбург, Россия; ORCID [0000-0002-5556-2217](https://orcid.org/0000-0002-5556-2217), Scopus ID [55749527900](https://orcid.org/55749527900); e-mail science@ursmu.ru

Оксана Александровна Гаврина – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории управления горнотехническими системами, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН), г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-9712-9075](https://orcid.org/0000-0002-9712-9075), Scopus ID [57204639532](https://orcid.org/57204639532)

Information about the authors

Vladimir I. Golik – Dr. Sci. (Eng.), Professor of Technique and Technology of Mining and Oil and Gas Production Department, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation; Professor of Mining Department, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation; ORCID [0000-0002-1181-8452](https://orcid.org/0000-0002-1181-8452), Scopus ID [6602135324](https://orcid.org/6602135324); e-mail v.i.golik@mail.ru

Yuri I. Razorenov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector of Platov South-Russian State Polytechnic University NPI, Novocherkassk, Russian Federation; ORCID [0000-0001-8171-0749](https://orcid.org/0000-0001-8171-0749), Scopus ID [57194146509](https://orcid.org/57194146509); e-mail rektorat@npi-tu.ru

Niyaz G. Valiev – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Mining, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation; ORCID [0000-0002-5556-2217](https://orcid.org/0000-0002-5556-2217), Scopus ID [55749527900](https://orcid.org/55749527900); e-mail science@ursmu.ru

Oksana A. Gavrina – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of Mining Systems Control Laboratory, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-9712-9075](https://orcid.org/0000-0002-9712-9075), Scopus ID [57204639532](https://orcid.org/57204639532)

Поступила в редакцию 24.11.2023
Поступила после рецензирования 29.01.2024
Принята к публикации 01.02.2024

Received 24.11.2023
Revised 29.01.2024
Accepted 01.02.2024



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-04-259>

УДК 528.9



Обоснование экологической безопасности при эксплуатации объектов метрополитена с учетом гидрогеологического риска

С. А. Жуков

АО «Мосинжпроект», г. Москва, Российская Федерация

fragrante@mail.ru

Аннотация

В современном мире стремительной урбанизации экологическая безопасность становится ключевым аспектом городского планирования и управления. Проблематика экологической безопасности охватывает широкий спектр вопросов – от снижения уровня загрязнения и сохранения биоразнообразия до обеспечения устойчивого использования природных ресурсов. В этом контексте объекты метрополитена как неотъемлемая часть городской инфраструктуры играют важную роль в обеспечении мобильности городского населения, однако они также представляют собой потенциальный источник экологических проблем. Эксплуатация объектов метрополитена сопровождается шумовым загрязнением, эмиссией вредных веществ, так как системы метрополитена используют энергию, производимую из ископаемых источников, энергопотреблением, нежелательным влиянием на подземные воды и другими негативными экологическими аспектами. Также не менее важным является вопрос утилизации отходов и строительных материалов, используемых при строительстве и ремонте метрополитенов. Целью данного исследования являлась оценка экологической безопасности при эксплуатации объектов метрополитена. Рассмотрение этой темы особенно актуально в свете глобального стремления к устойчивому развитию и необходимости обеспечения высокого качества жизни городского населения. Оценка экологической безопасности при эксплуатации объектов метрополитена предполагается осуществлять на основе комплексного подхода, подразумевающего проведение натурных исследований и моделирования характера распределения дефектов в конструкциях подземных сооружений метрополитена под воздействием гидрогеологических рисков. Системный подход к оценке экологической безопасности при эксплуатации объектов метрополитена, основанный на моделировании развития дефектов в конструкциях тоннелей под действием гидрогеологических факторов, позволит структурировать имеющуюся информацию по потенциальным авариям, выработать методы мониторинга и меры по минимизации рисков, ведущих к снижению экологической устойчивости подземных объектов транспортной структуры города. Полученные результаты исследований, включающие в себя систематизацию критериев экологической безопасности при эксплуатации метрополитена, анализ дефектов в конструкциях тоннелей под действием гидрогеологических факторов, являются основой для дальнейшей разработки методики обеспечения экологически безопасной эксплуатации городских транспортных тоннелей.

Ключевые слова

метрополитен, экологическая безопасность, устойчивое развитие, городская транспортная система, экологические стандарты, инновационные технологии, риски

Для цитирования

Zhukov S. A. Substantiation of environmental safety in metro facility operations considering hydrogeological risks. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):283–291. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-04-259>

SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research paper

Substantiation of environmental safety in metro facility operations considering hydrogeological risks

S. A. Zhukov

Mosinzhproekt JSC, Moscow, Russian Federation

fragrante@mail.ru

Abstract

In today's world of rapid urbanization, environmental safety has become a key aspect of urban planning and management. The issue of environmental safety encompasses a wide range of concerns, from pollution reduction and biodiversity conservation to ensuring the sustainable use of natural resources. In this context,



metro facilities, as an integral part of urban infrastructure, play a crucial role in providing mobility for urban populations, yet they also pose potential environmental challenges. The operation of metro facilities is associated with noise pollution, emissions of harmful substances due to the use of energy produced from fossil fuels, energy consumption, undesirable impacts on groundwater, and other negative environmental aspects. Equally important is the issue of waste disposal and the use of construction materials during the building and maintenance of metro systems. The aim of this study was to assess the environmental safety of metro facility operations. The consideration of this topic is particularly relevant in light of global efforts towards sustainable development and the need to ensure a high quality of life for urban populations. The assessment of environmental safety in metro operations is proposed to be conducted through a comprehensive approach, involving field studies and modelling the distribution patterns of defects in metro structures under the influence of hydrogeological risks. A systematic approach to evaluating environmental safety in metro operations, based on modelling the development of defects in tunnel structures under the influence of hydrogeological factors, will help organize existing information on potential accidents and develop monitoring methods and measures to minimize risks that compromise the environmental sustainability of underground transport infrastructure. The research results, which include the systematization of environmental safety criteria for metro operations and the analysis of tunnel structure defects caused by hydrogeological factors, provide the basis for further developing methods to ensure environmentally safe operation of urban transport tunnels.

Keywords

metro, environmental safety, sustainable development, urban transport system, environmental standards, innovative technologies, risks

For citation

Zhukov S.A. Substantiation of environmental safety in metro facility operations considering hydrogeological risks. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):283–291. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-04-259>

Введение

Для оценки экологической безопасности метрополитенов необходимо учитывать ряд ключевых критериев, которые помогут обеспечить устойчивое функционирование этих систем.

Гидрогеологический критерий: включает определение гидростатического давления подземных вод, их минерализацию, состав.

Эмиссии загрязняющих веществ: включает измерение уровней выбросов углекислого газа, азотных оксидов и других загрязнителей, которые могут оказывать влияние на качество воздуха в городах. Особое внимание следует уделить местам с высокой концентрацией людей, таким как станции метро и пересадочные узлы.

Шумовое загрязнение: работа метрополитенов часто сопровождается высоким уровнем шума, который может негативно сказываться на здоровье и качестве жизни городских жителей. Важно оценивать уровни шума и принимать меры по их снижению.

Энергоэффективность: эффективное использование энергии является ключевым фактором в снижении экологического воздействия метрополитенов. Это включает использование энергосберегающих технологий, а также переход на возобновляемые источники энергии.

Утилизация отходов и использование материалов: важными аспектами являются управление отходами, возникающими в процессе строительства и эксплуатации метрополитенов, а также выбор экологически устойчивых материалов.

Влияние на экосистемы и биоразнообразие: необходимо учитывать воздействие метрополитенов на природные экосистемы, в частности, при строительстве новых линий метро и развитии инфраструктуры.

Применение этих критериев требует комплексного подхода, включая регулярный мониторинг, использование современных технологий и инновационных решений. Также важно разрабатывать и реализовывать нормативно-правовые акты, которые будут регулировать экологические аспекты функционирования метрополитенов.

Критерии экологической безопасности должны регулярно пересматриваться и обновляться в соответствии с последними научными исследованиями и технологическими достижениями. Это обеспечит возможность адаптации и постоянного улучшения в ответ на меняющиеся условия и потенциальные нештатные ситуации.

Применение этих критериев поможет не только снизить негативное воздействие метрополитенов на окружающую среду, но и повысить их эффективность и удобство для персонала и посетителей, способствуя тем самым устойчивому развитию городских транспортных систем.

Примеры успешных практик

Метрополитен Стокгольма, Швеция: Один из наиболее экологически чистых метрополитенов в мире. Благодаря использованию 100% возобновляемой энергии для метropоездов Стокгольм значительно снизил углеродный след своей транспортной системы. Кроме того, внедрены эффективные системы вентиляции и шумоподавления.

Метрополитен Сингапура: Пример высокоэффективной и инновационной транспортной системы. Сингапурский метрополитен использует регенеративное торможение, которое позволяет снизить общее потребление энергии. Также применяются строгие стандарты по снижению шума и загрязнения воздуха.

Лондонский метрополитен, Великобритания: Внедрение программы по сокращению энергопотребления и улучшению качества воздуха. Лондонский метрополитен также активно работает над улучшением своей инфраструктуры для снижения уровня шума и вибрации.

Примеры с проблемными аспектами

Метрополитен Нью-Йорка, США: Несмотря на свою величину и значимость сталкивается с рядом экологических проблем, связанных главным образом с устаревающей инфраструктурой и высокими уровнями шума. Проекты по модернизации инфраструктуры и повышению энергоэффективности находятся в процессе разработки и реализации.

Московский метрополитен, Россия: Хотя в последние годы были предприняты шаги по улучшению экологической безопасности, такие как внедрение энергоэффективного освещения и улучшенная вентиляция, все еще существуют проблемы, связанные с изношенностью инфраструктуры и изменением геолого-гидрологической обстановки из-за изменения городского ландшафта.

Материалы и методы

Одним из самых опасных видов экологических рисков на подземных объектах метрополитена, ведущих к существенному снижению экологической безопасности, являются гидрогеологические риски, т.е. возможные социальные и экономические потери в результате развития неблагоприятных гидрогеологических процессов, что выражается в снижении устойчивости выработок метрополитена и экологической безопасности системы «породный массив – подземное сооружение – окружающая среда». Гидрогеологические риски проявляются в виде формирования

таких дефектов в несущих конструкциях выработок, как свищи, течи, выносы водных масс и грунта в подземный объект, прорывы воды и плывунов и т. п.

Рассмотрим в качестве примера оценки уровня экологической безопасности на существующий объект Московского метрополитена, основываясь на данных инженерно-геологических изысканий на различных период времени. Фотоматериал по перегонному тоннелю линии Московского метрополитена представлен на рис. 1–3.

Натурным обследованием конструкций на аварийном участке перегонного тоннеля линии Московского метрополитена было выявлено наличие следующих наиболее характерных дефектов и повреждений:

- сколы бетона в стеновых блоках, в том числе на некоторых участках с обнажением арматуры;
- сколы бетона в плитах перекрытия, в том числе на некоторых участках с обнажением арматуры;
- выщелачивания на стеновых блоках перегонного тоннеля;
- выщелачивания на плитах перекрытия перегонного тоннеля;
- мокрые пятна на стеновых блоках перегонного тоннеля;
- нарушение заделки швов в стеновых блоках и плитах перекрытия;
- активные течи;
- трещины в плитах перекрытия величиной раскрытия до 0,2 мм.

Классификация выявленных дефектов отражена в табл. 1.

Результаты

Геологические разрезы по рассматриваемому перегону на различные периоды времени представлены на рис. 4, 5.



Рис. 1. Выщелачивание и мокрое пятно в межкольцевом и межблочном стыке обделки, активная течь. Трещина в спинке тубинга

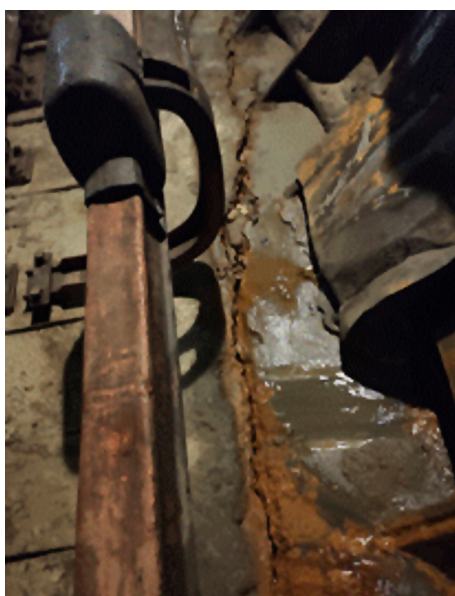


Рис. 2. Вынос грунта в область контактного рельса



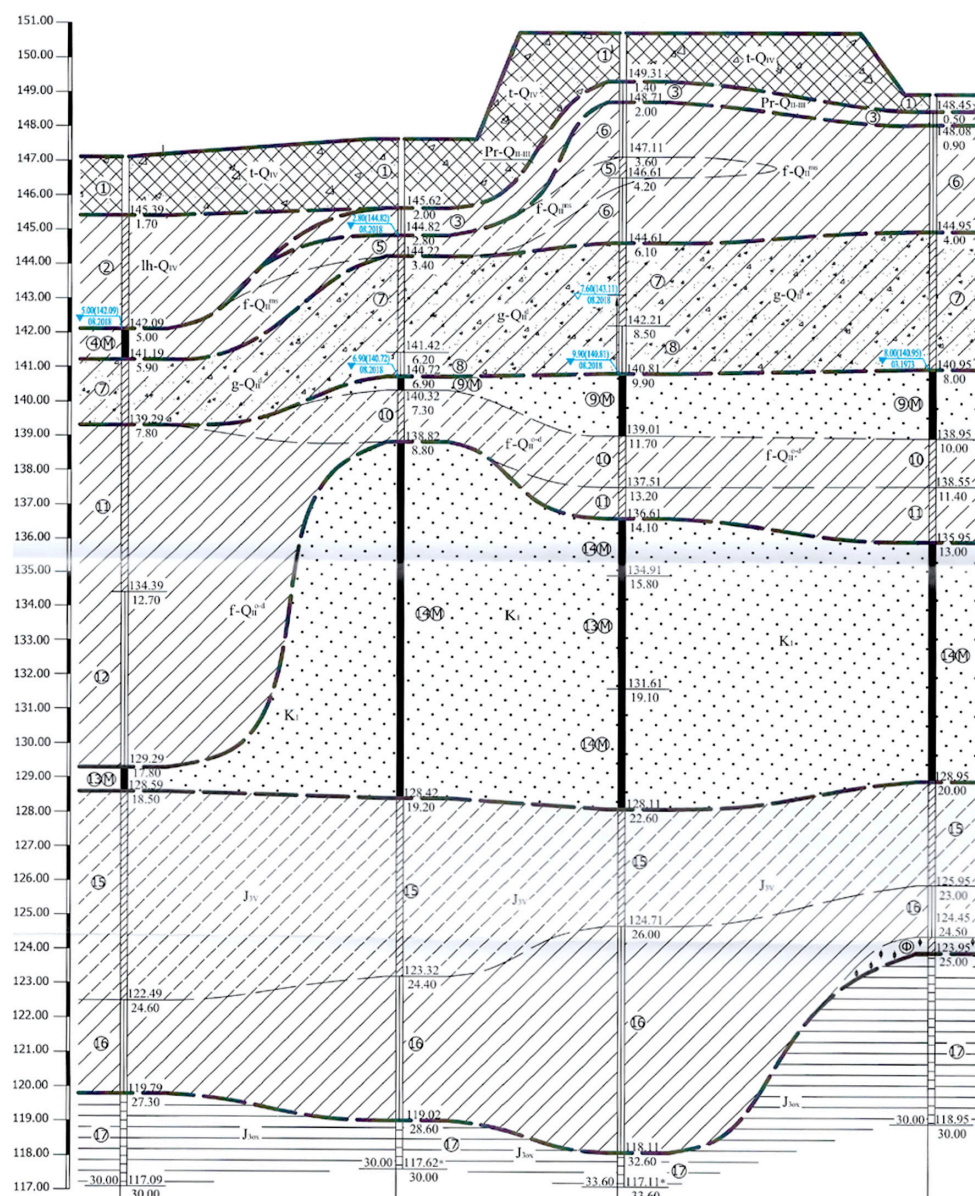
Рис. 3. Выщелачивание и разрушение бетонной конструкции плиты перекрытия в результате эрозии гидроизоляции



Таблица 1

Классификация дефектов (согласно ГОСТ Р 57208–2016)

№ п/п	Вид дефекта	Возможные причины появления	Возможные последствия
1	Сколы бетона в стеновых блоках и плитах перекрытия, в том числе на некоторых участках с обнажением арматуры	Механическое воздействие	Снижение несущей способности пропорционально уменьшению площади сечения
2	Выщелачивания на стеновых блоках и плитах перекрытия перегонного тоннеля. Мокрые пятна на стеновых блоках. Капез. Активные течи	Нарушение гидроизоляции	Разрушение бетона конструкций, коррозия металла и арматуры. Снижение эксплуатационных характеристик объектов
3	Уступы в стыках плит перекрытий перегонного тоннеля величиной до 30 мм	Ошибки при изготовлении и монтаже	Степень снижения несущей способности определяется расчетом
4	Трещины в плитах перекрытия величиной раскрытия до 0,2 мм	Усадка в результате принятого режима тепловлажностной обработки состава бетонной смеси, свойств цемента и т. п.	На несущую способность не влияют. Могут снизить долговечность
5	Нарушение заделки швов в стеновых блоках и плитах перекрытия	При эксплуатации тоннелей и метрополитенов (в том числе вибрационные воздействия от подвижного состава)	Водообводненность конструкций и снижение эксплуатационных характеристик объекта



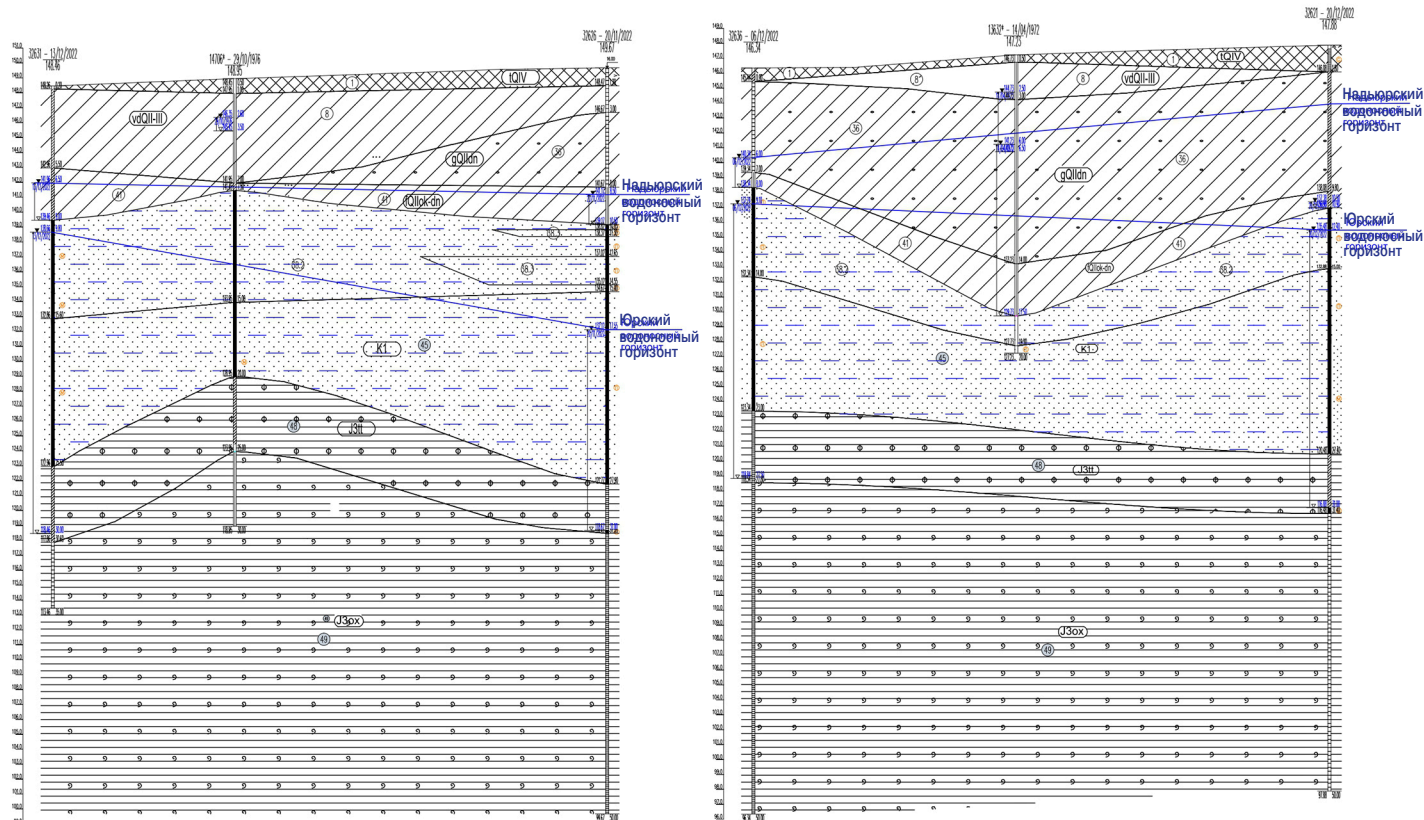


Рис. 5. Инженерно-геологический разрез участка перегонного тоннеля между станциями на период времени t_2

Из представленных разрезов следует, что уровень водоносного горизонта менялся с течением времени, что значительно повлияло на физико-механические свойства пород и развитие дефектов в несущих конструкциях тоннеля, прежде всего на изменение геометрии обделки перегонного тоннеля.

Для определения скорости понижения и восстановления водопитока были проведены расчеты фильтрационных свойств водоносного горизонта вблизи перегонного тоннеля (табл. 2).

По данным наблюдений за состоянием уровня водоносного горизонта вблизи перегонного тоннеля было выявлено изменение гидрологического режима (рис. 6, 7). Из представленных графиков следует, что в течение продолжительного периода времени уровень водоносного горизонта изменялся в диапазоне значений от 2 до 16 м.

В рамках обследования технического состояния проблемных участков перегонных тоннелей были произведены натурные измерения фактических геометрических размеров конструкций тоннеля. Измерения фактических размеров исследуемых конструкций проводились ручным лазерным дальномером «Leica DISTO D2». Точность измерений: $\pm 1,5$ мм. По результатам измерений были выявлены отклонения фактических геометрических размеров обделки от проектных, значения которых превышают 50 мм в рассматриваемых пикетах (рис. 8). Выделенная область на рис. 8, а представляет собой негабаритный

участок обделки тоннеля метрополитена, который может сформировать развитие потенциальной аварийной ситуации. Выделенная красным цветом область на рис. 8, б представляет собой негабаритный участок обделки тоннеля метрополитена до процесса усиления основания лотковой зоны, которая может сформировать развитие потенциальной аварийной ситуации, а синим цветом выделены результаты измерений после процесса усиления основания лотковой зоны, что позволило сократить деформацию со 100 до 40 мм.

Таблица 2

Характеристика водоносного горизонта

Характеристика	Значение
Водоносный горизонт	Напорный
Мощность горизонта, Н м	17,8
Радиус скважины, м	0,063
Продолжительность откачки, сут	0,5
Дебит, м ³ /сут	64,8
Статический уровень, м	7,2
Динамический уровень, м	23,45
Понижение уровня, м	16,25

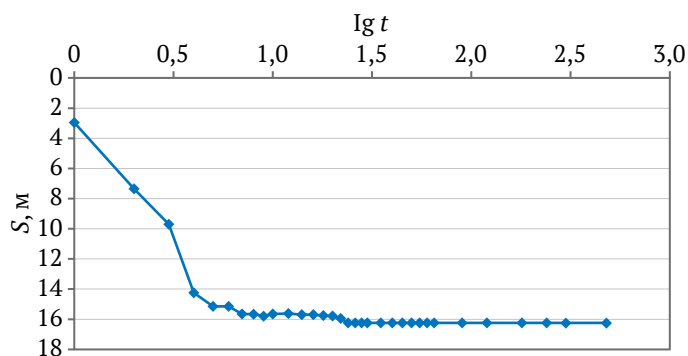


Рис. 6. График прослеживания понижения уровня в скважине

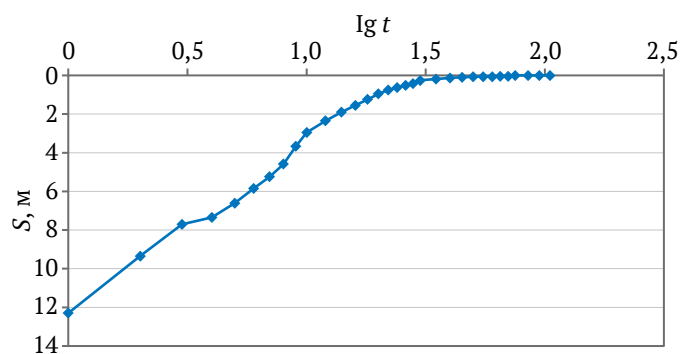
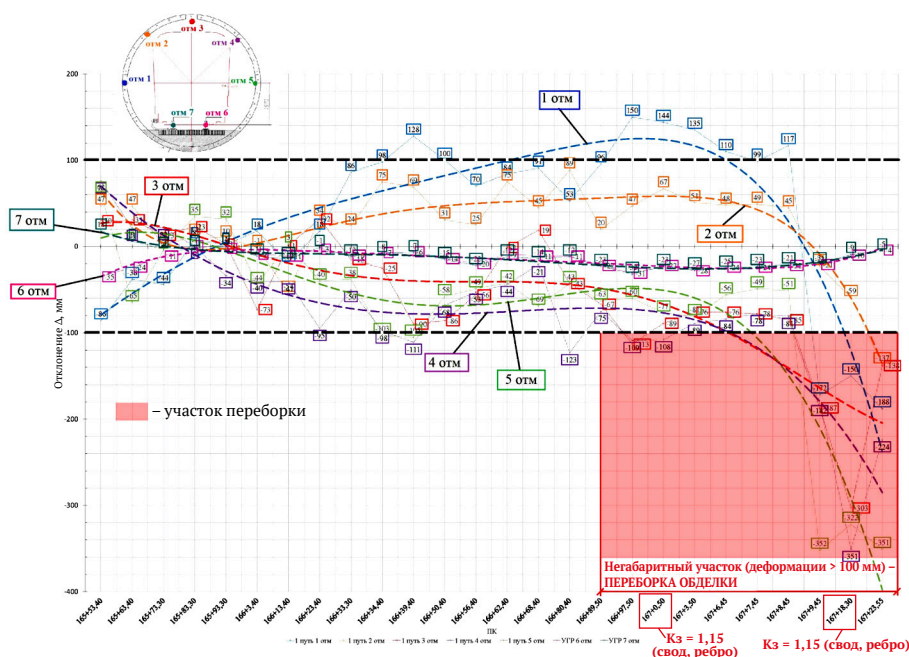
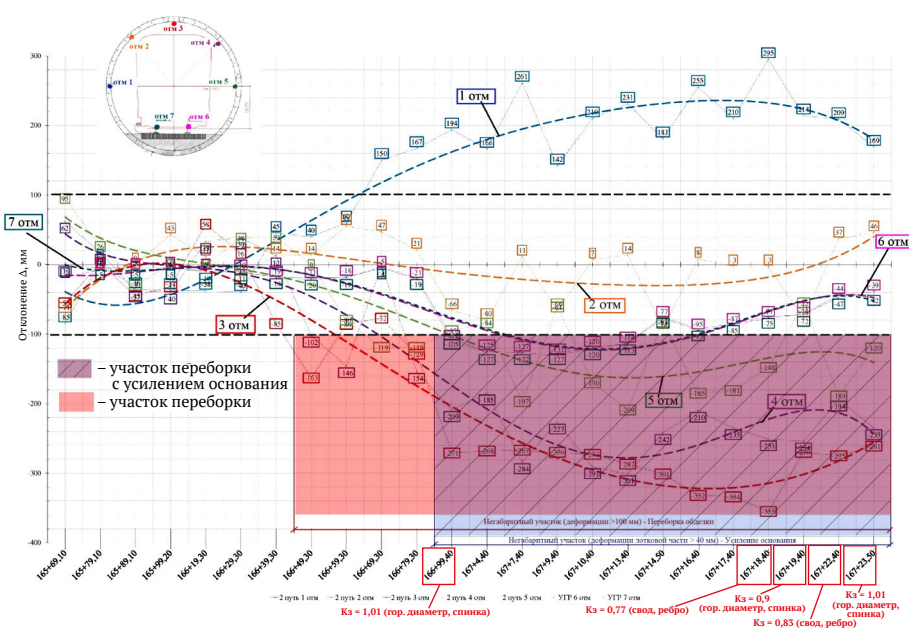


Рис. 7. График прослеживания восстановления уровня в скважине



а



б

Рис. 8. График деформации обделки:
а – первого пути (левого перегонного тоннеля); б – второго пути (правого перегонного тоннеля)

Из рис. 8 следует, что деформационные процессы, обусловленные увеличением притока подземных вод к обделке тоннеля, приводят к трещинообразованию в конструкции чугунного тюбинга, что, в свою очередь, способствует формированию течей и вывалу грунта во внутреннее пространство тоннеля, в том числе и на путевые участки.

По результатам натурного обследования была составлена карта дефектов обделки, фрагмент которой приведен на рис. 9.

Выводы

Выявленные изменения конструкции обделки тоннеля показали, что 60% течей приурочено к местам расположения технологических швов. Тело тюбинга также начинает фильтровать воду, усугубляются процессы выщелачивания с появлением мокрых пятен. Так как вмещающий породный массив сложен слабыми неустойчивыми грунтами, вынос грунтовых масс в пространство тоннеля может повлечь его осадку, что, в свою очередь, вызовет деформации и оседания земной поверхности. Таким образом, наблюдается ярко выраженное снижение уровня экологической

и геотехнической безопасности перегонного тоннеля метрополитена.

Полученные результаты исследований, включающие в себя анализ дефектов в конструкциях тоннелей под действием гидрогеологических факторов, являются основой для дальнейшего определения приемлемых рисков и разработки методики обеспечения экологически безопасной эксплуатации городских транспортных тоннелей метрополитена.

В дальнейшем планируется создание модели геомеханических воздействий на сооружения метрополитена. Моделирование позволит оценить, насколько такие геомеханические проявления, как карстовые процессы, осадки земной поверхности, пучение грунта, изменение режима грунтовых вод, участвуют в формировании напряженно-деформированного состояния сборной обделки перегонных тоннелей. Моделирование предполагается проводить трехмерным численным методом в программном пакете ANSYS Workbench. Сравнение результатов, полученных при моделировании с экспериментальными данными, позволит оценить достоверность предлагаемой методики.

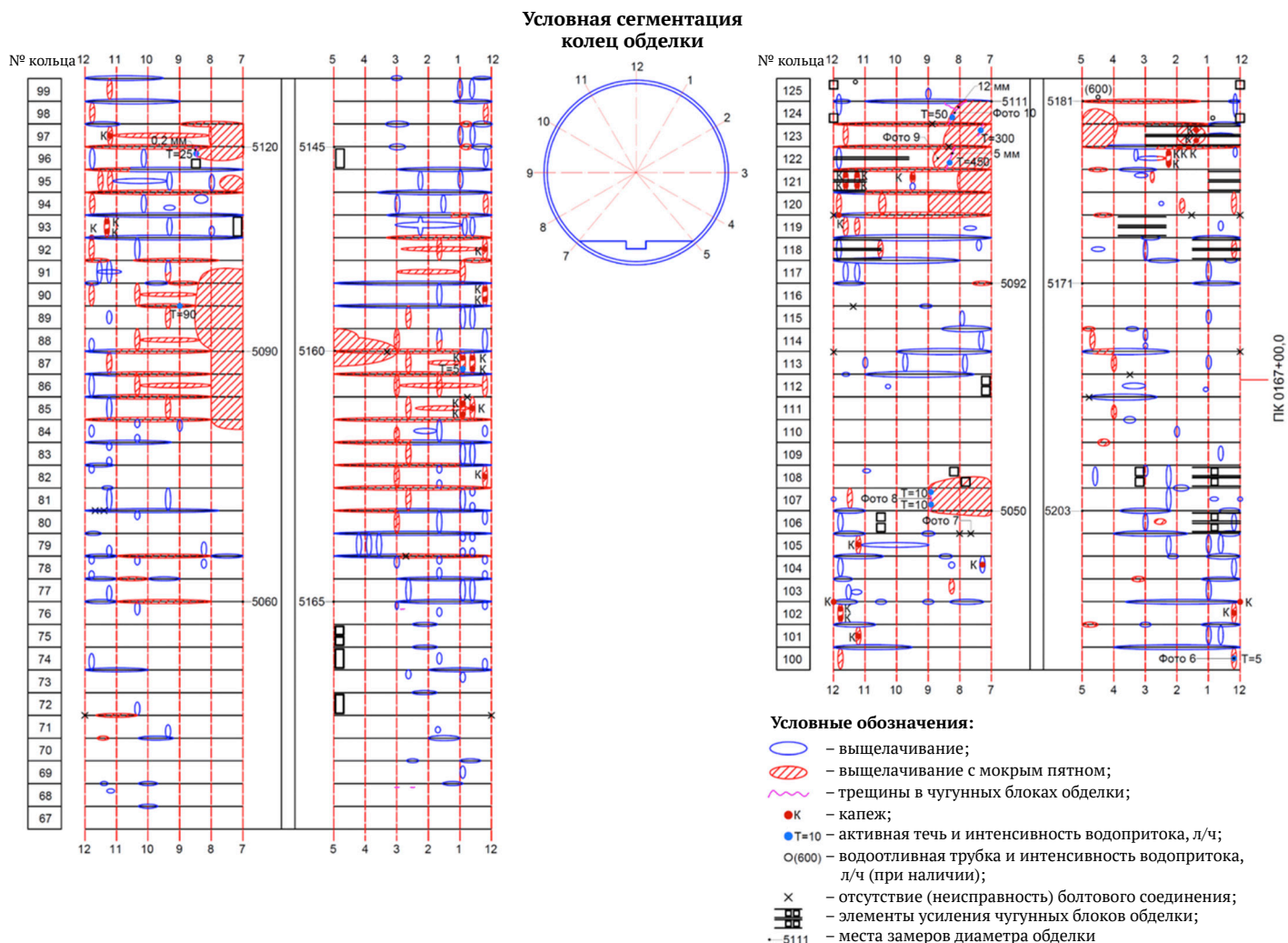


Рис. 9. Карта дефектов обделки, полученных в результате натурного обследования действующих объектов (ПК167+00,0)



Список литературы / References

1. Куликова Е.Ю., Баловцев С.В., Скопинцева О.В. Комплексная оценка геотехнических рисков в шахтном и подземном строительстве. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2023;15(1):7–16. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-1-7-16>
Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O. V. Complex estimation of geotechnical risks in mine and underground construction. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023;15(1):7–16. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-1-7-16>
2. Куликова Е.Ю. Управление безопасностью и риском в подземном строительстве как сложный информационный процесс. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(2–1):134–143. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-134-143>
Kulikova E. Yu. Safety and risk management in underground construction as a complex information process. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(2–1):134–143. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-134-143>
3. He X. C., Xu Y. S., Shen S. L., Zhou A. N. Geological environment problems during metro shield tunnelling in Shenzhen, China. *Arabian Journal of Geosciences*. 2020;13(2):87. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-5071-z>
4. Xu Y. S., Shen J. S., Zhou A. N., Arulrajah A. Geological and hydrogeological environment with geohazards during underground construction in Hangzhou: a review. *Arabian Journal of Geosciences*. 2018;11:544. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3894-7>
5. Lin X.-T., Chen R.-P., Wu H.-N., Cheng H.-Zh. Deformation behaviors of existing tunnels caused by shield tunnelling undercrossing with oblique angle. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019;89:78–90. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.03.021>
6. Merisalu J., Sundell J., Rosén L. Probabilistic cost-benefit analysis for mitigating hydrogeological risks in underground construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2023;131(7):104815. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104815>
7. Конюхов Д. С. Критериальный анализ современных технологий подземного строительства. *Геотехника*. 2021;(1):40–55.
Konyukhov D. S. Criteria analysis of modern technologies of underground construction. *Geotekhnika*. 2021;(1):40–55. (In Russ.)
8. Конюхов Д. С. Анализ параметров механизированной проходки тоннелей для определения характеристик перебора грунта. *Горные науки и технологии*. 2022;7(1):49–56. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-49-56>
Konyukhov D. S. Analysis of mechanized tunneling parameters to determine the overcutting characteristics. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(1):49–56. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-49-56>
9. Lebedev M. O. Choosing a calculation method for stress-strain of supports and lining of transport tunnels. In: *16th World Conference of the Associated Research Centers for the Urban Underground Space (ACUUS 2018)*. 5–7 November 2018, Hong Kong. Pp. 678–687.
10. Bourget A. P. F., Chiriotti E., Patrinieri E. Evolution of risk management during an underground project's life cycle. In: Peila D., Viggiani G., Celestino T. (Eds). *Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art*. London: CRC Press; 2019. Pp. 4375–4385. <https://doi.org/10.1201/9780429424441-463>
11. Mahdi S., Gastebled O., Ningre H., Senechal M. Grand Paris Express, Line 15 East – predictive damage analysis combining continuous settlement trough modeling, risk management, automated vulnerability checks and visualization in GIS. In: Peila D., Viggiani G., Celestino T. (Eds). *Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art*. London: CRC Press; 2019. Pp. 5855–5864. <https://doi.org/10.1201/9780429424441-619>
12. Hongjun W. Earth human settlement ecosystem and underground space research. *Procedia Engineering*. 2016;165:765–781. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.774>
13. Гарбер В. А. Нештатные ситуации в подземных транспортных сооружениях. *Подземные горизонты*. 2018;(16):20–25.
Garber V. A. Abnormal situations at underground transport facilities. *Podzemnye Gorizonty*. 2018; (16):20–25. (In Russ.)
14. Куликова Е.Ю. Методические основы повышения эколого-технологической надежности городских подземных сооружений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(6–1):176–185. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-61-0-176-185>
Kulikova E. Yu. Methodical principles for improving the ecological and technological reliability of urban underground structures. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(6–1):176–185. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-61-0-176-185>
15. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V. Risk control system for the construction of urban underground structures. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;962(4):042020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/962/4/042020>



16. Kim D.Y., Farrokh E., Song M.K., Hyun K.S. Cutting tool wear evaluation for soft ground TBMs. In: *Proceeding of the World Tunnel Congress 2017. Surface challenges – Underground solutions*. 9–15th June 2017, Bergen, Norway. Bergen; 2017.
17. Потапова Е.В. Типология сооружений метрополитена для задач классификации геотехнических рисков. *Горные науки и технологии*. 2021;(6):52–60. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-52-60>
Potapova E.V. Typology of metro structures for the tasks of geotechnical risk classification. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(1):52–60. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-52-60>
18. Kuepferle J., Roettger A., Thesen W., Alber M. Wear prediction for soft-ground tunneling tools – a new approach regarding the dominant influencing factors in the tribological system of tunneling tools. In: *Proceeding of the World Tunnel Congress 2017. Surface challenges – Underground solutions*. 9–15th June 2017, Bergen, Norway. Bergen; 2017.

Информация об авторе

Сергей Анатольевич Жуков – генеральный директор, АО «Мосинжпроект», г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0009-0007-6492-6696](https://orcid.org/0009-0007-6492-6696); e-mail fragrante@mail.ru

Information about the author

Sergey A. Zhukov – CEO, Mosinzhproekt JSC, Moscow, Russian federation; ORCID [0009-0007-6492-6696](https://orcid.org/0009-0007-6492-6696); e-mail fragrante@mail.ru

Поступила в редакцию	04.04.2024	Received	04.04.2024
Поступила после рецензирования	26.05.2024	Revised	26.05.2024
Принята к публикации	05.06.2024	Accepted	05.06.2024



ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-01-213>

УДК 622:62-83

**Устойчивость регулируемого привода штанговой насосной установки в рабочих режимах и при провалах напряжения в сети**М. С. Ершов  , Е. С. Ефимов 

Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация

 msershov@yandex.ru**Аннотация**

Применение частотно-регулируемого привода штанговых насосных установок (ШНУ), широко используемых для добычи нефти, повышает энергетическую и технологическую эффективность добычи нефти, способствует снижению износа оборудования, но его применение сдерживается неустойчивой работой при недостаточной уравнированности ШНУ и чувствительностью к кратковременным провалам напряжения, часто возникающим в протяженных электрических сетях нефтепромыслов. Недостаточная уравнированность ШНУ приводит к появлению в цикле качания периода работы двигателя в генераторном режиме, обусловленном неравномерностью и изменением направления момента сопротивления рабочего механизма. Переход двигателя в генераторный режим так же, как и провалы питающего напряжения, приводит к выходу напряжения в звене постоянного тока преобразователя частоты за установленные пределы и к отключению преобразователя. Для исследования процессов при работе штанговых насосных установок и проверки способов устранения негативного влияния на преобразователь частоты генераторного режима, а также провалов напряжения питающей электросети с целью повышения устойчивости системы в среде Matlab, Simulink создана модель «электрическая сеть – частотно-регулируемый привод ШНУ» с характерной для данного применения нагрузкой, проведен ряд опытов и выполнен анализ результатов. Рассмотрена программная функция подавления генераторного режима и дана оценка возможности ее применения для реальных установок. Проанализировано применение системы бесперебойного питания на основе аккумуляторных накопителей энергии для предотвращения прерывания работы при разных уровнях провалов питающего напряжения. Модель, полученная в результате работы, может быть применена для общего анализа работоспособности и устойчивости, а также проверки правильности подбора ключевых элементов проектируемых систем штанговых насосных установок с частотно-регулируемым приводом.

Ключевые слова

штанговая насосная установка, частотно-регулируемый привод, преобразователь частоты, преобразователь постоянного тока, аккумуляторная батарея, генераторный режим, провал напряжения, компьютерное моделирование

Для цитирования

Ershov M.S., Efimov E.S. Stability of a controlled sucker-rod pump unit drive under operating conditions and during voltage dips in the electrical network. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):292–303. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-01-213>

POWER ENGINEERING, AUTOMATION, AND ENERGY PERFORMANCE

Research paper

Stability of a controlled sucker-rod pump unit drive under operating conditions and during voltage dips in the electrical networkM. S. Ershov  , E. S. Efimov 

Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russian Federation

 msershov@yandex.ru**Abstract**

The use of a variable frequency drive (VFD) for sucker-rod pump units (SRPUs), widely employed in oil extraction, enhances the energy and technological efficiency of oil production and reduces equipment wear. However, its application is hindered by unstable operation under insufficient balancing of the SRPU and sensitivity to short-term voltage dips, which frequently occur in the extensive electrical networks of oil fields. Insufficient balancing of the SRPU leads to the occurrence of a period within the pumping cycle where the



motor operates in generator mode, caused by the unevenness and reversal of the resistance torque of the working mechanism. The motor's transition to generator mode, as well as voltage dips in the power supply, causes the voltage in the DC link of the VFD to exceed the set limits, resulting in the drive being shut down. To investigate the processes during the operation of sucker-rod pump units and to test methods for mitigating the negative impact of generator mode and voltage dips in the power supply network on the VFD, a model of the "power grid – variable frequency SRPU drive" system with a load characteristic of this application was developed in Matlab Simulink. A series of experiments were conducted, and the results were analyzed. The suppression function of the generator mode was examined, and the feasibility of its application to real SRPUs was evaluated. The use of an uninterruptible power supply system based on battery energy storage to prevent operational interruptions during different levels of power supply voltage dips was analyzed. The resulting model can be used for general analysis of operability and stability, as well as for verifying the correct selection of key elements in the design of sucker-rod pump unit systems with variable frequency drives.

Keywords

sucker-rod pump unit, variable frequency drive, frequency converter, DC converter, battery storage, generator mode, voltage dip, computer modeling

For citation

Ershov M.S., Efimov E.S. Stability of a controlled sucker-rod pump unit drive under operating conditions and during voltage dips in the electrical network. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):292–303. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-01-213>

Введение

Для повышения технологической и энергетической эффективности штанговые насосные установки (ШНУ), широко используемые для добычи нефти, оснащают частотно-регулируемым электроприводом (ЧРП), но его применение сдерживается неустойчивостью при работе в условиях недостаточной уравновешенности станков-качалок и в условиях частых возмущений в электрических сетях нефтепромыслов.

Практика применения ЧРП ШНУ показала, что основными причинами снижения устойчивости привода являются кратковременные провалы напряжения в электрических сетях нефтепромыслов, а также присутствие в цикле качания периода работы в генераторном режиме, который возникает по причине неравномерности нагрузки, из-за действия инерционных и вибрационных нагрузок, обусловленных характером движения колонны штанг. Кратковременный генераторный режим при качании может возникать даже во время работы хорошо уравновешенных установок с небольшой глубиной спуска насоса и, как следствие, малым усилием в точке подвеса штанг, создаваемым весом столба жидкости, когда разница максимальной и минимальной нагрузок за цикл невелика. При переходе в генераторный режим энергия, поступающая от двигателя через инвертор, не может быть рекуперирована в сеть через неуправляемый выпрямитель преобразователя частоты (ПЧ), при этом напряжение звена постоянного тока увеличивается, что приводит к последующему отключению ПЧ встроенной защитой от перенапряжения [1].

Для повышения устойчивости и исключения нежелательных аварийных отключений ЧРП ШНУ при генераторном режиме можно использовать ПЧ с возможностью рекуперации энергии, установить тормозной резистор или использовать специальную программную настройку. Применение рекуперативного ПЧ связано с существенным увеличением капитальных вложений по причине использования активного выпрямителя. Установка тормозного резистора связана с непроизводительным расходом рекуперированной

энергии, она рассеивается в виде тепла. Программная настройка частоты – функция предотвращения рекуперации (ФПР) сопровождается увеличением скорости двигателя, что может вызывать нежелательные динамические усилия в частях ШНУ. Каждый способ имеет свои достоинства и недостатки, таким образом, существует неоднозначность решения проблемы негативного влияния генераторного режима на работу ПЧ.

Также особенностью ЧРП является повышенная чувствительность к нарушениям электроснабжения, в частности, к провалам питающего напряжения [2]. При значительном снижении напряжения в звене постоянного тока произойдет отключение ПЧ от сети по причине срабатывания защиты минимального напряжения, что необходимо для предотвращения броска тока при заряде конденсатора после восстановления напряжения [3]. Повышение надежности работы ШНУ при провалах напряжения возможно обеспечить при помощи системы бесперебойного питания (СБП), подключаемой к звену постоянного тока.

В соответствии с обозначенными проблемами и их возможными решениями выполнено моделирование и рассмотрены способы устранения перенапряжения в звене постоянного тока, возникающего во время работы ЧРП ШНУ, применение СБП для поддержания работы при провалах питающего напряжения с целью определения влияния данных решений на устойчивость системы.

Методы

Для исследования способов устранения влияния генераторного режима и провалов питающего напряжения на работу ПЧ выполнено моделирование электротехнического комплекса штанговой насосной установки в среде Matlab, Simulink (библиотека Sim Power Systems). Разработана модель, основными элементами которой являются: участок электрической сети, преобразователь частоты, асинхронный короткозамкнутый электродвигатель, четырехзвенный механизм станка-качалки, скважина, а также двунаправленный преобразователь постоянного тока (DC/DC

преобразователь) и свинцово-кислотная аккумуляторная батарея (АКБ).

Электротехническая система включает источник мощностью короткого замыкания $S_{кз} = 100$ МВА; воздушную линию (ВЛ – 6 кВ) длиной 6 км, сечением алюминиевого провода 16 мм²; трансформатор 6/0,4 кВ мощностью 40 кВА; кабельную линию от трансформатора до преобразователя частоты длиной 20 м с алюминиевыми жилами сечением 10 мм²; преобразователь частоты на базе нерегулируемого выпрямителя и трехфазного инвертора, управляемого по принципу широтно-импульсной модуляции (ШИМ); асинхронный короткозамкнутый электродвигатель с двумя парами полюсов, параметры которого включают: номинальная мощность $P_{ном} = 30$ кВт; номинальная скорость $n_{ном} = 1485$ об/мин; номинальный КПД $\eta = 0,91$; $\cos \varphi = 0,86$; номинальный ток $I_{ном} = 60$ А; кратность пускового тока $i_{п} = 7,7$; кратность пускового момента $m_{п} = 2,7$; кратность максимального момента $m_{макс} = 3,2$ и момент инерции $J = 0,1326$ кг·м². Управление преобразователем частоты в данной модели выполняется по скалярному закону с поддержанием заданной скорости электродвигателя.

Математическая модель асинхронного короткозамкнутого двигателя, представленная системой уравнений (1), которая построена для связанной с ротором (dq -оси) двухфазной ортогональной системы координат. Механическая часть привода представлена уравнением (2). Расчет параметров схемы замещения, используемой в модели, выполнен по формулам, представленным в [4].

Моделирование штанговой насосной установки выполнено для станка-качалки аксиального типа, кинематическая схема которого представлена на рис. 1 [5, 6]. На рис. 1 используются следующие обозначения: R – кривошип; P – шатун; C – заднее плечо балансира; A – переднее плечо балансира, также представлены вспомогательные длины и углы, которые были использованы для моделирования.

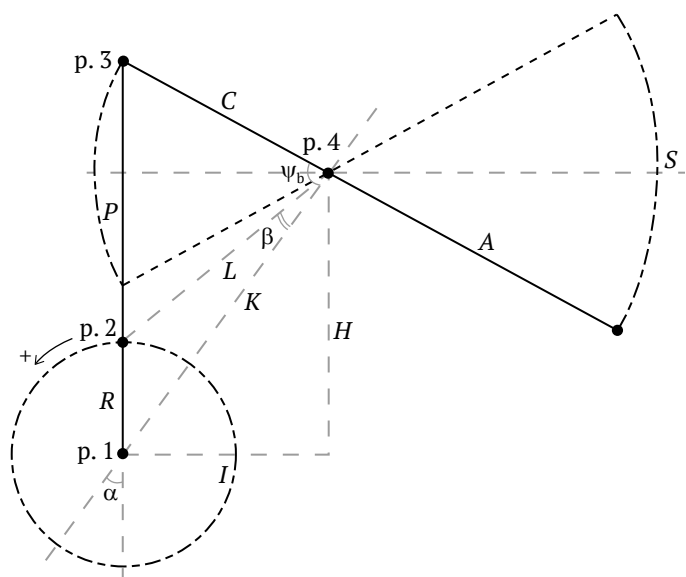


Рис. 1. Аксиальная кинематическая схема станка-качалки

$$\begin{aligned} U_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega \psi_{qs}; \\ U_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} - \omega \psi_{ds}; \\ U'_{dr} &= R'_r i'_{dr} + \frac{d\psi'_{dr}}{dt} - (\omega - \omega_r) \psi'_{qr}; \\ U'_{qr} &= R'_r i'_{qr} + \frac{d\psi'_{qr}}{dt} - (\omega - \omega_r) \psi'_{dr}; \\ T_e &= 1,5p(\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}); \\ J \frac{d\omega_m}{dt} &= T_e - F\omega_m - T_m. \end{aligned} \quad (1)$$

$$(2)$$

Переменные в уравнениях (1) и (2) имеют следующие обозначения: U_{ds}, i_{ds} – проекции напряжения и тока статора на ось d ; U_{qs}, i_{qs} – проекции напряжения и тока статора на ось q ; U'_{dr}, i'_{dr} – проекции напряжения и тока ротора на ось d ; U'_{qr}, i'_{qr} – проекции напряжения и тока ротора на ось q ; ψ_{qs}, ψ_{ds} – проекции потокосцепления статора на оси d, q ; ψ'_{dr}, ψ'_{qr} – проекции потокосцепления ротора на оси d, q ; R_s, R'_r – активные сопротивления статорной и роторной обмоток; T_e, T_m – электромагнитный момент двигателя и момент сопротивления механизма, приведенный к валу двигателя; ω, ω_m и ω_r – угловая скорость системы координат, механическая угловая скорость вала двигателя и электрическая угловая скорость ротора двигателя; J, F – момент инерции и коэффициент вязкого трения ротора и нагрузки.

Работа ШНУ осуществляется циклически, пример диаграммы нормальной работы представлен на рис. 2, а, на ней обозначены следующие периоды [7]:

$A-B$ – начало движения колонны штанг вверх, происходит передача нагрузки (веса колонны жидкости) от колонны труб колонне штанг, длина труб уменьшается, а штанг увеличивается, клапаны насоса закрыты;

$B-C$ – движение колонны штанг вверх после завершения процесса передачи нагрузки, приемный клапан открыт, жидкость поступает в цилиндр насоса;

$C-D$ – приемный клапан закрывается в крайнем верхнем положении колонны штанг, начало движения колонны штанг вниз, происходит передача нагрузки от колонны штанг колонне труб, длина труб увеличивается, а штанг уменьшается, клапаны насоса закрыты;

$D-A$ – движение колонны штанг вниз после завершения процесса передачи нагрузки, нагнетательный клапан открыт. Крайнее нижнее положение – завершение цикла.

На рис. 2, б представлена диаграмма зависимости периодов качания от угла поворота вала кривошипа с разделением цикла на 4 квадранта, такое представление более удобно при настройке регулирования установки.

Как известно, работа даже хорошо уравновешенного станка-качалки может сопровождаться переходом двигателя в кратковременный генераторный режим на I и III периодах цикла качания, показанных на рис. 2. Длительность данного режима может увеличиваться при изменении параметров ШНУ в процессе работы при износе оборудования [1].

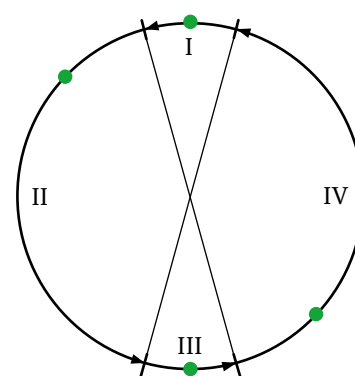
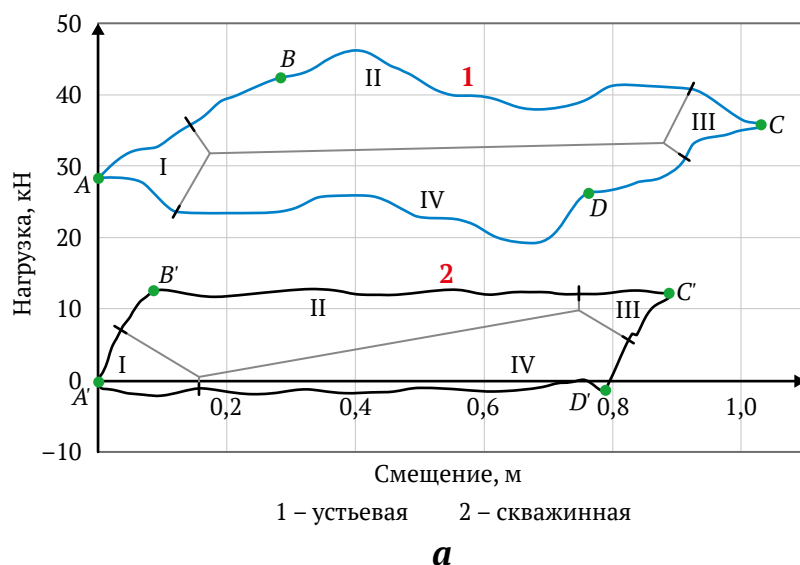


Рис. 2. Периоды цикла качания: *а* – на устьевой и скважинной динамограммах; *б* – на диаграмме положения полированного штока относительно угла поворота кривошипа

В модели штанговой насосной установки, которая включает в себя редуктор, четырехзвенный механизм станка-качалки и скважинную часть, учтены цикличность нагрузки, давление на приеме, плотность и динамический уровень жидкости в скважине, вес колонны штанг в жидкости, вес столба жидкости, степень уравновешенности станка-качалки, а также потеря хода точки подвеса штанг, которая связана с упругими удлинениями при передаче нагрузки от колонны труб штанге [8, 9].

Используемые в математической модели уравнения и зависимости позволяют отслеживать положение, скорость и ускорение точки подвеса колонны штанг на основе информации о геометрических размерах механизма станка-качалки, а также позволяют определить коэффициент для вычисления момента сопротивления на валу кривошипа на основе информации о нагрузке в точке подвеса [10, 11].

Таким образом, созданная модель позволяет оценить режимы работы ШНУ с различной нагрузкой и степенью уравновешенности станка-качалки, определить потребляемую из сети энергию и энергию, рассеиваемую на тормозном резисторе в цепи постоянного тока ПЧ при работе асинхронного электродвигателя в генераторном режиме, возникающем при движении колонны штанг вниз под собственным весом.

Модель дополнена СБП, существует большое количество схем ее реализации. В моделировании рассмотрена система, которая представляет собой DC/DC преобразователь, подключенный к звену постоянного тока преобразователя частоты ШНУ. DC/DC преобразователь аналогичен инвертору преобразователя частоты, отличие заключается в системе управления, законе формирования сигналов управления работой IGBT [12]. К выходу DC/DC подключены дроссели и аккумуляторные батареи (АКБ), количество и схема соединения которых зависит от длительности резер-

вирования. Система управления должна формировать сигналы открытия силовых ключей таким образом, чтобы поддерживать требуемый уровень напряжения в звене постоянного тока, а также регулировать ток и напряжения заряда и разряда аккумуляторных батарей. Она состоит из внутреннего контура с обратной связью по току DC/DC на стороне АКБ и внешнего контура с обратными связями по напряжению в звене постоянного тока ПЧ при разряде и по напряжению АКБ при заряде [13].

Существуют несколько видов моделей АКБ, они могут выполняться на основе только данных экспериментов, на основе математического описания химических процессов и на основе электрических эквивалентных схем замещения. При моделировании использовался третий вид, такая модель представлена в стандартной библиотеке Simulink. Параметры, требуемые для данной модели, возможно определить на основе технических данных и разрядных характеристик, предоставляемых производителем [14], но наиболее точной настройки можно добиться, проведя реальные испытания интересующей АКБ.

В системе управления задан диапазон напряжений на стороне АКБ: 310–435 В, а также диапазон напряжений на стороне звена постоянного тока ПЧ: 495–550 В. Максимальная погрешность модели АКБ стандартной библиотеки Simulink составляет 5 % для диапазона уровня заряда от 10 до 100 % и токов от 0 до удвоенного значения емкости при заряде, и токов от 0 до пятикратного значения емкости при разряде. Допущения рассматриваемой модели АКБ:

- внутреннее сопротивление не изменяется с амплитудой тока и постоянно в течение циклов заряда и разряда;
- разрядные и зарядные характеристики одинаковы;
- емкость батареи не изменяется с амплитудой тока, эффект Пейкерта [15] отсутствует;



– саморазряд АКБ не реализован в данной модели, но его можно реализовать, добавив параллельно клеммам аккумулятора большое сопротивление;

– АКБ не обладает эффектом памяти.

Параметры системы АКБ из 32 штук подобраны из расчета поддержания работы нагрузки мощностью 30 кВт в течение 5 мин с поддержанием на каждой батарее напряжения 10,8 В. Для этого требуется, чтобы при разряде постоянной мощностью на каждый АКБ в системе приходилось, Вт/эл:

$$P_{эл} = \frac{P_{нагр}}{\eta_{DC/DC} \eta_{инв} n} = 1017,3. \quad (3)$$

В каталожных данных разных производителей указано, что для рассматриваемого случая система из 32 АКБ номинальной емкостью 33 Ач каждый способна обеспечить разряд постоянной мощностью 1020 Вт/эл, в модели заданы параметры, аналогичные такой системе из 32 АКБ.

Результаты моделирования ШНУ

Выполнено моделирование работы штанговой насосной установки с периодом генераторного режима. На рис. 3 представлены графики для станка-качалки со значительным небалансом $\approx 50\%$, степень небаланса определена при помощи коэффициента неуравновешенности по току [16, 17]. При помощи нижнего графика на рис. 3 можно определить начало генераторного режима – 8,2 с, когда момент нагрузки на валу принимает отрицательное значение. На верхнем графике кривая под номером 1 – мощность, рассеива-

емая на тормозном резисторе, кривая под номером 2 – напряжение звена постоянного тока, для которого задано ограничение в 757 В, при достижении данного значения выполняется включение цепи с тормозным резистором и рассеивание избытка энергии.

Для разного уровня небаланса на рис. 4 и 5 на верхних графиках приведены кривые напряжения в звене постоянного тока: под номером 1 – при постоянной скорости (без ФПР), под номером 2 – при активной ФПР. Для более наглядного обозначения периода действия ФПР в нижней части данных рисунков приведены графики скорости, которые обозначены номером 3. Также номером 1 обозначены графики мощности, рассеиваемой на тормозном резисторе без ФПР, а номером 2 – при активной ФПР.

Результаты моделирования провалов напряжения и работы DC / DC преобразователя

Возмущения в электрической сети связаны с короткими замыканиями: близкими, начиная от воздушной линии электропередачи, и удаленными – в сетях 35 кВ и выше. Моделирование близких КЗ осуществлялось в узле, к которому подключена воздушная линия электропередачи напряжением 6 кВ. Установлено, что при однофазных КЗ в сети 6 кВ работа привода может быть продолжена. Трех- и двухфазные КЗ в сети 6 кВ приводят к отключениям, ЧРП ШНУ теряет питание. В случае неотключения двухфазного КЗ в звене постоянного тока возникают большие колебания напряжения, как это показано на рис. 6, а, и большие колебания тока на входе ПЧ, как это показано на рис. 6, б,



Рис. 3. Кривые напряжения звена постоянного тока и мощности, рассеиваемой на тормозном сопротивлении (верхний график), кривая крутящего момента на валу кривошипа с учетом действия противовесов (нижний график) при небалансе $\approx 50\%$

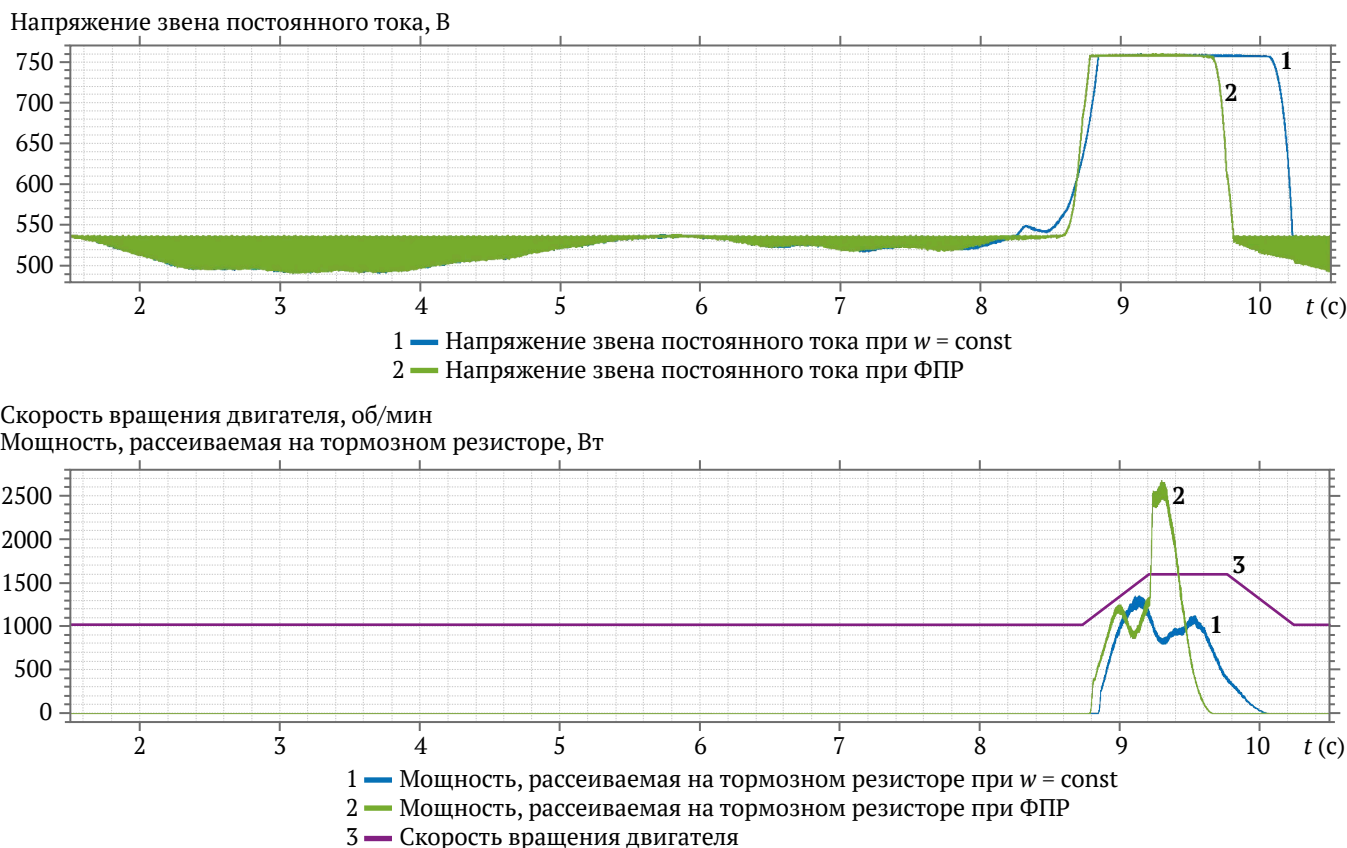


Рис. 4. Кривые напряжения звена постоянного тока (верхний график), кривые скорости и рассеиваемой на тормозном сопротивлении мощности (нижний график) при отключенной и при активной ФПР и небалансе $\approx 50\%$



Рис. 5. Кривые напряжения звена постоянного тока (верхний график), кривые скорости и рассеиваемой на тормозном сопротивлении мощности (нижний график) при отключенной и при активной ФПР и небалансе $\approx 5\%$



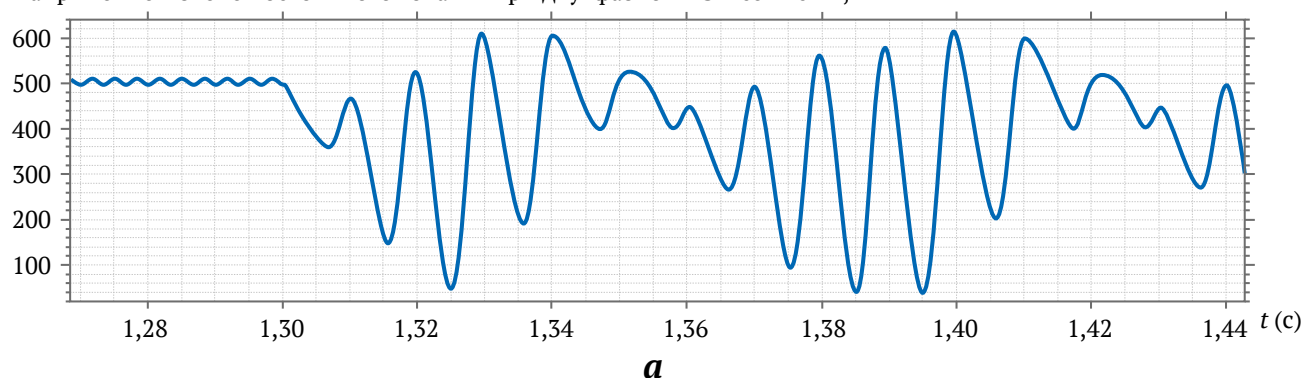
что с большой вероятностью приведет к выходу оборудования из строя. Отметим, что при соединении обмоток трансформатора 6/0,4 кВ по схеме Δ/Y_0-11 значение среднего напряжения в звене постоянного тока ПЧ выше, чем при соединении обмоток трансформатора по схеме Y/Y_0-12 . В случае неотключения питания РЗиА сети при аварийных режимах должна срабатывать индивидуальная защита привода. Рекомендуется использовать и автоматический выключатель, и быстродействующий плавкий предохранитель, соответствующие номинальным параметрам привода, для обеспечения полноценной защиты.

Удаленные КЗ проявляются в узлах нагрузки 6 кВ и на вводах ПЧ в виде провалов напряжения. Для сохранения в работе ЧРП с центробежными рабочими механизмами эффективным средством повышения устойчивости является опция «кинетический резерв» [18], по сути являющаяся функцией, обратной предотвращению рекуперации, о которой было сказано выше. Опция «кинетический резерв» за счет снижения задающей частоты на выходе ПЧ вызывает ускоренное снижение скорости двигателя, при этом избыточная энергия двигателя затрачивается на поддержание напряжения в звене постоянного тока.

В приводе ШНУ применение опции «кинетический резерв» будет неэффективно в связи с тем, что момент сопротивления механизма зависит не пропорционально от квадрата скорости, как в центробежных механизмах, а по более сложному закону, зависящему от положения точки подвеса, и реализация данной опции возможна лишь на малом периоде цикла. В связи с этим исследована возможность подключения к звену постоянного тока ПЧ системы бесперебойного питания (СБП) на базе DC/DC преобразователя и АКБ.

Обычно ПЧ имеет встроенную защиту от провалов напряжения в звене постоянного тока – защита минимального напряжения (ЗМН), которая по умолчанию находится в пределах от 64–76 до 85–90% от значения номинального напряжения [3]. Уровень напряжения обусловлен допустимым значением тока диодов выпрямителя при восстановлении питания и броске зарядного тока конденсатора звена постоянного тока, для предотвращения которого выполняется подключение звена заряда конденсатора. Также уровень напряжения связан с минимально допустимым напряжением, которое необходимо для поддержания нормального рабочего режима установки.

Напряжение в звене постоянного тока ПЧ при двухфазном КЗ в сети 6 кВ, В



Токи на входе ПЧ при двухфазном КЗ в сети 6 кВ, А

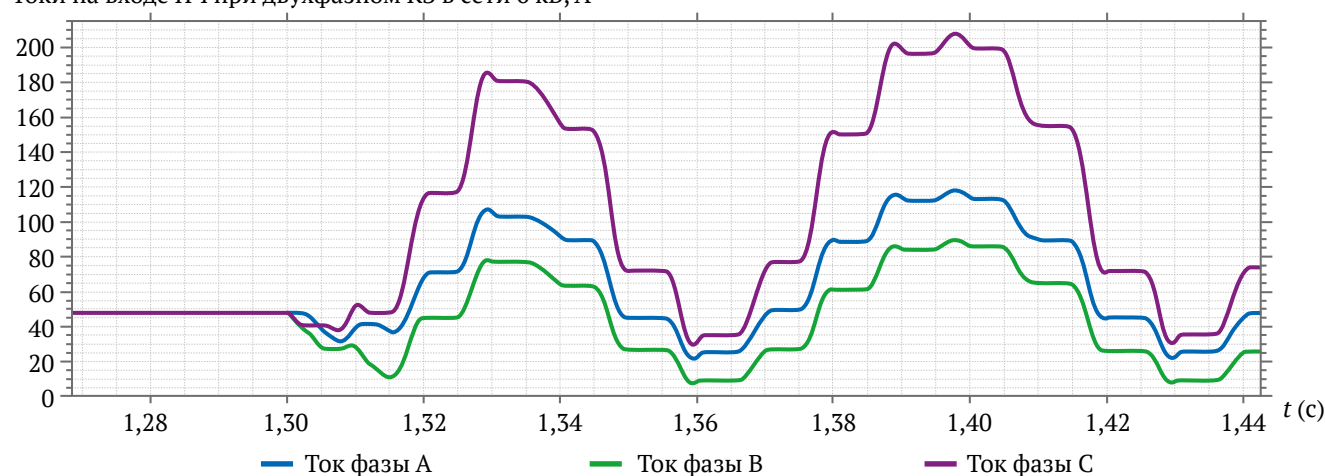


Рис. 6. Двухфазное КЗ на участке питающей сети 6 кВ:
а – напряжение в звене постоянного тока ПЧ; б – ток на входе ПЧ

Выполнено моделирование работы со снижением напряжения звена постоянного тока до 0,7 от номинального. На рис. 7, а представлены напряжения для двух режимов, а на рис. 7, б – соответствующие скорости двигателя.

На рис. 8 представлены результаты моделирования длительного провала напряжения в звене постоянного тока ($U_{пч} = 0,7U_{пчном}$), но с подключенной к звену постоянного тока СБП – кривая под номером 2. Созданная модель с СБП способна поддерживать напряжение в звене постоянного тока при провалах напряжения без возникновения негативных колебаний на валу двигателя.

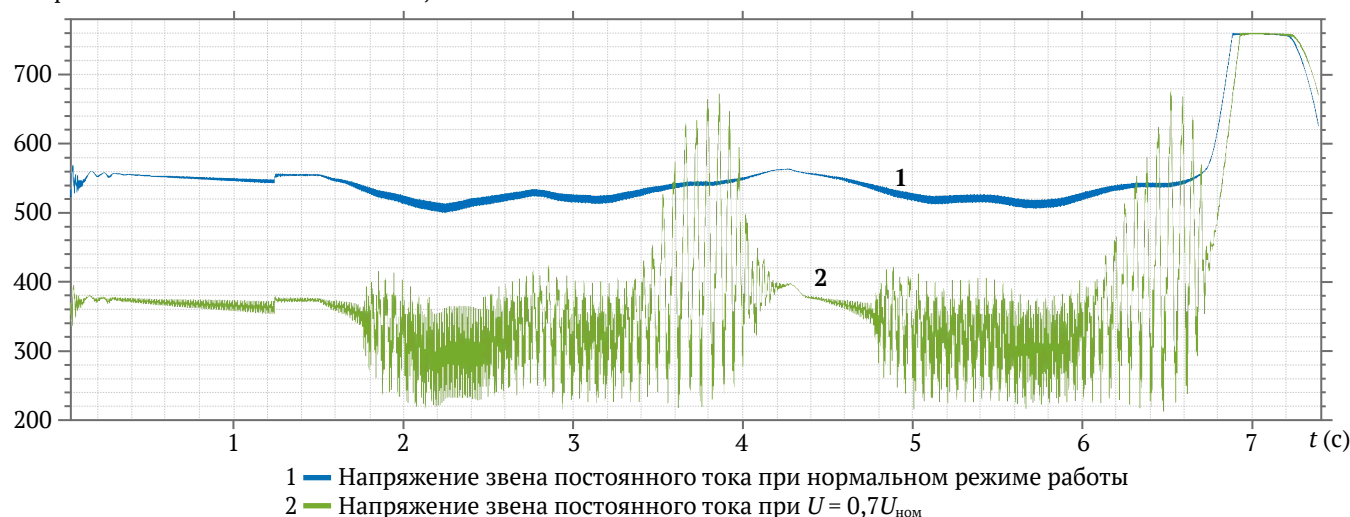
На рис. 9 представлены напряжение в звене постоянного тока и напряжение АКБ для опыта, при котором использовались следующие периоды провалов напряжения до значения $U_{пч} = 0,3U_{пчном}$: 2–3 с; 4,1–5,1 с; 6,8–7,1 с.

Обсуждение результатов

На основании выполненных опытов можно заключить: функция подавления рекуперации позволяет полностью устранить генераторный режим только при необходимости рассеивания малой величины мощности, что показано на рис. 5; настройка уровня разгона при использовании функции подавления перенапряжения и ограничения скорости и момента должны проводиться с учетом реальных характеристик скважины и оборудования, потому что в некоторых случаях увеличение скорости может привести к недопустимым механическим нагрузкам в частях установки. ФПР приводит к уменьшению длительности цикла качания, что должно учитываться при планировании режима работы установки.

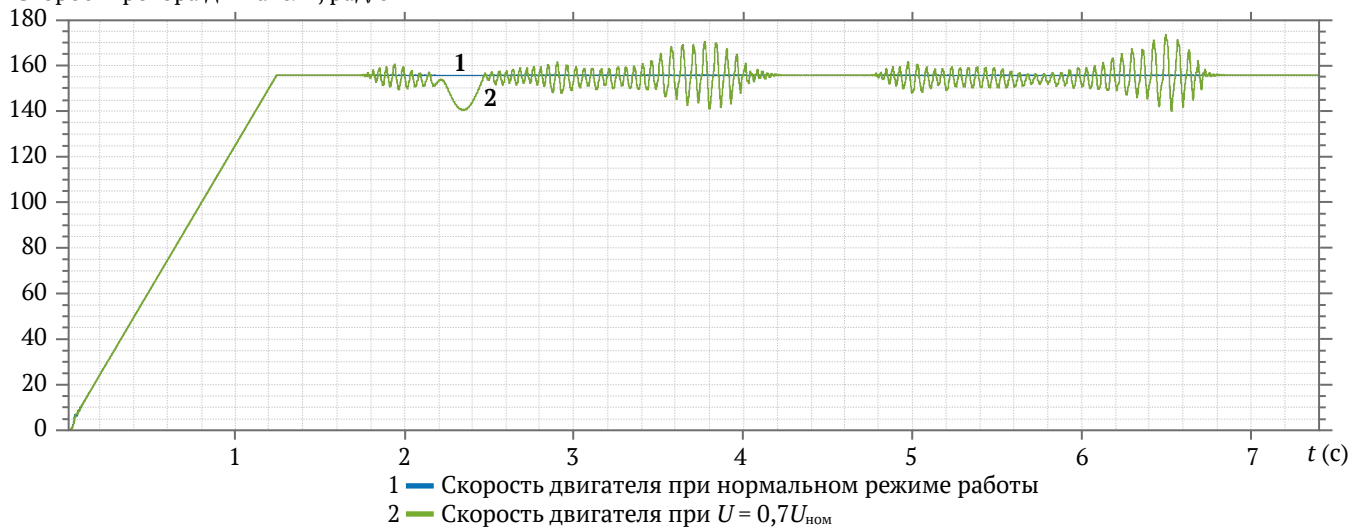
Электромагнитный момент оказывает на ротор тормозящее действие в генераторном режиме, но при активной ФПР электромагнитный момент остается

Напряжение звена постоянного тока, В



а

Скорость ротора двигателя, рад/с



б

Рис. 7. Характеристика режимов: 1 – при номинальном напряжении и 2 – при снижении напряжения до 0,7 от номинального значения, представлены кривые: а – напряжения звена постоянного тока; б – скорости двигателя



вращающим. При действии ФПР электромагнитный момент и момент сопротивления, который изменил знак и стал отрицательным при движении колонны штанг вниз, увеличивают скорость двигателя, и замедление колонны штанг в конце периода хода вниз происходит более интенсивно, быстро [1]. По результатам моделирования подтверждено, что чем больше длительность генераторного режима, тем большая мгновенная скорость ротора должна быть развита. Отсутствие ограничения по скорости при активной ФПР может привести к разгону до скорости, превышающей номинальную на 50–70%, если это допустимо для двигателя. Большая динамика скорости в конце

IV и в I периоде цикла качания приводит к дополнительным инерционным усилиям в элементах станка-качалки и динамическим ударам в конструкции станка-качалки, что увеличивает износ и приводит к выходу установки из строя. Таким образом, ФПР без дополнительного использования тормозных резисторов может быть успешно применена, если она не приведет к критическому увеличению нагрузки, то есть для ШНУ с малым по длительности периодом генераторного режима, для устранения которого не требуется значительное увеличение скорости вращения вала двигателя, или при работе двигателя на скорости значительно меньше номинальной, поддерживаемой ПЧ.

Напряжение звена постоянного тока, В

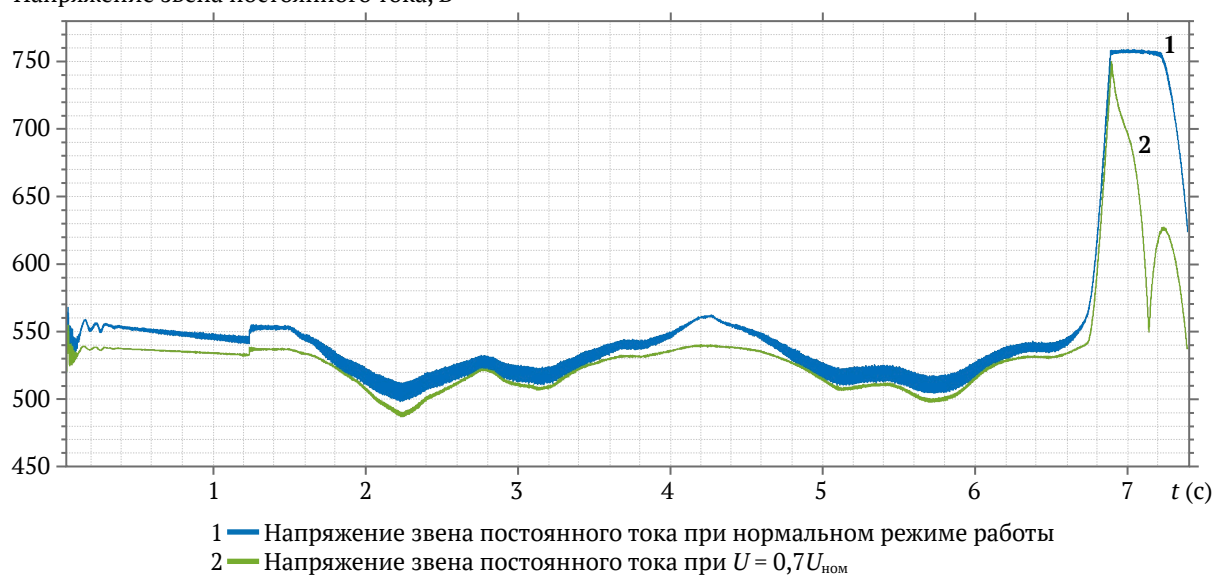


Рис. 8. Напряжение звена постоянного тока в нормальном режиме – кривая 1, и в режиме со снижением входного напряжения до 0,7 от номинального значения при подключенной СБП – кривая 2

Напряжение, В

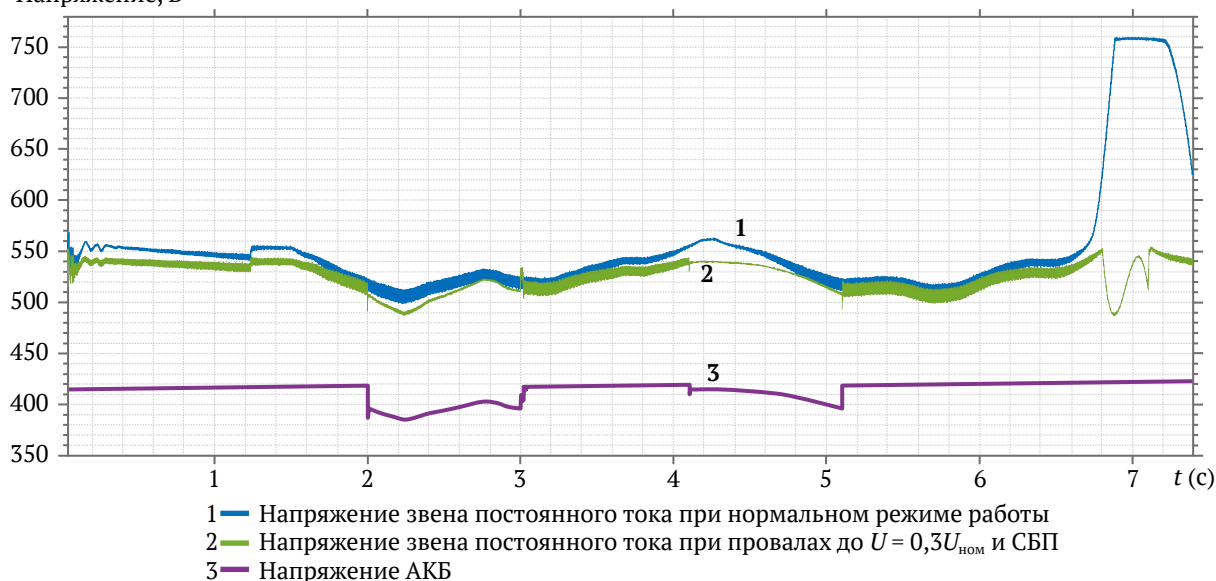


Рис. 9. Напряжение звена постоянного тока и АКБ в режиме с кратковременными провалами входного напряжения в трех фазах до 0,3 от номинального значения при подключенной СБП (В)



Следует отметить, что в случае отсутствия возможности передачи избыточной энергии в сеть рекомендуется применять тормозной резистор даже с активной функцией подавления рекуперации, если нет полной уверенности в том, что режим работы не изменится со временем и период генераторного режима не увеличится. Также следует учитывать, что превышение напряжения звена постоянного тока может быть вызвано не только переходом в генераторный режим, поэтому рекомендуется предпринять меры для снижения вероятности возникновения иных причин, таких как: высокое выходное напряжение, скачки напряжения на выходе ПЧ, неправильное подключение заземления, неисправность двигателя и др.

При снижении напряжения увеличиваются колебания момента, на рис. 7, б можно наблюдать увеличение колебаний и появление провалов скорости. В рассматриваемой модели не использовались ЗМН звена постоянного тока и защита от перегрузки ПЧ, которые могут сработать в данных условиях. Последующее снижение напряжения приводит к еще большему снижению стабильности работы установки и последующему останову двигателя, поэтому для поддержания работы при наличии значительных провалов напряжения или кратковременных прерываний можно рекомендовать СБП.

Результаты моделирования СБП, представленные на рис. 8 и 9, показали ее действенность как при длительных провалах напряжения в питающей сети, так и при кратковременных. Полученные результаты приближены к идеальным, проведение измерений на реальном объекте или выполнение физического моделирования СБП с нагрузкой такого характера позволят внести корректировки в данную модель при их необходимости.

Стоит заметить, что рассмотренные свинцово-кислотные АКБ имеют ряд ограничений и требований к глубине разряда, напряжению и току заряда при разных уровнях заряда батареи, параметрам при работе в буферном режиме, температурному диапазону и необходимости температурной компенсации зарядного напряжения. Требования указываются в инструкции на АКБ и должны учитываться системой управления зарядом и разрядом – системой управления DC/DC преобразователя для обеспечения максимально возможного срока службы. Альтернативным вариантом являются суперконденсаторы, которые в общем случае имеют больший срок службы, могут работать в более широком диапазоне температур и имеют меньше ограничений по допустимым уров-

ням напряжения, тока и заряда. Подробные характеристики обычно указываются в паспортах и каталогах данных на то или иное оборудование.

Направление дальнейших исследований может быть связано с повышением точности данной модели и проверкой возможности применения динамического компенсатора искажения напряжения (ДКИН) с ЧРП ШНУ для компенсации отклонений и провалов напряжения.

Заключение

Для анализа устойчивости частотно-регулируемого привода штанговой насосной установки разработана модель, которая учитывает циклический неравномерный характер нагрузки, уравновешенность станка-качалки, процессы, связанные с возникновением генераторного режима, влияние провалов напряжения в сети. Рассмотрен такой способ устранения перенапряжения в звене постоянного тока, как функция подавления перенапряжения. Определено, что данная функция имеет ряд ограничений, которые в первую очередь связаны с длительностью генераторного режима (величиной небаланса) и периодом его появления в цикле качания. При значительном небалансе ФПР будет малоэффективна и потребуются использовать тормозной резистор, если же генераторный режим возникает в конце движения колонны штанг вверх или вниз, то увеличение скорости вращения приведет к нежелательным механическим усилиям, дополнительному износу или даже выходу оборудования из строя.

Другая задача работы заключалась в моделировании провалов напряжения в питающей сети и рассмотрении их влияния на устойчивость работы ШНУ. При малых провалах напряжения ЧРП способен оставаться в работе, в некоторых моделях ПЧ применяются специальные алгоритмы управления для поддержания стабильности работы. Как известно, при более значительных провалах напряжения срабатывает ЗМН. Одним из способов поддержания работы даже при исчезновении напряжения на короткий срок является СБП. Действие такой системы рассмотрено в ходе моделирования, результаты которого показали действенность данного способа повышения устойчивости работы. Модель, полученная в результате данной работы, может быть использована для выполнения общей оценки работоспособности подобной проектируемой системы и проверки правильности подбора конденсатора звена постоянного тока и дросселей на входе DC/DC преобразователя.

Список литературы / References

1. Ярыш Р.Ф., Гарифуллина А.Р., Гарифуллин Р.И., Якунин А.Н. Исследование режимов работы частотно-регулируемого электропривода станка-качалки. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2018;20(11–12):56–64. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-56-64>
Yarish R.F., Garifullina A.R., Garifullin R.I., Yakunin A.N. Investigation of operating modes of frequency-regulated electric drive of pumpjack. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2018;20(11–12):56–64. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-56-64>



2. Егоров А.В., Ершов М.С. Экспериментальное исследование устойчивости асинхронных частотно-регулируемых приводов при кратковременных провалах напряжения. *Промышленная энергетика*. 2018;(4):9–12.
Egorov A. V., Ershov M. S. Experimental study of the stability of asynchronous variable-speed drives (VSD) during short-term voltage failures. *Industrial Power Engineering*. 2018;(4):9–12. (In Russ.)
3. Xu Y., Lu W., Wang K. et al. Sensitivity of low-voltage variable-frequency devices to voltage sags. *IEEE Access*. 2019;7:2068–2079. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2885402>
4. Пантель О.В. Методика расчета параметров асинхронного двигателя для моделирования режимов его работы в среде Matlab/Simulink. *Academy*. 2015;2(2):7–11.
Pantel O. V. Method of calculating the parameters of an asynchronous motor to model its operating modes in the Matlab / Simulink environment. *Academy*. 2015;2(2):7–11. (In Russ.)
5. Haisen Z., Yilong W., Yang Z. et al. Practical model for energy consumption analysis of beam pumping motor systems and its energy saving applications. In: *2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. 1–5 October 2017, Cincinnati, OH, USA. Pp. 1–9. <http://dx.doi.org/10.1109/IAS.2017.8101721>
6. Zheng B., Gao X., Li X. Fault detection for sucker rod pump based on motor power. *Control Engineering Practice*. 2019;86:37–47. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2019.02.001>
7. Fakher S., Khlaifat A., Hossain M.E., Nameer H. A comprehensive review of sucker rod pumps' components, diagnostics, mathematical models, and common failures and mitigations. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2021;11:3815–3839. <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01270-7>
8. Ершов М.С., Ефимов Е.С. Моделирование энергоэффективности электропривода штанговой насосной установки. В: Мартынов В.Г. (отв. ред.) *Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России: VI региональная научно-техническая конференция, посвященная 100-летию М.М. Ивановой*. 19–21 сентября 2022, Москва. Тезисы докладов. М.: РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина; 2022. С. 766–767.
Ershov M. S., Efimov E. S. Modeling of the energy efficiency of an electric drive for a rod pumping unit. In: Martynov V. G. (ed.) *Gubkin University in Addressing Issues of the Russian Oil and Gas Industry: VI Regional Scientific and Technical Conference dedicated to the 100th Anniversary of M. M. Ivanov*. September 19–21, 2022, Moscow. Abstracts of Reports, Moscow: Gubkin Russian State University of Oil and Gas (NRU); 2022. Pp. 766–767. (In Russ.)
9. Langbauer C., Langbauer T., Fruhwirth R., Mastobaev B. Sucker rod pump frequency-elastic drive mode development – from the numerical model to the field test. *Liquid and Gaseous Energy Resources*. 2021;1(1):64–85. <https://doi.org/10.21595/lger.2021.22074>
10. Уразаков К.Р., Молчанова В.А., Тугунов П.М. Метод расчета динамических нагрузок и энергопотребления штанговой установки с системой автоматического уравнивания. *Записки Горного института*. 2020;246:640–649. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.6.6>
Urazakov K. R., Molchanova V. A., Tugunov P. M. Method for calculating dynamic loads and energy consumption of a sucker rod installation with an automatic balancing system. *Journal of Mining Institute*. 2020;246:640–649. (In Russ.) <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.6.6>
11. Solodkiy E. M., Kazantsev V. P., Dadenkov D. A. Improving the energy efficiency of the sucker-rod pump via its optimal counterbalancing. *International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. 8–14 September 2019, Sochi, Russia. Pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867737>
12. Higure H., Hoshi N., Haruna J. Inductor current control of three-phase interleaved DC-DC converter using single DC-link current sensor. In: *2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*. 16–19 December 2012, Bengaluru, India. Pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/PEDES.2012.6484495>
13. Nandankar P., Rothe J. P. Design and implementation of efficient three-phase interleaved DC-DC converter. In: *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*. 3–5 March 2016, Chennai, India. Pp. 1632–1637. <https://doi.org/10.1109/ICEEOT.2016.7754962>
14. Tremblay O., Dessaint L.-A. Experimental validation of a battery dynamic model. *World Electric Vehicle Journal*. 2009;3(2):289–298. <https://doi.org/10.3390/wevj3020289>
15. Cugnet M., Dubarry M., Liaw B. Y. Peukert's law of a lead-acid battery simulated by a mathematical model. *ECS Transactions*. 2010;25(35):223–233. <https://doi.org/10.1149/1.3414021>
16. Зюзев А.М., Бубнов М.В. Диагностика уравновешенности штанговой глубинной насосной установки по ваттметрограмме. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2019;330(4):178–187. <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/4/226>
Zyuzev A. M., Bubnov M. V. Diagnostics of the balance of the rod deep-well pumping unit by wattmetrogram. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2019;330(4):178–187. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/4/226>



17. Галеев А.С., Нурғалиев Р.З., Бикбулатова Г.И. и др. Критерий уравновешенности тихоходного привода скважинной штанговой насосной установки для повышения надежности редуктора. *Нефтегазовое дело*. 2019;17(6):96–101. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2019-6-96-101>
Galeev A. S., Nurgaliev R. Z., Bikbulatova G. I., Sabanov S. L., Boltneva Yu. A. Criterion of equilibrium of the slow-speed drive of the downhole rod pumping unit to improve the reliability of the gearbox. *Petroleum Engineering*. 2019;17(6):96–101. (In Russ.) <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2019-6-96-101>
18. Белоусенко И.В., Ершов М.С., Чернев М.Ю. Повышение устойчивости электротехнических систем непрерывных производств нефтегазового комплекса. *Промышленная энергетика*. 2019;(2):8–15.
Belousenko I. V., Ershov M. S., Chernov M. Yu. Improving the stability of electrical systems in continuous oil and gas production complexes. *Industrial Power Engineering*. 2019;(2):8–15. (In Russ.)

Информация об авторах

Михаил Сергеевич Ершов – доктор технических наук, профессор кафедры теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-7772-0095](https://orcid.org/0000-0002-7772-0095), Scopus ID [56261333000](https://orcid.org/56261333000); e-mail msershov@yandex.ru

Евгений Сергеевич Ефимов – аспирант кафедры теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0009-0007-9189-8029](https://orcid.org/0009-0007-9189-8029); e-mail efimow.evgeniy@yandex.ru

Information about the authors

Mikhail S. Ershov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Theoretical Electrical Engineering and Electrification of Oil and Gas Industry, I. M. Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-7772-0095](https://orcid.org/0000-0002-7772-0095), Scopus ID [56261333000](https://orcid.org/56261333000); e-mail msershov@yandex.ru

Evgeniy S. Efimov – PhD-Student, Department of Theoretical Electrical Engineering and Electrification of Oil and Gas Industry, I. M. Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russian Federation; ORCID [0009-0007-9189-8029](https://orcid.org/0009-0007-9189-8029); e-mail efimow.evgeniy@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.01.2024
Поступила после рецензирования 14.03.2024
Принята к публикации 22.05.2024

Received 30.01.2024
Revised 14.03.2024
Accepted 22.05.2024