

Mining Science and Technology

Горные науки
и технологии

Vol. 8 № 1
2023



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



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.), National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

DEPUTIES EDITOR-IN-CHIEF

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

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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., Collège of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

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

Akper 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 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.), National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

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

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

EDITORIAL COUNCIL

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

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

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

QUARTERLY

FOUNDED in 2016

REGISTRATION

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

INDEXATION

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

FOUNDER AND PUBLISHER



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

CONTACT

4 Leninsky Prospect, Moscow 119049, Russian Federation

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

e-mail: send@misis.ru



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



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

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

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

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Петров Вадим Леонидович, проф., д.т.н., НИТУ «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., НИТУ «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

Буи Суан Нам, проф., д-р наук, Ханойский университет горного дела и технологии, 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 технологии, г. Улан-Батор, Монголия

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

Дребенштетт 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., НИТУ «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., Узбекский научно-исследовательский и проектно-испытательский институт геотехнологии и цветной металлургии «O'zGEORANGMETLITI», г. Ташкент, Узбекистан

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

Рестрепо Баэна 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

Тибилев 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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

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

ПЕРИОДИЧНОСТЬ 4 раза в год

ОСНОВАН в 2016 году

РЕГИСТРАЦИЯ

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

Свидетельство о регистрации Эл № ФС77-62652.

ИНДЕКСИРОВАНИЕ

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



Журнал открытого доступа.

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ



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

АДРЕС УЧРЕДИТЕЛЯ И ИЗДАТЕЛЯ

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

КОНТАКТЫ РЕДАКЦИИ

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

Телефон: +7 (495) 955-00-77

e-mail: send@misis.ru



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.



CONTENTS

MINERAL RESOURCES EXPLOITATION

- The engineering and geological substantiation of the resource potential
of the bed of the South China Sea 5
Yu. V. Kirichenko, T. T. Q. Ngo, M. V. Shchyokina

MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

- Amplitude-frequency response of a helically-wound fiber distributed acoustic sensor (DAS) 13
A. V. Chugaev, M. V. Tarantin
- Effect of strain amplitude and confining pressure on the velocity and attenuation
of *P* and *S* waves in dry and water-saturated sandstone: an experimental study 22
E. I. Mashinskii
- Influence of random parameter joint length on rock electrical conductivity 30
P. E. Sizin, A. S. Voznesenskii, L. K. Kidima-Mbombi

BENEFICIATION AND PROCESSING OF NATURAL AND TECHNOGENIC RAW MATERIALS

- The effect of clay minerals on in-situ leaching of uranium 39
O. F. Petukhov, I. U. Khalimov, V. P. Istomin, N. M. Karimov

SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

- Study of gas hazard pattern in underground workings after blasting 47
D. V. Olkhovskiy, O. S. Parshakov, S. A. Bublik

MINING MACHINERY, TRANSPORT, AND MECHANICAL ENGINEERING

- Effect of operating conditions of mine monorail locomotives on the durability
of drive wheel polymeric rims 59
E. M. Arefiev, K. A. Ryabko
- Behaviour pattern of rock mass haulage energy intensity in deep pits 68
A. G. Zhuravlev, I. A. Glebov, V. V. Chernykh

POWER ENGINEERING, AUTOMATION, AND ENERGY PERFORMANCE

- Equivalent circuit for mine power distribution systems
for the analysis of insulation leakage current 78
A. V. Pichuev, V. L. Petrov

EXPERIENCE OF MINING PROJECT IMPLEMENTATION

- The assessment of the level of digitalization and digital transformation
of oil and gas industry of the Russian Federation 87
V. V. Yurak, I. G. Polyanskaya, A. N. Malyshev



СОДЕРЖАНИЕ

РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

- Инженерно-геологическое обоснование ресурсного потенциала
дна Южно-Китайского моря 5
Ю.В. Кириченко, Ч. Т. К. Нго, М.В. Щёкина

СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

- Амплитудно-частотный отклик распределенного акустического сенсора DAS
со спиральной намоткой волокна 13
А.В. Чугаев, М.В. Тарантин

- Влияние амплитуды деформации и всестороннего давления на скорость и затухание
Р- и S-волн в сухом и водонасыщенном песчанике: экспериментальное исследование..... 22
Э.И. Машинский

- Влияние длины трещин со случайными параметрами
на электрическую проводимость горных пород 30
П.Е. Сизин, А.С. Вознесенский, Л.К. Кидима Мбомби

ОБОГАЩЕНИЕ, ПЕРЕРАБОТКА МИНЕРАЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

- Влияние глинистых минералов на процесс подземного выщелачивания урана 39
О.Ф. Петухов, И.У. Халимов, В.П. Истомин, Н.М. Каримов

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

- Исследование динамики газовой обстановки подземных выработок
после проведения взрывных работ 47
Д.В. Ольховский, О.С. Паршаков, С.А. Бублик

ГОРНЫЕ МАШИНЫ, ТРАНСПОРТ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Влияние условий эксплуатации шахтных монорельсовых локомотивов
на долговечность полимерных ободьев приводных колес 59
Е.М. Арефьев, К.А. Рябко

- Закономерности изменения энергоемкости транспортирования
горной массы транспортом глубоких карьеров 68
А.Г. Журавлев, И.А. Глебов, В.В. Черных

ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

- Обоснование схемы замещения шахтной подземной электрической сети
для анализа режимов утечки тока через изоляцию 78
А.В. Пичуев, В.Л. Петров

ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ В ГОРНОПРОМЫШЛЕННОМ СЕКТОРЕ ЭКОНОМИКИ

- Оценка уровня цифровизации и цифровой трансформации нефтегазовой отрасли РФ 87
В.В. Юрак, И.Г. Полянская, А.Н. Малышев



РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-09-14>

УДК 553.068.56:551.462

**Инженерно-геологическое обоснование ресурсного потенциала
дна Южно-Китайского моря**Ю. В. Кириченко¹ , Чан Тхиен Кюи Нго² , М. В. Щёкина¹ ✉¹ Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация² Вьетнамский национальный университет Хошимина, Университет естественных наук, г. Хошимин, Вьетнам✉ mshchekina@yandex.ru**Аннотация**

Принятая в Социалистической Республике Вьетнам программа развития народного хозяйства, базирующегося на собственной минерально-сырьевой базе, требует повышения объемов добычи полезных ископаемых, в том числе жидких углеводородов, вовлечения нетрадиционных видов твердых полезных ископаемых. Исследована ресурсная база месторождений полезных ископаемых Южно-Китайского моря. Идея исследований заключалась в определении и научном обосновании классификационных критериев зонирования (районирования) и выделении перспективных участков с залежами железомарганцевых образований и других твердых полезных ископаемых. Проведен анализ россыпных месторождений на шельфе и залежей железомарганцевых образований в глубинных районах Вьетнамского моря. Проведен многосторонний анализ гидрологических, геофизических, инженерно-геологических, экологических условий залегания месторождений, определены критерии перспективности образования и развития залежей железомарганцевых образований. Эти критерии позволили произвести выделение участков с различным рейтингом перспективности. В пределах Южно-Китайского моря выделены зоны (участки) с высоким, средним и низким потенциалом нахождения конкреций, а также выявлена аналогичная зональность для корок. Определены площади указанных зон. Результаты исследований показали, что общая потенциальная площадь железомарганцевых конкреций составляет 91 480 км², площадь с потенциалом железомарганцевых корок – 2421,6 км² и площадь сосуществования конкреций и корок – 18 777 км². При этом приоритетными районами для будущих разведок являются районы с высоким потенциалом конкреций площадью 18 110 км² и районы с высоким потенциалом корок площадью 882,6 км². На основании полученных материалов произведено районирование дна Вьетнамской эксклюзивной зоны Южно-Китайского моря и составлены карты ресурсно-прогнозной перспективности морского дна, в пределах которых необходимо организовывать поисково-разведочные работы.

Ключевые слова

ресурсный потенциал, шельф, глубоководные районы, многофакторный анализ, россыпи, железомарганцевые образования, месторождение, конкреции, корки, прогнозная перспективность, районирование, Южно-Китайское море, Вьетнам

Для цитирования

Kirichenko Yu.V., Ngo T.T.Q., Shchyokina M.V. The engineering and geological substantiation of the resource potential of the bed of the South China Sea. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):5–12. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-09-14>

MINERAL RESOURCES EXPLOITATION

Research paper

**The Engineering and geological substantiation of the resource potential
of the bed of the South China Sea**Yu. V. Kirichenko¹ , Tran Thien Quy Ngo² , M. V. Shchyokina¹ ✉¹ University of Science and Technology MISiS, Moscow, Russian Federation² Vietnam National University Ho Chi Minh City, University of Science, Ho Chi Minh City, Vietnam✉ mshchekina@yandex.ru**Abstract**

The program for the development of the national economy based on own mineral raw materials as adopted in the Socialist Republic of Vietnam requires an increase the volumes of minerals. This includes both liquid hydrocarbons, and non-traditional solid minerals. This paper examines the resource base of mineral deposits



in the South China Sea. The objective was to determine and scientifically establish classification criteria for zoning (regionalization), as well as to identify prospective areas with deposits of ferromanganese formations and other solid minerals. An analysis was undertaken of placers on the shelf and deposits of ferromanganese formations in the deep areas of the Vietnam Sea. A multiparameter analysis of the hydrological, geophysical, engineering and geological, environmental conditions of the deposit positions was conducted. In addition, criteria for the prospects of the formation and development of deposits of ferromanganese formations were established. These criteria enabled areas with different prospectivity ratings to be identified. Within the South China Sea, zones (areas) with a high, medium, and low potential for the presence of nodules were identified. Similar zoning for the crusts was also identified. The areas of these zones were determined. The results of the research established that the total potential area of ferromanganese nodules is 91,480 km². The area with the potential of ferromanganese crusts is 2,421.6 km², while the area of coexistence of nodules and crusts is 18,777 km². Furthermore, priority regions for future exploration are those with high nodule potential covering an area of 18,110 km² and the regions of high crust potential with an area of 882.6 km². Based on the materials obtained, the bed of the Vietnamese Exclusive Zone of the South China Sea was zoned. Maps of the resource and predictive prospects of the seabed were drawn, and the prospecting and exploration operations can be established within this framework.

Key words

resource potential, shelf, deep water areas, multiple factor analysis, placers, ferromanganese formations, deposit, nodules, crusts, predictive prospects, zoning, South China Sea, Vietnam

For citation

Kirichenko Yu.V., Ngo T.T.Q., Shchyokina M.V. The engineering and geological substantiation of the resource potential of the bed of the South China Sea. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):5–12. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-09-14>

Принятая в Социалистической Республике Вьетнам программа развития народного хозяйства, базирующегося на собственной минерально-сырьевой базе, требует повышения объемов добычи полезных ископаемых (ПИ), в том числе жидких углеводородов, вовлечения видов твердых ПИ, месторождений которых на суше практически нет¹ [1–3].

Наличие у страны протяженной береговой линии западной окраины Тихого океана, близкое расположение северо-западной границы мегатояса и северного приэкваториального пояса железомарганцевого конкрециеобразования, результаты анализа геологических исследований морского дна, положительный опыт освоения прибрежных и шельфовых россыпей, а также активизация и претензии Китая на освоение акватории Южно-Китайского моря (ЮКМ) предопределяют актуальность организации и развития геологоразведочных работ и освоения морских месторождений Вьетнамом [1–3, 4, 5].

Морские твердые полезные ископаемые (ТПИ) содержат компоненты, имеющие стратегическое значение для экономического и промышленного развития Вьетнама, особенно в области высокотехнологичного машиностроения, включают россыпи ильменита, рутила, циркона, монацита, касситерита и т.п., железомарганцевые конкреции и корки, полиметаллические сульфиды и, возможно, обогащенно-полиметаллические илы [6, 7].

Поэтому исследование, поиск и разведка морских полезных ископаемых во Вьетнаме имеют большое значение, способствуя ориентации на рациональное использование минеральных ресурсов для процесса индустриализации, утверждению суверенитета стра-

ны в исключительной экономической зоне, развитию Вьетнама на пути к тому, чтобы стать сильной морской державой. Вьетнам принял Стратегию устойчивого морского экономического развития страны до 2020 г. (начиная с 2007 г.), до 2030 г. и до 2045 г.²

Для решения проблемы развития ресурсной базы проведено инженерно-геологическое обоснование перспектив освоения морских месторождений твердых полезных ископаемых Вьетнама на основе использования карт ресурсно-прогнозного районирования дна. Идея исследований заключалась в выделении и научном обосновании классификационных критериев зонирования (районирования) и выделении перспективных участков с залежами железомарганцевых образований (ЖМО) и других ТПИ. Классификационные признаки использовались при составлении карт районирования по приоритетности организации поисковых работ морских месторождений и разработки средств и методов инженерно-геологических исследований донных отложений шельфовой зоны и глубинных районов Южно-Китайского моря (эксклюзивной экономической зоны) [2, 3].

С этой целью нами были выполнены следующие исследования:

- проведены анализ и оценка современного уровня и состояния морских геологоразведочных работ и степени изученности шельфовой зоны и глубинных районов Южно-Китайского моря Республикой Вьетнам;

- определены условия образования и накопления строительных материалов и россыпей в прибрежных районах и шельфовой зоне как предпосылки для выявления зон и районов с потенциальными и перспек-

¹ Резолюция № 36-NQ/TW (22 октября 2018 г.) «Стратегия устойчивого развития морской экономики Вьетнама до 2030 г., видение до 2045 г.»

² Резолюция № 36-NQ/TW (22 октября 2018 г.) «Стратегия устойчивого развития морской экономики Вьетнама до 2030 г., видение до 2045 г.»

тивными условиями образования и развития железомарганцевых месторождений в морях Вьетнама;

- проведены обзорная оценка и анализ потенциала твердых полезных ископаемых морского дна Вьетнама, включая результаты исследований месторождений строительных материалов, россыпей во вьетнамских водах и месторождений железомарганца в глубинных районах Южно-Китайского моря;

- создана батиметрическая карта дна ЮКМ, обобщены и проанализированы другие факторы, влияющие на формирование и развитие железомарганцевых месторождений в Мировом океане, с целью выявления этих признаков во Вьетнамском море (рис. 1);

- определены благоприятные критерии, влияющие на формирование железомарганцевых руд, с целью зонирования дна ЮКМ по потенциалу их образования в виде грануляций и корок для будущих поисков и разведки.

При выполнении этих исследований использовались многочисленные результаты ранее проведенных исследований в самых различных областях: геологии [4, 5, 8, 9], геофизики [5], петрографии [5, 10],

геохимии [6, 7], гидрологии [7, 11–13], океанографии [7, 11, 12, 14], геоморфологии [6, 7, 9, 13, 15], инженерной геологии [7, 16–18], минералогии [19], топографии морского дна [20] и т.д. [21, 22].

На основании многофакторного анализа были разработаны критерии, которые приведены в табл. 1–3.

Критерии районирования расположены в порядке убывания перспективности от 1 до 6. В условиях ЮКМ важны критерии 1, 2, 3 и их рассмотрение должно быть приоритетным.

В некоторых случаях в дополнение к этим критериям геоморфологические критерии используются для оценки континентальных шельфов, долин между подводными горами, топографии вершин подводных гор.

Критерии, используемые для выделения участков, неблагоприятных для образования и роста железомарганцевых конкреций и корок, представлены в табл. 4.

Разработанные критерии позволили произвести районирование дна Вьетнамского моря и выделить ряд участков, в пределах которых целесообразно организовать поисково-разведочные работы на наличие железомарганцевых образований (рис. 2).

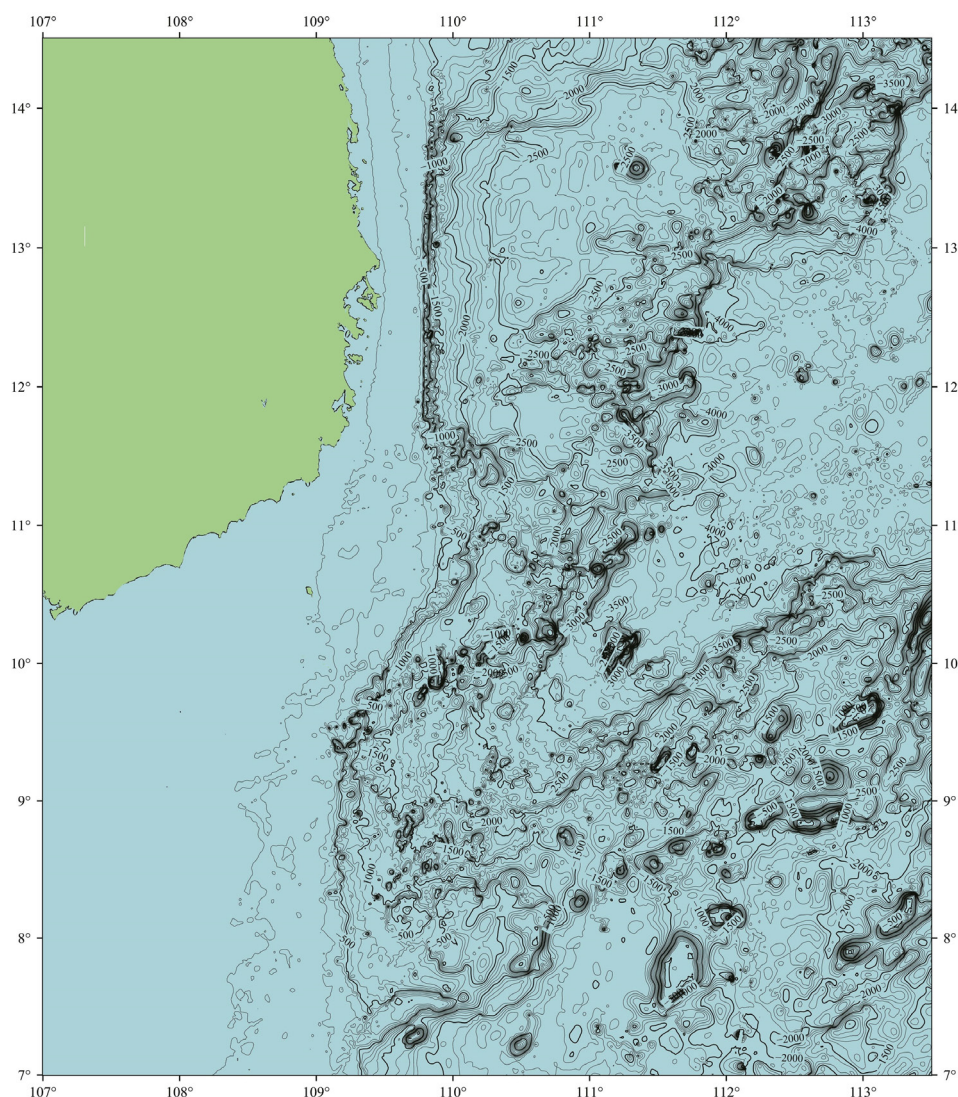


Рис. 1. Батиметрическая карта морского дна ЮКМ



Таблица 1

Критерии районирования месторождений железомарганцевых конкреций

№	Критерий	Значение критерия для присваиваемого рейтинга		
		высокий	средний	низкий
1	Глубина моря, м	3000–4000	> 4000	2000–3000 абиссальные равнины после континентального склона и поднятия
2	Углы наклона морского дна, град	0–3	0–3	0–3
3	Возраст формирования рельефа дна (подводные горы/равнины), млн лет	Многие миллионы лет (Очень благоприятные условия – морское дно старое: 15,5–24 млн лет)	Морское дно сформировалось 15,5–24 млн лет назад	Многие миллионы лет
4	Наличие ядер для об- разования и развития конкреций	Есть. Районы, расположенные вдали от подводных вулканов, подводных гор, богатые биокластом кремнезема	Есть. Районы, расположенные вдали от подводных вулканов, подводных гор, богатые биокластом кремнезема	Есть
5	Скорость течения, см/с	< 4 для диагенетических	< 3	Не влияет
6	Осадки на поверхности морского дна	Практически отсутствуют	Практически отсутствуют	Практически отсутствуют

Таблица 2

Критерии районирования месторождений железомарганцевых корок

№	Критерий	Значение критерия для присваиваемого рейтинга		
		высокий	средний	низкий
1	Глубина моря, м	800–1800	500–800; и > 1800	500 м до дна
2	Углы наклона морского дна, град	15–40	15–40	15–40
3	Возраст формирования рельефа дна (подводные горы/равнины), млн лет	Многие миллионы лет (>3). Более древний возраст способствует образованию руд	Многие миллионы лет (>3). Более древний возраст способствует образованию руд	Относительно малый возраст поверхности
4	Поверхность коренной породы	Нет осадка и на базальтовой поверхности (очень высокий), на поверхности известняка, гранита, риолита (высокий)	Нет осадка	В некоторых местах есть осадок
5	Скорость течения, см/с	4–5	4–15 (500–800 м); и < 3 (на глубинах > 1800 м)	Нет необходимости рассматривать
6	Осадки на поверхности морского дна	Отсутствуют	Отсутствуют	Отсутствуют

Таблица 3

Критерии районирования месторождений железомарганцевых конкреций и корок

№	Критерий	Значение критерия для присваиваемого рейтинга	
		средний	низкий – нулевой
1	Глубина моря, м	500–4000	500–4000
2	Углы наклона морского дна, град	7–15	7–15
3	Возраст формирования рельефа дна (подводные горы/равнины), млн лет	> 3	< 3
4	Поверхность коренной породы	Есть ядра. Скопление осадка на поверхности неоднородно	Есть ядра. Скопление осадка на поверхности неоднородно
5	Ядро для развития конкреций		
6	Скорость течения, см/с	4–15	4–15

Таблица 4

Области без потенциально-перспективных условий образования конкреций и корок

№	Критерий	Корки	Конкреции
1	Глубина моря, м	< 500 м	Континентальный шельф, глубина до 500 м. Равнины имеют пологий угол наклона ($0^{\circ} - 3^{\circ}$) на материковых склонах, подводные горы имеют пологие вершины
2	Углы наклона морского дна, град	Плоская вершина подводных гор (0–3)	3–7 и > 40
3	Возраст формирования рельефа дна (подводные горы/равнины), млн лет	Относительно малый возраст поверхности, очень молодые вулканы	Не влияет
4	Поверхность коренной породы	Нет необходимости рассматривать	Не влияет
5	Наличие ядер для образования и развития конкреций	Не влияет	Есть
6	Скорость течения, см/с	Нет необходимости рассматривать	Нет необходимости рассматривать

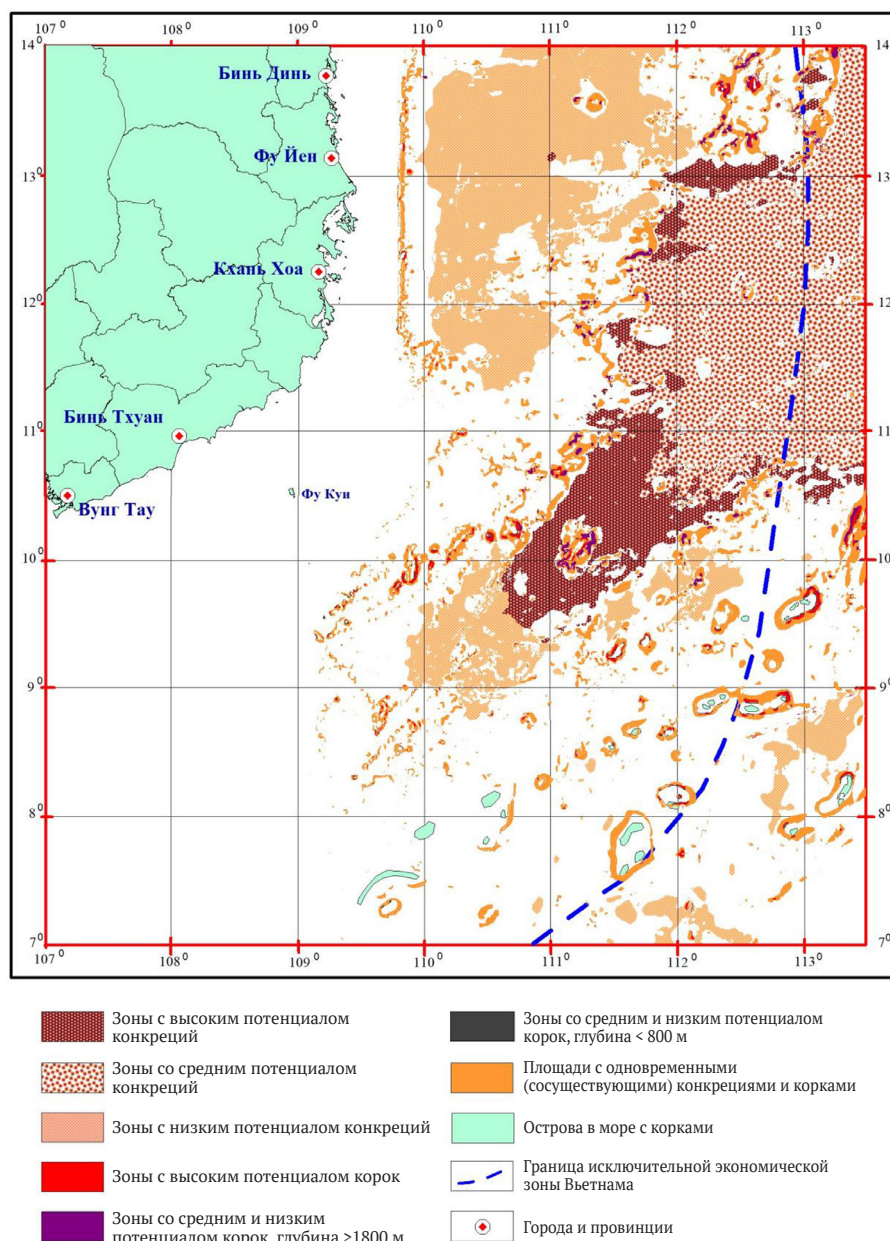


Рис. 2. Карта районирования дна ЮКМ по потенциалу нахождения перспективных железомарганцевых месторождений (район/карта зон поисково-разведочных работ)



Результаты исследований позволили выделить в исключительной морской зоне Вьетнама потенциальные площади железомарганцевых месторождений:

Группа конкреций

– Площадь с высоким потенциалом нахождения конкреций – 18 110 км², из которых наибольшая площадь составляет 13 460 км² – в центральной долине на юго-западе Южно-Китайского моря.

– Площадь со средним потенциалом нахождения конкреций – 28 400 км².

– Площадь с низким потенциалом нахождения конкреций – 44 970 км², включая 4 участка, из которых самый большой площадью 34 110 км² находится на севере исследуемой территории.

Группа корок

Общая площадь составляет 2421,6 км², в том числе:

– площадь с высоким потенциалом – 882,6 км²,

– площади со средним и низким потенциалом – 1539 км².

Группа одновременных (сосуществующих) конкреций и корок – 18,777 км².

Эти карты служат основой для планирования геологоразведочных работ в пределах Вьетнамского моря с высокой степенью обнаружения залежей ЖМО и дальнейшего планирования добычных работ.

Выводы

Вьетнамское море имеет типичное геологическое строение окраинных морей, включающих шельф с россыпными месторождениями, абиссальные равнины с подводными горами и залежами железомар-

ганцевых образований различных типов на них, что значительно повышает минерально-сырьевой потенциал Вьетнама.

Прогнозное районирование дна ЮКМ по перспективности участков для организации поисковых и разведочных работ необходимо производить по классификационным признакам, выявленным на основании результатов многофакторного анализа известных подводных месторождений ТПИ, существующих данных геологических, гидрологических, геофизических, инженерно-геологических и т.п. исследований.

Проведённое районирование позволило выделить на дне Южно-Китайского моря (в том числе в пределах эксклюзивной экономической зоны Вьетнама) участки с различным потенциалом нахождения конкреций и корок по следующим категориям: высокий, средний и низкий, с определениями площадей.

Результаты исследований показали, что общая потенциальная площадь железомарганцевых конкреций составляет 91 480 км², площадь с потенциалом железомарганцевых корок – 2421,6 км² и площадь сосуществования конкреций и корок – 18 777 км². При этом приоритетными районами для будущих разведок являются районы с высоким потенциалом конкреций площадью 18 110 км² и районы с высоким потенциалом корок площадью 882,6 км².

Планирование и проведение морских геологоразведочных работ в ЮКМ необходимо производить на основании выделенных перспективных участков с классификационными особенностями.

Список литературы

1. Нго Чан Тхиен Кюи, Кириченко Ю.В., Щёкина М.В. Перспективные и разведываемые месторождения твердых минеральных ресурсов шельфа и глубинных районов Вьетнама. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(9):103–112. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_9_0_103
2. Кириченко Ю.В., Нго Чан Тхиен Кюи, Фам Ба Чунг и др. Геологическая характеристика, потенциал и генезис образования железомарганцевых руд на дне юго-западной части Южно-Китайского моря. Ч. 1. Геологическая характеристика подводных месторождений, методы и способы поисковых работ. *Горная промышленность*. 2022;(1):104–109. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1-104-109>
3. Кириченко Ю.В., Нго Чан Тхиен Кюи, Фам Ба Чунг и др. Геологическая характеристика, потенциал и генезис образования железомарганцевых руд на дне юго-западной части Южно-Китайского моря. Ч. 2. Результаты исследований образцов руд дна Южно-Китайского моря. *Горная промышленность*. 2022;(2):67–75. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-2-67-75>
4. Le D.T. Fundamental Problems. In: *South China Sea*. Vol. 1. Hanoi: Publ. House of Natural Science and Technology; 2009. 317 p.
5. Mai T.T. Geology and Geophysics. In: *South China Sea*. Vol. 3. Hanoi: Publ. House of Natural Science and Technology; 2003. 458 p.
6. Hein J.R., Koschinsky A. Deep-ocean ferromanganese crusts and nodules. In: *Treatise on Geochemistry*. 2nd ed. 2014;13:273–291. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01111-6>
7. Sharma R. (ed.) *Deep sea mining: resource potential, technical and environmental considerations*. Springer Cham; 2017. 548 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52557-0>
8. Chao Sh.-Y., Shaw P.-T., Wu S.Y. Deep water ventilation in the South China Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 1996;43(4):445–466. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(96\)00025-8](https://doi.org/10.1016/0967-0637(96)00025-8)
9. Gillard B., Purkiani K., Chatzievangelou D. et al. Physical and hydrodynamic properties of deep sea mining-generated, abyssal sediment plumes in the Clarion Clipperton Fracture Zone (eastern-central Pacific). *Elementa: Science of the Anthropocene*. 2019;7(1):5. <https://doi.org/10.1525/elementa.343>
10. Long B.H., Thu P.M., Trung N.N. Initial understanding and assessment of role of oceanographic features for ferromanganese crust and nodules in the East Vietnam Sea. *Vietnam Journal of Marine Science and Technology*. 2020;20(4):383–397. <https://doi.org/10.15625/1859-3097/15775>



11. Du D., Ren X., Yan S. et al. An integrated method for the quantitative evaluation of mineral resources of cobalt-rich crusts on seamounts. *Ore Geology Reviews*. 2017;84:174–184. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.01.011>
12. Hein J.R., Conrad T.A., Dunham R.E. Seamount characteristics and mine-site model applied to exploration- and mining-lease-block selection for cobalt-rich ferromanganese crusts. *Marine Georesources & Geotechnology*. 2009;27:160–176. <https://doi.org/10.1080/10641190902852485>
13. Yeo I.A., Howarth S.A., Spearman J. et al. Distribution of and hydrographic controls on ferromanganese crusts: Tropic Seamount, Atlantic. *Ore Geology Reviews*. 2019;114:103131. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103131>
14. Wang P., Li Q. (eds.) *The South China sea: paleoceanography and sedimentology*. Springer Dordrecht; 2009. 516 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9745-4>
15. Yamazaki T., Sharma R. Morphological features of Co-rich manganese deposits and their relation to seabed slopes. *Marine Georesources and Geotechnology, Marine Georesources & Geotechnology*. 2000;18(1):43–76. <https://doi.org/10.1080/10641190009353782>
16. Генов Р., Димитров Т., Киров Б. и др. *Геология и минеральные ресурсы Мирового океана*. Варшава: Intermorgeo; 1990. 756 с.
17. Hein J.R., Konstantinova N., Cherkashov G. et al. Arctic deep water ferromanganese-oxide deposits reflect the unique characteristics of the arctic ocean. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2017;18(11):3771–3800. <https://doi.org/10.1002/2017GC007186>
18. Emelyanov E. *The barrier zones in the ocean*. Springer Berlin, Heidelberg; 2005. 631 p. <https://doi.org/10.1007/b137218>
19. Hoang N., Trinh P.T. Synthesis of petrographic and geochemical characteristics of Neogene-Quaternary effusives and mantle dynamics of the East Sea and adjacent areas. *Journal of Geology. Series A*. 2009;312(5–6):39–57. (In Vietnamese)
20. Conrad T., Hein J.R., Paytan A., Clague D.A. Formation of Fe-Mn crusts within a continental margin environment. *Ore Geology Reviews*. 2017;87:25–40. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.09.010>
21. Yang K., Yao H., Ma W. et al. A step-by-step relinquishment method for cobalt rich crusts: a case study on Caiqi Guyot, Pacific Ocean. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2022;40(9):1139–1150. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2021.1973161>
22. Zhong Y., Chen Zh., González F.J. et al. Composition and genesis of ferromanganese deposits from the northern South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2017;138:110–128. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.02.015>

References

1. Ngo Tran Thien Quy, Kirichenko Yu. V., Shchyokina M. V. Promising and provable solid mineral resources in the shelf and abyssal deposits in Vietnam. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(9):103–112. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_9_0_103
2. Kirichenko Yu. V., Ngo Tran Thien Quy, Pham Ba Trung et al. Geological characteristics, potential and genesis of iron-manganese ore formation at the bottom of the southwestern part of the South China Sea. Part 1. Geological Characteristics of Subsea Deposits, Exploration Methods and Techniques. *Russian Mining Industry*. (In Russ.) 2022;(1):104–109. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1-104-109>
3. Kirichenko Yu. V., Ngo Tran Thien Quy, Pham Ba Trung et al. Geological characteristics, potential and genesis of iron-manganese ore formation at the bottom of the southwestern part of the South China Sea. Part 2. Results of studying ore samples from the bottom of the South China Sea. *Russian Mining Industry*. 2022;(2):67–75. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-2-67-75>
4. Le D. T. Fundamental Problems. In: *South China Sea*. Vol. 1. Hanoi: Publ. House of Natural Science and Technology; 2009. 317 p.
5. Mai T. T. Geology and Geophysics. In: *South China Sea*. Vol. 3. Hanoi: Publ. House of Natural Science and Technology; 2003. 458 p.
6. Hein J.R., Koschinsky A. Deep-ocean ferromanganese crusts and nodules. In: *Treatise on Geochemistry*. 2nd ed. 2014;13:273–291. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01111-6>
7. Sharma R. (ed.) *Deep sea mining: resource potential, technical and environmental considerations*. Springer Cham; 2017. 548 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52557-0>
8. Chao Sh.-Y., Shaw P.-T., Wu S.-Y. Deep water ventilation in the South China Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 1996;43(4):445–466. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(96\)00025-8](https://doi.org/10.1016/0967-0637(96)00025-8)
9. Gillard B., Purkiani K., Chatzievangelou D. et al. Physical and hydrodynamic properties of deep sea mining-generated, abyssal sediment plumes in the Clarion Clipperton Fracture Zone (eastern-central Pacific). *Elementa: Science of the Anthropocene*. 2019;7(1):5. <https://doi.org/10.1525/elementa.343>
10. Long B.H., Thu P.M., Trung N.N. Initial understanding and assessment of role of oceanographic features for ferromanganese crust and nodules in the East Vietnam Sea. *Vietnam Journal of Marine Science and Technology*. 2020;20(4):383–397. <https://doi.org/10.15625/1859-3097/15775>



11. Du D., Ren X., Yan S. et al. An integrated method for the quantitative evaluation of mineral resources of cobalt-rich crusts on seamounts. *Ore Geology Reviews*. 2017;84:174–184. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.01.011>
12. Hein J.R., Conrad T.A., Dunham R.E. Seamount characteristics and mine-site model applied to exploration- and mining-lease-block selection for cobalt-rich ferromanganese crusts. *Marine Georesources & Geotechnology*. 2009;27:160–176. <https://doi.org/10.1080/10641190902852485>
13. Yeo I.A., Howarth S.A., Spearman J. et al. Distribution of and hydrographic controls on ferromanganese crusts: Tropic Seamount, Atlantic. *Ore Geology Reviews*. 2019;114:103131. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103131>
14. Wang P., Li Q. (eds.) *The South China sea: paleoceanography and sedimentology*. Springer Dordrecht; 2009. 516 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9745-4>
15. Yamazaki T., Sharma R. Morphological features of Co-rich manganese deposits and their relation to seabed slopes. *Marine Georesources and Geotechnology*, *Marine Georesources & Geotechnology*. 2000;18(1):43–76. <https://doi.org/10.1080/10641190009353782>
16. Genov R., Dimitrov T., Kirov B. et al. *Geology and mineral resources of the World Ocean*. Warsaw: Intermorgeo; 1990. 756 p. (In Russ.)
17. Hein J.R., Konstantinova N., Cherkashov G. et al. Arctic deep water ferromanganese-oxide deposits reflect the unique characteristics of the Arctic ocean. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2017;18(11):3771–3800. <https://doi.org/10.1002/2017GC007186>
18. Emelyanov E. *The barrier zones in the ocean*. Springer Berlin, Heidelberg; 2005. 631 p. <https://doi.org/10.1007/b137218>
19. Hoang N., Trinh P.T. Synthesis of petrographic and geochemical characteristics of Neogene-Quaternary effusives and mantle dynamics of the East Sea and adjacent areas. *Journal of Geology. Series A*. 2009;312(5–6):39–57. (In Vietnamese)
20. Conrad T., Hein J.R., Paytan A., Clague D.A. Formation of Fe-Mn crusts within a continental margin environment. *Ore Geology Reviews*. 2017;87:25–40. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.09.010>
21. Yang K., Yao H., Ma W. et al. A step-by-step relinquishment method for cobalt rich crusts: a case study on Caiqi Guyot, Pacific Ocean. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2022;40(9):1139–1150. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2021.1973161>
22. Zhong Y., Chen Zh., González F.J. et al. Composition and genesis of ferromanganese deposits from the northern South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2017;138:110–128. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.02.015>

Информация об авторах

Юрий Васильевич Кириченко – доктор технических наук, профессор кафедры геологии и маркшейдерского дела, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; Scopus ID [7007186248](https://orcid.org/0000-0002-1000-1000); e-mail kirichenko.iv@misis.ru

Чан Тхиен Кюи Нго – аспирант, Университет естественных наук, Вьетнамский национальный университет Хошимина, г. Хошимин, Вьетнам; Scopus ID [57222072264](https://orcid.org/0000-0002-1000-1000); e-mail nttquy@hcmus.edu.vn

Марина Владимировна Щёкина – кандидат технических наук, доцент кафедры геологии и маркшейдерского дела, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; Scopus ID [57271022000](https://orcid.org/0000-0002-1000-1000); e-mail mshchekina@yandex.ru

Information about the authors

Yuriy V. Kirichenko – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Geology and Mine Surveying, University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; Scopus ID [7007186248](https://orcid.org/0000-0002-1000-1000); e-mail kirichenko.iv@misis.ru

Tran Thien Quy Ngo – PhD-Student, University of Natural Sciences, Viet Nam National University Ho Chi Minh City, Ho Chi Minh City, Viet Nam; Scopus ID [57222072264](https://orcid.org/0000-0002-1000-1000); e-mail nttquy@hcmus.edu.vn

Marina V. Shchyokina – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Geology and Mine Surveying, University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; Scopus ID [57271022000](https://orcid.org/0000-0002-1000-1000); e-mail mshchekina@yandex.ru

Поступила в редакцию 05.09.2022
Поступила после рецензирования 08.12.2022
Принята к публикации 15.12.2022

Received 05.09.2022
Revised 08.12.2022
Accepted 15.12.2022



СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-06-10>

УДК 550.834.08

**Амплитудно-частотный отклик распределенного акустического сенсора DAS со спиральной намоткой волокна**А. В. Чугаев   , М. В. Тарантин 

Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Российская Федерация

 chugaev@mi-perm.ru**Аннотация**

При проведении настоящего исследования была поставлена цель проанализировать возможности распределенных датчиков DAS при решении горнотехнических задач, сравнить с существующими сейсмоакустическими системами сбора данных и подготовить основу для проведения сейсмоакустических исследований с регистрацией оптоволоконной распределенной системой. Рассмотрены возможности регистрации сейсмоакустических сигналов с помощью оптоволоконных распределенных акустических систем. На основании физико-геометрического анализа получены амплитудно-частотные характеристики регистрируемых продольных волн для прямого и спирального волокна. Для спирального волокна амплитудно-частотные характеристики зависят от нескольких ключевых факторов: интегрирования измеряемого значения вдоль волокна на базе измерения, угла падения волны на кабель и угла намотки волокна в кабеле. Увеличение угла намотки повышает равномерность амплитудно-частотной характеристики продольных волн как по частотам, так и по углам падения. В то же время спиральная намотка меняет эффективную базу измерения сигнала, что позволяет путем суммирования сигналов прямого и спирального волокна за счет перекрытия спектров выполнять регистрацию частот, подавляемых при отдельной записи. По результатам исследования предложена конструкция кабеля для регистрации широкополосных сейсмоакустических сигналов, с помощью которых можно решать обширный круг горнотехнических и инженерных задач, выполняя сейсморазведочные исследования как в скважинах, так и на поверхности.

Ключевые слова

распределенный акустический датчик, оптоволоконный сенсор, сейсморазведка, скважинная сейсмоакустика, рассеяние Рэлея, диаграмма направленности приемника

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта №20-45-596032.

Для цитирования

Chugaev A. V., Tarantin M. V. Amplitude-frequency response of a helically-wound fiber distributed acoustic sensor (DAS). *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):13–21. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-06-10>

MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research paper

Amplitude-frequency response of a helically-wound fiber distributed acoustic sensor (DAS)A. V. Chugaev   , M. V. Tarantin 

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

 chugaev@mi-perm.ru**Abstract**

The goals of this study were to analyze the capabilities of DAS (distributed sensors) in resolving mining problems, compare them with existing seismoacoustic data collection systems, and prepare the basis for conducting seismoacoustic studies with recording by a fiber optic distributed system. This paper considers the capabilities of recording seismoacoustic responses using fiber optic distributed acoustic systems (DAS). Based on physical and geometrical analysis, the amplitude-frequency responses (characteristics) of recorded longitudinal waves for straight and helically-wound fibers were obtained. In the case of helically-wound fiber, the frequency response depends on several key factors: integrating the measured value along the fiber based on the measurement; the angle of incidence on the cable; and the winding angle of the fiber in the cable. An increase in the winding angle increases the uniformity of the amplitude-frequency characteristics of longitudinal waves both in terms



of frequencies and angles of incidence. At the same time, helical winding changes the effective response spacing (gauge length). This makes it possible, by summing the responses of the straight and helically-wound fibers due to the overlap of the spectra, to record frequencies that are suppressed in case of separate recording.

Based on the study results, a cable design was proposed to record broadband seismoacoustic responses enabling a wide range of mining and engineering problems to be resolved, and for seismic surveys both in wells and on the surface to be carried out.

Keywords

distributed acoustic sensor, fiber optic sensor, seismic exploration, borehole seismoacoustics, Rayleigh scattering, receiver directivity pattern

Acknowledgments

The reported study was funded by the Russian Foundation for Basic Research and the Perm Territory, Project Number 20-45-596032.

For citation

Chugaev A. V., Tarantin M. V. Amplitude-frequency response of a helically-wound fiber distributed acoustic sensor (DAS). *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):13–21. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-06-10>

Введение

Распределенные системы регистрации акустических сигналов с помощью оптоволоконна (DAS – distributed acoustic sensing) хорошо известны уже несколько лет [1–3]. Однако их внедрение в практику геофизических исследований требует решения определенных практических задач, связанных с физико-геометрическими особенностями таких систем.

Регистрация акустического сигнала в системе DAS осуществляется за счет анализа спектра рэлеевского рассеяния света в оптоволокне, которое возникает при прохождении светового импульса заданной длины волны и длительности. Продольная деформация волокна приводит к изменению амплитудных и фазовых компонент частотных спектров отраженного оптического сигнала [2]. Оптическая интерферометрия позволяет вычислять величину деформации на определенном участке, положение которого может быть найдено по времени прихода отраженного оптического импульса при известной скорости света в волноводе [4, 5]. Единичная база приема L (Gauge Length), на которой производятся измерения, определяется оптоэлектронными характеристиками регистратора. В результате вычисляется профиль распределения напряжений в волокне в определенный момент времени. Повторный опрос ограничивается временем прихода отраженного сигнала от самого удаленного участка оптоволоконной магистрали. Скорость распространения света в оптоволокне составляет 2×10^8 м/с, и для линии 1 км двойное время пробега импульса света составляет 10^{-5} с, а для 100 км – 10^{-3} с, что на данный момент является ограничением дискретизации регистрируемого сигнала по времени.

При проведении настоящего исследования была поставлена цель проанализировать возможности распределенных датчиков DAS при решении горнотехнических задач, сравнить с существующими сейсмоакустическими системами сбора данных и подготовить основу для проведения сейсмоакустических исследований с регистрацией оптоволоконной распределенной системой.

Спектральный состав сигналов, регистрируемых оптоволоконными датчиками с линейным воло-

ном, рассмотрен в работах [6–8]. Поскольку измерения DAS предполагают осреднение измеряемого параметра на базе приема L , возникает искажение спектра акустического сигнала при частотах выше 150–300 Гц [7, 9, 10]. Сигналы со спектром, не превышающим эти значения, подходят для решения задач нефтяной сейсморазведки [3, 11, 12] и мониторинга рудных месторождений [13, 14]. В скважинной и шахтной сейсморазведке верхняя граница частотного диапазона полезного сигнала составляет 1000 Гц и выше [15–17], поэтому необходимо рассмотреть возможности применения распределенных оптоволоконных систем для решения горнотехнических задач, сравнить с существующими сейсмоакустическими системами сбора данных. Кроме того, на данный момент в литературе отсутствует анализ амплитудно-частотных характеристик кабеля со спиральным уложением волокна.

Диаграмма акустической направленности прямого оптоволоконна

Системы DAS измеряют деформацию оптоволоконна вдоль его оси, таким образом, для продольных волн диаграмма направленности определяется как $D_p(\alpha) = A_0 \cos^2 \alpha$, для поперечных волн $D_s(\alpha) = A_0 |\sin 2\alpha|$ [1, 18], где α – угол между волокном и вектором распространения волны; A_0 – амплитуда падающей волны. Падение сейсмической волны на линейный участок оптоволоконна рассмотрено в работах [3, 11, 19]. Такая диаграмма направленности существенно ограничивает круг возможных решаемых сейсморазведочных задач, в частности, во многих стандартных случаях сейсмических исследований целевые волны приходят по нормали к приемной линии.

Применение специальных кабелей с нестандартным уложением волокна может расширить возможности оптоволоконных систем для решения сейсмоакустических задач. Варианты конструкции кабеля приведены в патенте [20]. Для производства наиболее доступным способом уложения волокна в кабеле является спиральная намотка, натурные измерения описаны в работах [21, 22].

Влияние угла намотки на эффективную базу приема кабеля

При спиральной намотке длина волокна, уложенного в кабеле, будет больше, чем длина кабеля. Таким образом, будет изменяться и эффективное значение L_H связанного с кабелем породного массива.

Уменьшение базы приема пропорционально косинусу угла намотки:

$$L_H = L \cos \theta, \quad (1)$$

где θ – угол отклонения направляющей волокна от оси кабеля (для прямого волокна $\theta = 0^\circ$)¹; L – база приема вдоль волокна; L_H – база приема вдоль кабеля со спиральной намоткой волокна.

Влияние угла намотки на чувствительность кабеля

При изменении диаграммы направленности кабеля за счет намотки можно представить единичный отрезок спирали в виде линейного участка с эквивалентным распределением чувствительности по осям (рис. 1). В параметрическом виде энергия сигнала будет распределяться следующим образом:

$$E_z = E \cos^2 \theta; \quad (2)$$

$$E_r = E \sin^2 \theta; \quad (3)$$

$$E_{x,y} = \frac{1}{2} E \sin^2 \theta, \quad (4)$$

где E – полная чувствительность; E_z, E_r, E_x, E_y – чувствительности соответственно по оси z , в плоскости, перпендикулярной оси z , по осям x и y .

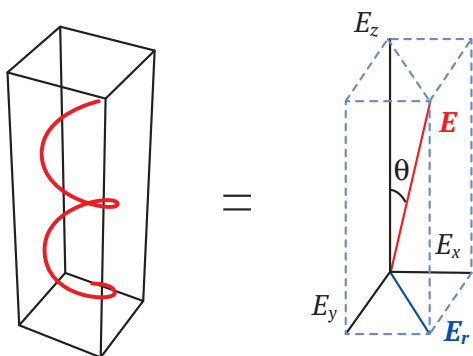


Рис. 1. Распределение чувствительности по осям при спиральной намотке волокна

На единице длины кабеля увеличение зарегистрированной энергии будет происходить за счет увеличения длины волокна и количества трасс вследствие уменьшения эффективной базы приема согласно формуле (1).

Алгоритм численного расчета диаграммы направленности кабеля за счет намотки приведен в работах [23, 24].

С увеличением угла намотки волокна появляется чувствительность системы по нормали к оси кабеля. Диаграмма направленности для продольных волн меняется с диаграммы одноосевого датчика в сторону диаграммы датчика давления, имеющего равномерную (сферическую) диаграмму.

Чувствительность равномерно распределяется по осям при значении угла намотки

$$\theta = \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right) \approx 54,7^\circ [19, 23].$$

Таким образом, при равномерной диаграмме направленности (шарообразной) по одной оси зарегистрированная энергия будет в 3 раза меньше и амплитуда сигнала уменьшится в $\sqrt{3}$ раз.

Суммарный сигнал от воздействия сейсмической волны со спиральным волокном складывается из ее взаимодействия с эквивалентными участками, разложенными по ортогональным осям. Для продольных волн сигналы будут складываться, а для поперечных – вычитаться (рис. 2).

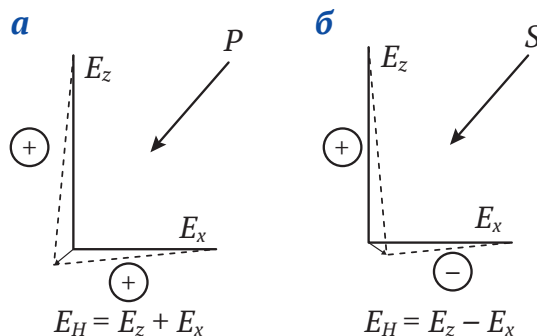


Рис. 2. Схема изменения длины волокна под воздействием продольных (а) и поперечных (б) волн

Диаграмма направленности симметрична относительно оси кабеля и зависит от углов намотки и падения сейсмической волны в соответствии с выражениями (2–4):

$$D_P(\alpha, \theta) = \cos^2 \alpha \cos^2 \theta + \frac{1}{2} \sin^2 \alpha \cos^2 \theta; \quad (5)$$

$$D_S(\alpha, \theta) = \left| \sin 2\alpha \cos^2 \theta \right| - \left| \frac{1}{2} \sin 2\alpha \sin^2 \theta \right|, \quad (6)$$

где D_P, D_S – направленность соответственно для P и S волн; α – угол между кабелем и лучом сейсмической волны. В графическом виде диаграммы приведены на рис. 3.

Заметим, что полученные данные отличаются от приведенных в работе [23], где полярность сигнала S -волн меняется в зависимости от направления распространения оптического сигнала в волокне. Однако это означало бы, что измерения на одном и том же участке кабеля путем подключения с разных концов оптической линии давали бы различные результаты.

¹ В литературе существует два различных способа отсчета угла намотки. Кувшинов, Braid, Innanen и др. принимают для прямого волокна 90° , в то время как в работах Егорова, Тертышников и др. прямому волокну соответствует 0° . Мы придерживаемся последнего варианта нотации.

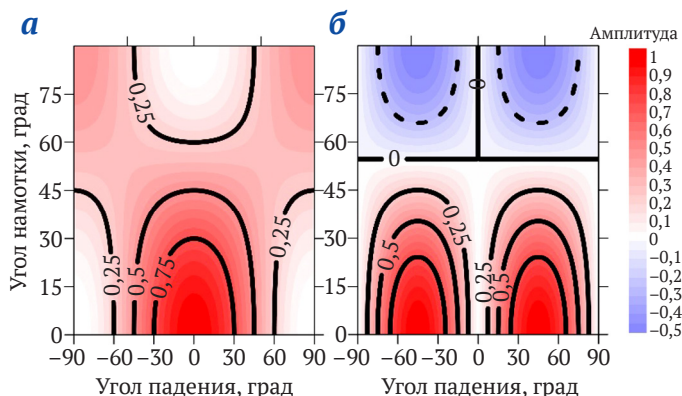


Рис. 3. Зависимости чувствительности кабеля со спиральным уложением волокна от углов падения волны и намотки волокна для P (а) и S (б) волн

Частотные характеристики регистрируемого сигнала для прямого волокна

Рассмотрим момент времени, когда монохроматическая упругая волна с частотой колебаний f создала продольные напряжения в волокне, растянутом вдоль оси z . В этом случае амплитуда регистрируемого сигнала будет изменяться согласно выражению

$$A(x) = A_0 \sin(kz),$$

где $k = 2\pi f/V$ – волновое число; A_0 – максимальная амплитуда сигнала.

Амплитуда сигнала, измеренного на отрезке длины L , равна сумме амплитуд вдоль этого отрезка:

$$A_L = A_0 \int_0^L \sin(kz) dz = A_0 \frac{V}{2\pi f} \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi f L}{V}\right) \right). \quad (7)$$

Здесь мы видим, что, во-первых, с ростом частоты амплитуда сигнала падает. Во-вторых, в точках, удовлетворяющих условию $L = n\lambda$, $n \in \mathbb{Z}$, функция принимает нулевое значение. В результате амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) осложнена участками ослабления сигнала в результате действия прямоугольного оконного фильтра, каким представляется протяженный линейный приемник. АЧХ для продольных волн, распространяющихся вдоль волокна со скоростью $V = 2500$ м/с, и базы измерения $L = 10$ м приведена на рис. 4.

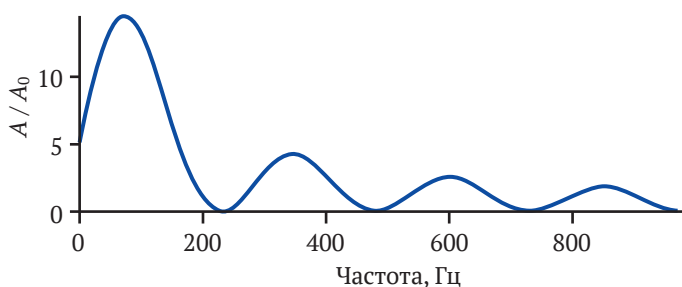


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика участка прямого волокна при прохождении волны вдоль него

Зависимость амплитудно-частотных характеристик от угла падения волны

При расположении линейного приемника в поле гармонической волны (рис. 5) видимый период будет увеличиваться при увеличении угла α между направлением распространения волны и линией приема от 0° до 90° . Видимая частота, в свою очередь, будет уменьшаться:

$$f_a = f |\cos \alpha|. \quad (8)$$

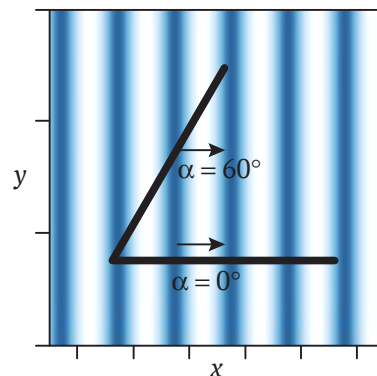


Рис. 5. Изменение видимого периода при разных углах подхода волны

Для участка прямого волокна и произвольного угла падения волны α зависимость АЧХ от угла падения может быть найдена как произведение амплитудной характеристики (7) и диаграммы направленности, с учетом видимой частоты вместо действительной (8):

$$A_L(\alpha, f) = A_0 \frac{V}{2\pi f_a} \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi L f_a}{V}\right) \right) D(\alpha). \quad (9)$$

Изображение данной зависимости для продольных и поперечных волн при $L = 10$ м, $V_p = 2500$ м/с, $V_s = 1500$ м/с представлено на рис. 6. На изображении обращают на себя внимание участки режекции в виде «улыбок» и малая чувствительность при углах, близких к 90° .

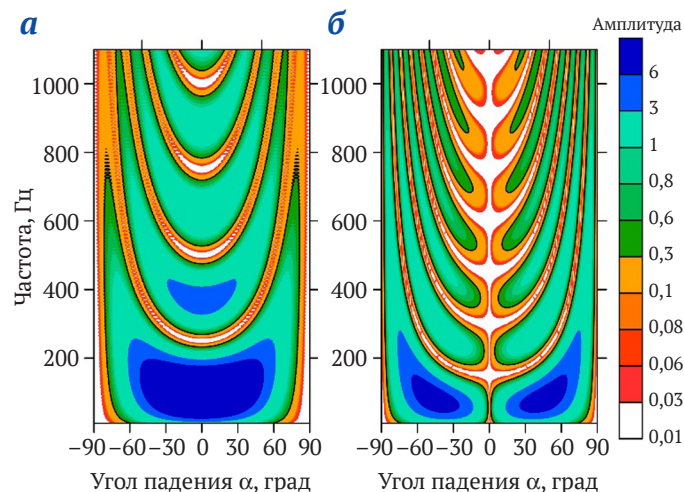


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика участка прямого волокна при различных углах падения упругой волны для P (а) и S (б) волн

Амплитудно-частотный отклик спирального волокна

Далее рассмотрим кабель радиуса r со спиральным уложением волокна, на который волна падает под углом α . Угол падения волны на отдельные малые участки равен $\alpha + \varphi(z)$ (рис. 7), где $\varphi(z)$ можно найти через производную функции, описывающей спиральное волокно в плоскости (z, x) :

$$x(z) = r \sin\left(z \operatorname{tg} \frac{\theta}{r}\right), \quad (10)$$

откуда

$$\varphi(z) = \arctg\left(\operatorname{tg} \theta \cos\left(z \operatorname{tg} \frac{\theta}{r}\right)\right). \quad (11)$$

Функция $\varphi(z)$ принимает значения от $-\theta$ до θ , и при условии, что длина волны намного больше шага между витками в кабеле, отклик будет равен сумме

$$A_H(f, \theta, \alpha) = \sum_{\varphi=-\theta}^{\theta} A_L(f, \alpha + \varphi(z)) \Delta L(\varphi)/L, \quad (12)$$

где множитель $\Delta L(\varphi)/L$ выполняет роль весового коэффициента, зависящего от доли участков с фиксированным значением угла φ в общей длине волокна. Распределение углов можно найти путем вычисления производной функции $z(x) = r \operatorname{ctg} \theta \arcsin(x/r)$:

$$\frac{dz}{dx} = \frac{\operatorname{ctg} \theta}{\sqrt{1 - \left(\frac{x}{r}\right)^2}}, \quad (13)$$

для которой $x \in [-r, r]$ и углы меняются от $-\theta$ до θ . Пример распределения φ для угла намотки 45° приведен на рис. 8.

Для продольных волн по формуле (12) получены амплитудно-частотные характеристики для различных углов намотки волокна в кабеле (рис. 9). С увеличением угла намотки полосы режекции размываются,

в результате отклик становится более равномерным по углам падения. По частотам присутствуют провалы чувствительности, хотя и менее выраженные, чем для прямого волокна, что оставляет возможности для отбеливания спектра.

Важным случаем здесь является угол падения волны 90° , отклик при котором вынесен отдельно на рис. 10. Из графиков видно, что есть полосы частот, в которых происходит увеличение амплитуды сигнала при увеличении угла намотки, и полосы, где усиление не происходит.

С увеличением угла намотки эффективная база приема уменьшается в соответствии с формулой (1), что, в свою очередь, приводит к увеличению частоты первого минимума в суммарном частотном отклике. Данный факт позволяет при суммировании сигналов с прямого и спирального волокна получить более равномерную частотную характеристику в большом диапазоне углов падения волны на кабель (рис. 11), за исключением углов падения, близких 90° , где АЧХ зависит только от спирального волокна.

Радиус изгиба волокна в спиральном кабеле

Стандартное телекоммуникационное волокно имеет определенную линейку типоразмеров и маркировок, при этом одной из основных характеристик является зависимость коэффициента затухания сигнала от радиуса изгиба волокна.

Радиус изгиба определяется в плоскости, в которой он максимален. При равномерной спиральной намотке радиус кривизны постоянный и совпадает с радиусом минимальной кривизны эллипса, образуемого при сечении кабеля плоскостью под тем же углом, что и угол намотки (рис. 12). Таким образом, эффективный радиус кривизны волокна будет зависеть от радиуса заложения волокна в кабеле r и угла намотки θ :

$$R_e = \frac{r}{\sin^2 \theta}. \quad (14)$$

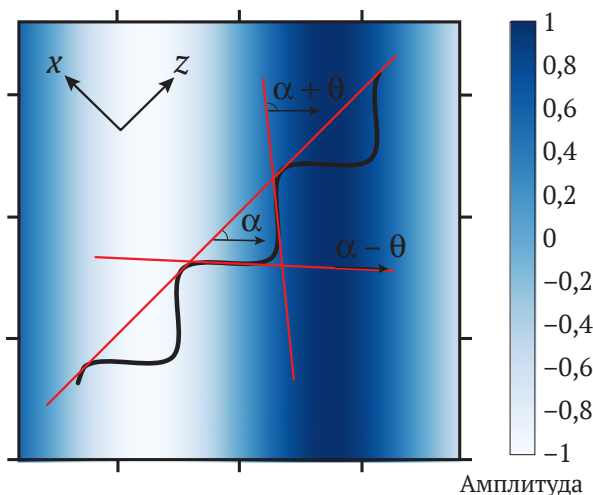


Рис. 7. Спиральное волокно в поле плоской упругой монохроматической волны

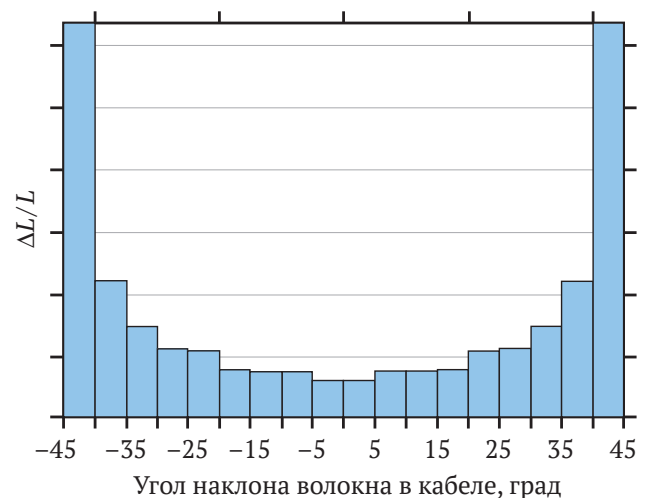


Рис. 8. Распределение углов наклона волокна относительно оси кабеля при спиральной намотке 45°

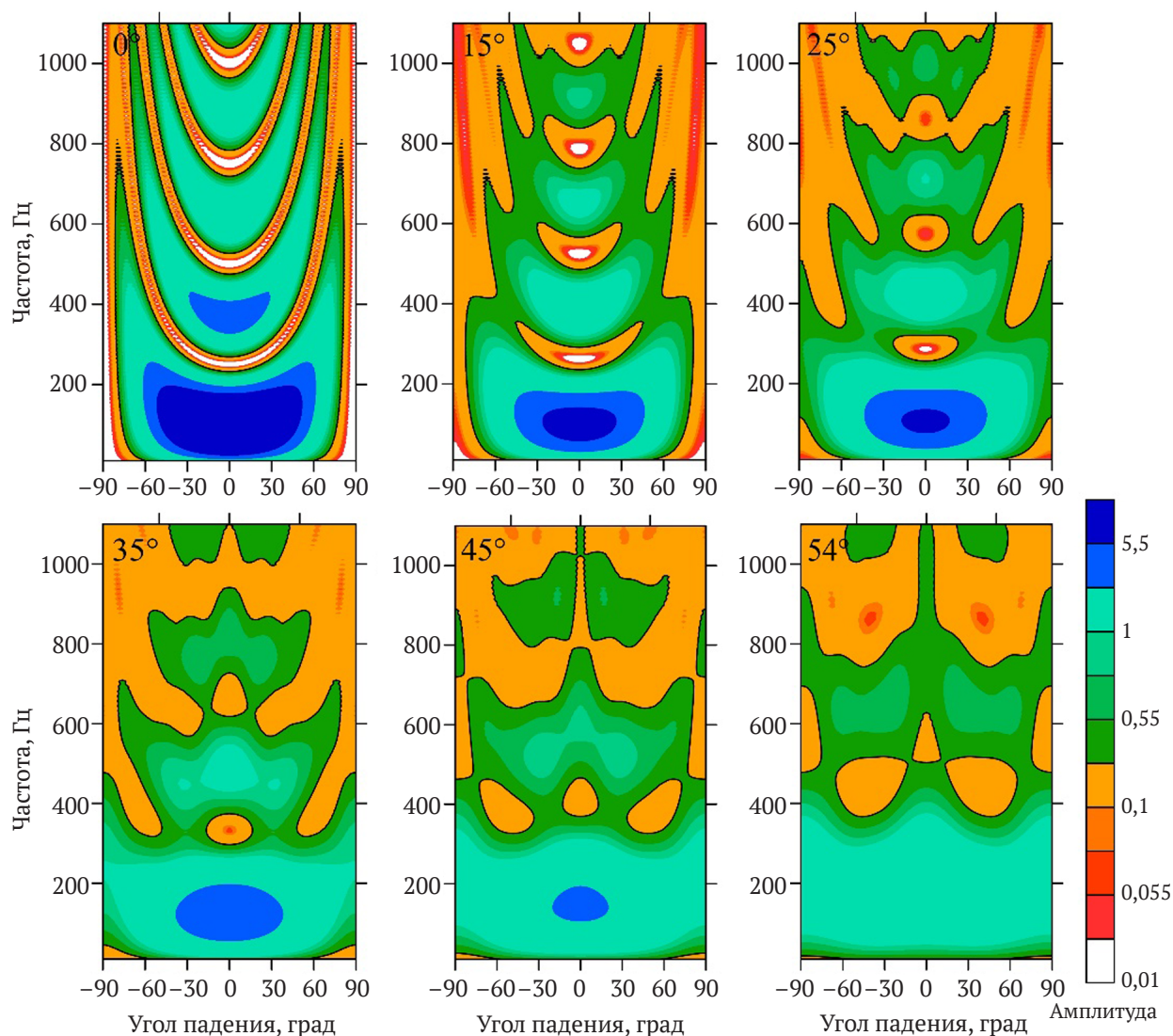


Рис. 9. Амплитудно-частотные характеристики кабеля для различных углов намотки волокна

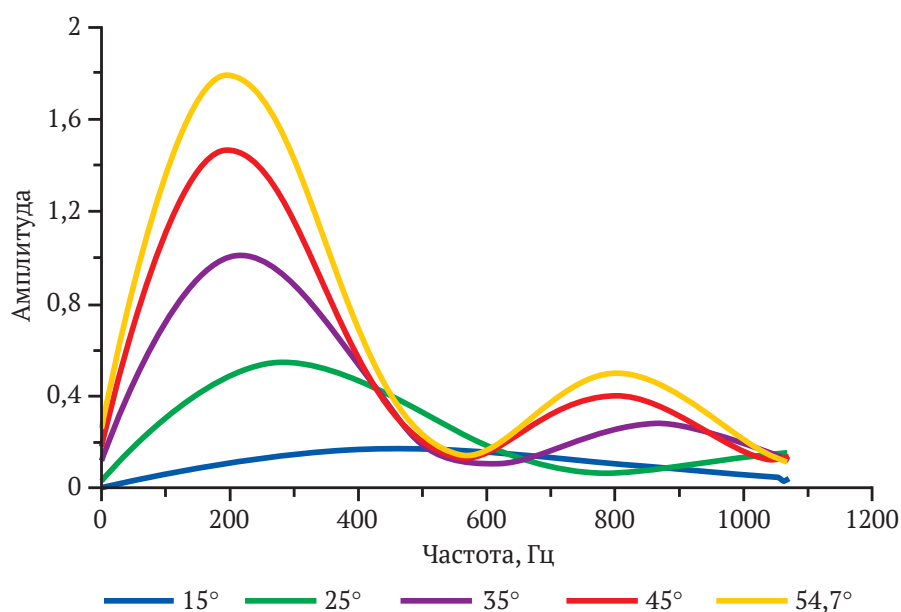


Рис. 10. Поперечная чувствительность кабеля со спиральным уложением волокна при различных углах намотки

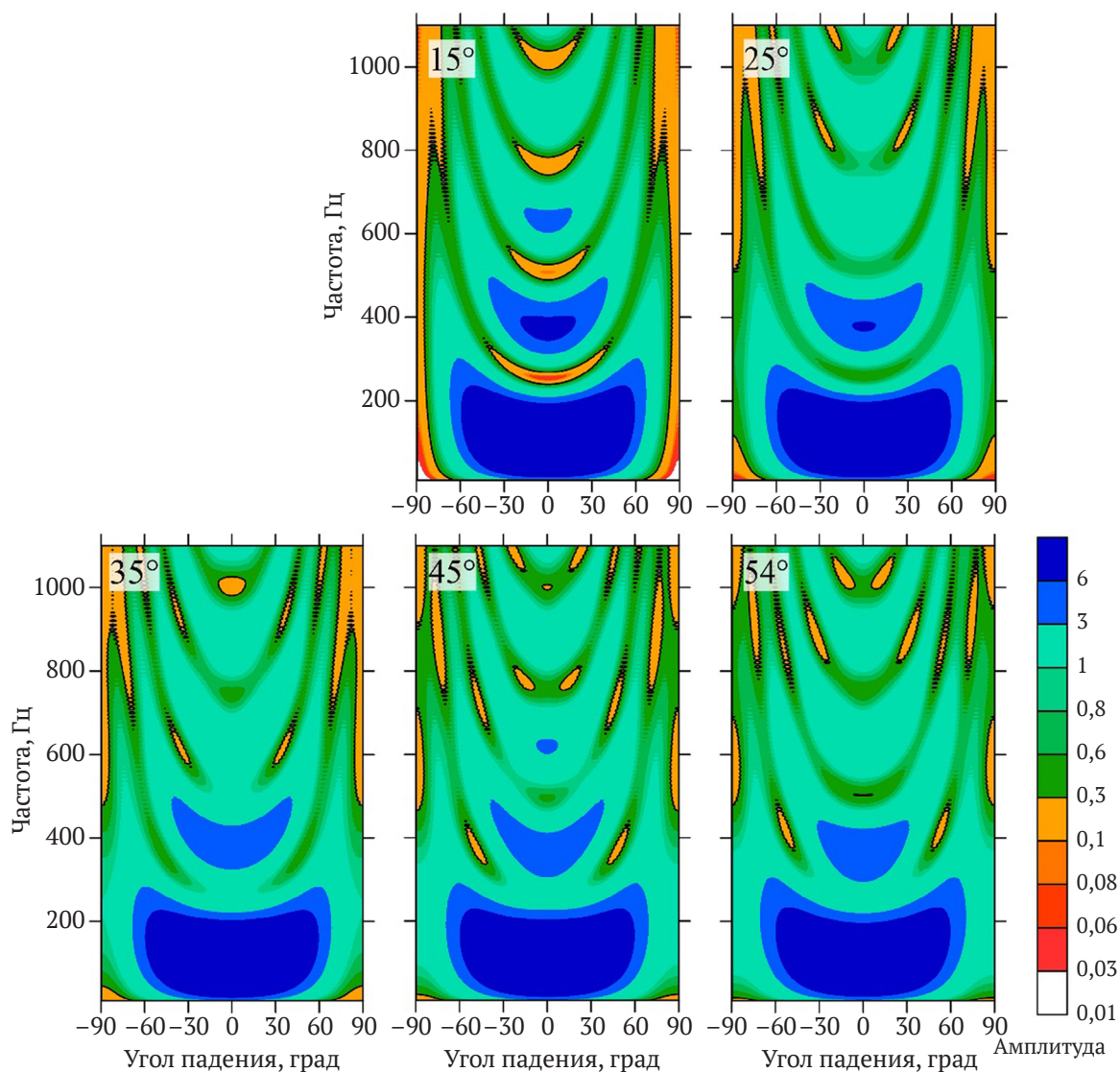


Рис. 11. Амплитудно-частотные характеристики суммарного сигнала с прямого и спирального волокна с различными углами намотки

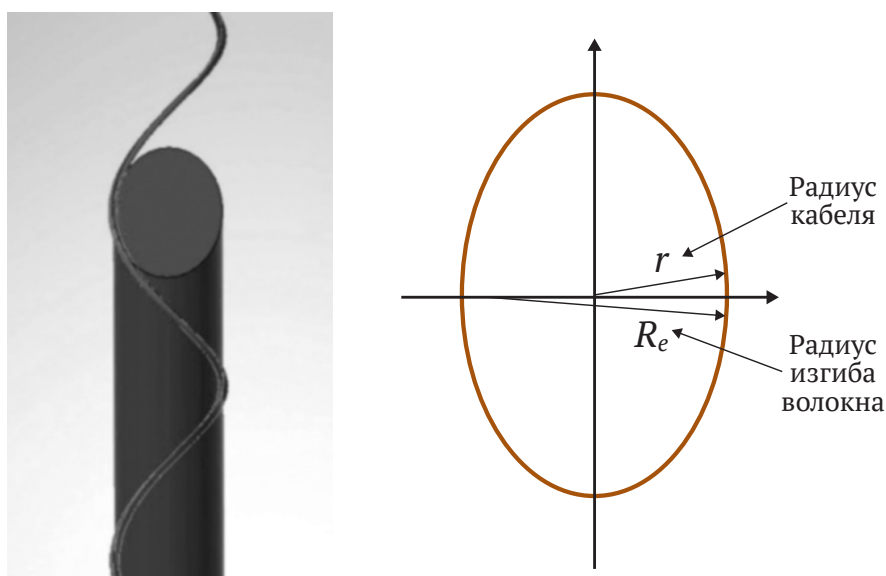


Рис. 12. Схема определения эффективного радиуса изгиба волокна



Принимая R_e в качестве фиксированного значения, определяемого выбранным типом волокна, можно получить зависимость радиуса кабеля от угла намотки θ : $r = R_e \sin^2 \theta$. Масса такого кабеля будет пропорциональна $\sin^4 \theta$.

Для волокна стандарта G657.A2 радиус изгиба, при котором не возникает потерь на значительном количестве витков, составляет 30 мм. Исходя из такого значения радиуса и угла намотки 45° спроектирован кабель, содержащий одновременно прямое и спиральное волокно. Внешний диаметр кабеля составляет 32,6 мм, масса 721 кг/км. Такой кабель может быть использован как для поверхностных сейсмических измерений, так и для скважинных.

Заключение

Анализ физико-геометрических процессов регистрации акустических сигналов распределенной оптоволоконной системой позволил получить пространственно-временные характеристики таких систем для прямого и спирального уложения волокна в кабеле.

Амплитудно-частотные характеристики сигналов, регистрируемых спирально закрученным волокном, зависят от нескольких ключевых факторов: интегрирования измеряемого значения вдоль волокна на базе измерения, угла падения волны на кабель и угла намотки волокна в кабеле. Удалось показать, что увеличение угла намотки повышает равномерность амплитудно-частотной характеристики продольных волн как по частотам, так и по углам падения.

В то же время спиральная намотка меняет эффективную базу измерения сигнала, что позволяет путем суммирования сигналов прямого и спирального волокна за счет перекрытия спектров выполнять регистрацию частот, подавляемых при отдельной регистрации.

По результатам исследования предложена конструкция кабеля для регистрации широкополосных сейсмоакустических сигналов, с помощью которых можно выполнять сейсморазведочные исследования как в скважинах, так и на поверхности, и решать обширный круг горнотехнических и инженерных задач.

Список литературы / References

1. Mateeva A., Mestayer J., Cox B. et al. Advances in distributed acoustic sensing (DAS) for VSP. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2012*. Society of Exploration Geophysicists; 2012. <https://doi.org/10.1190/segam2012-0739.1>
2. Parker T., Shatalin S., Farhadiroushan M. Distributed Acoustic Sensing – a new tool for seismic applications. *First Break*. 2014;32(2):61–69. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2013034>
3. Wu X., Willis M.E., Palacios W. et al. Compressional- and shear-wave studies of distributed acoustic sensing acquired vertical seismic profile data. *The Leading Edge*. 2017;36(12):987–993. <https://doi.org/10.1190/tle36120987.1>
4. Hartog A., Kotov O.I., Liokumovich L.B. The optics of distributed vibration sensing. In: *Second EAGE Workshop on Permanent Reservoir Monitoring 2013 – Current and Future Trends*. Netherlands: EAGE Publications BV; 2013. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20131301>
5. Shatalin S.V., Treschikov V.N., Rogers A.J. Interferometric optical time-domain reflectometry for distributed optical-fiber sensing. *Applied Optics*. 1998;37(24):5600–5604. <https://doi.org/10.1364/AO.37.005600>
6. Dean T., Papp B., Hartog A. Wavenumber response of data recorded using distributed fibre-optic systems. In: *3rd EAGE Workshop on Borehole Geophysics*. Netherlands: EAGE Publications BV; 2015. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201412215>
7. Dean T., Cuny T., Hartog A. H. The effect of gauge length on axially incident P-waves measured using fibre optic distributed vibration sensing: Gauge length effect on incident P-waves. *Geophysical Prospecting*. 2017;65(1):184–193. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12419>
8. Bona A., Dean T., Correa J. et al. Amplitude and phase response of DAS receivers. In: *79th EAGE Conference and Exhibition 2017*. Netherlands: EAGE Publications BV; 2017. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201701200>
9. Stork A.L., Baird A.F., Horne S.A. et al. Application of machine learning to microseismic event detection in distributed acoustic sensing data. *Geophysics*. 2020;85(5):KS149–KS160. <https://doi.org/10.1190/geo2019-0774.1>
10. Näsholm S.P., Iranpour K., Wuestefeld A. et al. Array signal processing on distributed acoustic sensing data: Directivity effects in slowness space. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2022;127(2). <https://doi.org/10.1029/2021JB023587>
11. Willis M.E., Barfoot D., Ellmauthaler A., Wu X. et al. Quantitative quality of distributed acoustic sensing vertical seismic profile data. *The Leading Edge*. 2016;35(7):605–609. <https://doi.org/10.1190/tle35070605.1>
12. Судакова М.С., Белов М.В., Понимаскин А.О. и др. Особенности обработки данных вертикального сейсмического профилирования морских малоуглубинных скважин с волоконно-оптическими распределенными системами. *Геофизика*. 2021;(6):110–118.
13. Sudakova M.S., Belov M.V., Ponimaskin A.O. et al. Features of processing vertical seismic profiling data of offshore shallow wells with fiber-optic distributed systems. *Journal of Geophysics*. 2021;(6):110–118. (In Russ.)
14. Riedel M., Cosma C., Enescu N. et al. Underground Vertical Seismic Profiling with conventional and fiber-optic systems for exploration in the Kylylahti polymetallic mine, eastern Finland. *Minerals (Basel)*. 2018;8(11):538. <https://doi.org/10.3390/min8110538>



14. Bellefleur G., Schetselaar E., Wade D. et al. Vertical seismic profiling using distributed acoustic sensing with scatter-enhanced fibre-optic cable at the Cu–Au New Afton porphyry deposit, British Columbia, Canada. *Geophysical Prospecting*. 2020;68(1):313–333. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12828>
15. Yaroslavl'tsev A. G., Fatkin K. B. Mine seismic surveys for the control of safety pillars in potash mines. In: *Engineering and Mining Geophysics 2020*. European Association of Geoscientists & Engineers; 2020. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202051043>
16. Санфиров И.А., Ярославцев А.Г., Чугаев А.В. и др. Контроль формирования ледопородного ограждения шахтного ствола комплексом наземных и скважинных сейсморазведочных методов. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2020;(3):34–46. <https://doi.org/10.15372/FTRPI20200304>
- Sanfirov I. A., Yaroslavl'tsev A. G., Chugaev A. V. et al. Frozen wall construction control in mine shafts using land and borehole seismology techniques. *Journal of Mining Science*. 2020;56(3):359–369. <https://doi.org/10.1134/S1062739120036641>
17. Chugaev A. V., Sanfirov I. A., Lisin V. P. et al. The integrated borehole seismic surveys at the verkhnekamskoye potassium salt deposit. In: *Lecture Notes in Networks and Systems*. Vol. 342. Cham: Springer International Publishing; 2022. Pp. 255–269. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89477-1_25
18. Correa J., Egorov A., Tertyshnikov K. et al. Analysis of signal to noise and directivity characteristics of DAS VSP at near and far offsets – A CO2CRC Otway Project data example. *The Leading Edge*. 2017;36(12):962–1044. <https://doi.org/10.1190/tle36120994a1.1>
19. Kuvshinov B. N. Interaction of helically wound fibre-optic cables with plane seismic waves. *Geophysical Prospecting*. 2016;64(3):671–688. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12303>
20. den Boer J. J., Mateeva A., Pearce J. G. et al. *Detecting broadside acoustic signals with a fiber optical distributed acoustic sensing (DAS) assembly*. Standard Patent WO2013/090544/A1, 2013. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/6a/52/dc/6513f050b2f66c/AU2012352253C1.pdf>
21. Tertyshnikov K., Bergery G., Freifeld B., Pevzner R. Seasonal effects on DAS using buried helically wound cables. In: *EAGE Workshop on Fiber Optic Sensing for Energy Applications in Asia Pacific*. European Association of Geoscientists & Engineers; 2020. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202070007>
22. Stork A. L., Chalari A., Durucan S. et al. Fibre-optic monitoring for high-temperature Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) projects at geothermal energy sites. *First Break*. 2020;38(10):61–67. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.fb2020075>
23. Baird A. Modelling the response of helically wound DAS cables to microseismic arrivals. In: *First EAGE Workshop on Fibre Optic Sensing*. European Association of Geoscientists & Engineers; 2020. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202030019>
24. Egorov A., Charara M., Alfataierge E., Bakulin A. Realistic modeling of surface seismic and VSP using DAS with straight and shaped fibers of variable gauge length. In: *First International Meeting for Applied Geoscience & Energy Expanded Abstracts*. Tulsa, OK, USA: Society of Exploration Geophysicists; 2021. Pp. 184–193. <https://doi.org/10.1190/segam2021-3576626.1>

Информация об авторах

Александр Валентинович Чугаев – кандидат технических наук, заведующий сектором малоуглубинных скважинных исследований отдела активной сейсмоакустики, Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-7494-4042](https://orcid.org/0000-0002-7494-4042), Scopus ID [6602559950](https://orcid.org/6602559950); e-mail chugaev@mi-perm.ru

Михаил Викторович Тарантин – кандидат технических наук, научный сотрудник отдела активной сейсмоакустики, Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Российская Федерация; Scopus ID [36601605800](https://orcid.org/36601605800); e-mail muxaul20@rambler.ru

Information about the authors

Alexander V. Chugaev – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Sector of Shallow Well Research of the Department of Active Seismic Acoustics, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; ORCID [0000-0002-7494-4042](https://orcid.org/0000-0002-7494-4042), Scopus ID [6602559950](https://orcid.org/6602559950); e-mail chugaev@mi-perm.ru

Mikhail V. Tarantin – Cand. Sci. (Eng.), Researcher, Department of Active Seismic Acoustics; Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; Scopus ID [36601605800](https://orcid.org/36601605800); e-mail muxaul20@rambler.ru

Поступила в редакцию 04.06.2022
Поступила после рецензирования 01.09.2022
Принята к публикации 13.12.2022

Received 04.06.2022
Revised 01.09.2022
Accepted 13.12.2022



СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-12-36>

УДК 550.834

**Влияние амплитуды деформации и всестороннего давления на скорость и затухание P - и S -волн в сухом и водонасыщенном песчанике: экспериментальное исследование**

Э. И. Машинский

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация MashinskiiEI@ipgg.sbras.ru**Аннотация**

В физике горных пород большое внимание уделяется изучению процессов деформирования природных материалов на малых деформациях. Эксперименты проводятся с помощью высокоточных измерений, которые позволяют получить новые знания на микро/нано уровне. Микропластичность твердых тел изучают в материаловедении, но имеются также данные, полученные для некоторых горных пород. Свойство микро-пластичности природных материалов пока мало изучено. Исследование проводилось на образцах пород. Изучено влияние амплитуды деформации и всестороннего давления на скорость и затухание P - и S -волн в сухом и водонасыщенном песчанике. Использовался метод отраженных волн в диапазоне частот (0,5–1,4) МГц при четырех амплитудах деформации $(0,5–1,67) \cdot 10^{-6}$. Циклическое изменение амплитуды вызывает эффект открытого и закрытого гистерезиса для скорости волны и затухания. Это наблюдается как для сухого, так и водонасыщенного состояния песчаника. В обоих состояниях имеет место перехлест петель гистерезиса. Амплитудное изменение скорости P -волны в сухом песчанике составляет 1,12 %, а для затухания P -волны в сухом песчанике – 5,43 %. На S -волне максимальное затухание в сухом песчанике достигает 8,81 %. Поведение скорости и затухания волны можно объяснить совместным действием процессов вязко-упругости и микро-пластичности. Упругопластический переход сильно зависит от деталей микроструктуры, ее дефектности и других параметров. Характеристики осложнений параметров волн могут являться признаками внутреннего строения исследуемого объекта.

Ключевые слова

физика горных пород, амплитудно-зависимые скорость волны и затухание, открытый гистерезис скорости и затухания волны, влияние водонасыщения на скорость волны и затухание, микропластическая деформация, скачкообразная неупругость, упругий модуль

Благодарности

Работа выполнялась в рамках проекта НИР «Механизмы воздействия природных и техногенных факторов на процессы в геосферах по результатам мониторинга естественных геофизических полей». Номер проекта в ИСГЗ Минобрнауки FWZZ-2022-0019.

Для цитирования

Mashinskii E. I. Effect of strain amplitude and confining pressure on the velocity and attenuation of P and S waves in dry and water-saturated sandstone: an experimental study. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):22–29. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-12-36>

MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research paper

Effect of strain amplitude and confining pressure on the velocity and attenuation of P and S waves in dry and water-saturated sandstone: an experimental study

E. I. Mashinskii

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation MashinskiiEI@ipgg.sbras.ru**Abstract**

In rock physics, much attention has been paid to the study of the processes of strain of natural materials at small strains. Experiments using high-precision measurements have allowed new knowledge at micro/nano level to be acquired. The microplasticity of solids is studied in materials science, but there is



also data regarding some rocks. The property of microplasticity of natural materials is still little studied. The study was carried out on rock samples. The effect of strain amplitude and confining pressure on the velocity and attenuation of P and S waves in dry and water-saturated sandstone has been studied. The method of reflected waves was used in the frequency range of 0.5–1.4 MHz at four strain amplitudes $(0.5–1.67) \cdot 10^{-6}$. Amplitude cycling causes an open and closed hysteresis effect for wave velocity and attenuation. This has been observed for both dry and water-saturated sandstone. The hysteresis loop overlaps in both states. The amplitude changes in the velocity of P -wave in dry sandstone is 1.12 %, and the attenuation of P -wave in dry sandstone is 5.43 %. As for S -wave, its maximum attenuation in dry sandstone reaches 8.81 %. The behavior of a wave velocity and attenuation can be explained by the combined effect of viscoelasticity and microplasticity. Elastoplastic transition strongly depends on the details of the microstructure, its defectiveness, and other parameters. The characteristics of the complications of wave parameters can be the signs of the internal structure of the subject.

Keywords

rock physics, amplitude-dependent wave velocity and attenuation, open hysteresis of wave velocity and attenuation, effect of water saturation on wave velocity and attenuation, microplastic strain, stepwise inelasticity, elastic modulus

Acknowledgments

The study was carried out within the framework of the research project “Mechanisms of the impact of natural and man-made factors on processes in the geospheres based on the results of monitoring natural geophysical fields”. Project number FWZZ-2022-0019 in the ISGZ of Ministry of Education and Science.

For citation

Mashinskii E. I. Effect of strain amplitude and confining pressure on the velocity and attenuation of P and S waves in dry and water-saturated sandstone: an experimental study. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):22–29. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-12-36>

Введение и постановка проблемы

В современном развитии наук о Земле повышение геологической эффективности сейсмических и акустических методов опирается на новые фундаментальные знания в физике деформирования горных пород. О механизме деформации природных материалов при различных нагрузках получены новые знания. Это неупругие скачкообразные, прерывистые деформации, регистрируемые на микро/нано уровне. Малоизвестное в геофизике свойство микропластичности горных пород может проявляться при малых и даже очень малых деформациях. Учет этого фактора важен для практики, так как сейсмические и акустические методы используют диапазон малых деформаций. Интерес к этому эффекту проявился в результате предыдущих исследований. Изучение нелинейности в сейсмике привело к необходимости глубокого понимания физики деформирования пород [1–3]. Была подтверждена возможность нелинейности при очень малых деформациях, что расширило границы действия неупругих процессов [4, 5]. Теоретические исследования в сейсмике совершенствуют классическую вязкоупругую модель стандартного тела. Модель хорошо описывает дисперсию, релаксацию и связанные с нею неупругие процессы.

Теоретические и эксперименты исследования подтверждают наличие эффекта микропластичности [6, 7]. Влияние амплитуды деформации на скорость волны и затухание неоднозначно, так как приводит в одном случае к увеличению параметров, в другом – к уменьшению. Таким же образом изменяется модуль упругости, что влияет на кривизну соотношения «напряжение–деформация» [8, 9]. Такое нестандартное поведение пород обусловлено совместным действием упругой и микропластической деформации [10, 11].

На диаграмме «напряжение–деформация» и на записи акустического сигнала этот эффект представлен в виде «стресс-плато» и «стресс-падение» [12, 13]. Свойство микро-пластичности пород допускает нерегулярное кратковременное «включение» процесса пластичности с одновременным действием упругой деформации. Имеются также теоретические подтверждения [14–16]. Механические свойства горных пород в большей степени различаются по их неупругим характеристикам. Они больше связаны с динамическими параметрами волн, чем с упругими характеристиками. Современный подход предполагает использование новых данных, которые могут быть использованы для решения геологических задач. Это подтверждают высокоточные экспериментальные и теоретические исследования [17, 18].

Исследования в физике твердого тела показали, что вязкоупругая модель может быть дополнена неупругим элементом прерывистого характера, участвующим в процессе деформирования. Упруго-вязкопластическая модель с участием пластической составляющей способна представлять амплитудно-частотно-зависимый динамический модуль. В этой модели общий тензор напряжения определен суммой трех компонент – упругого, упругопластического и вязкоупругого модулей материала [19–21]. В физике твердого тела и материаловедении большое внимание уделяется исследованию скачкообразной деформации [22–24]. Имеет место резкий переход от упругого деформирования к пластическому течению. Такой скачок деформации сопровождается падением напряжения и сложным образом зависит от свойств материала и условий его нагружения [25, 26]. Развитие механической модели геологической среды базируется на учете данных, полученных о прерывистой неупругости. Некоторые



данные для горных пород (песчаник, суглинки, кварц, кремний, мусковит, стишовит, слюда, сапфир, диорит, графит) описаны в работах [27, 28].

В этой статье описывается лабораторное исследование влияния амплитуды деформации и давления на поведение скорости и затухания продольной и поперечной волны в сухом и водонасыщенном песчанике при комнатной температуре. Это исследование представляет большой интерес для понимания микро-деформационных механизмов в горных породах. Механизм микропластичности горных пород пока мало изучен, но есть основания утверждать, что он близок к механизму, известному в физике твердого тела. Микропластическое поведение происходит при активизации подвижных дислокаций в виде лавинного явления. Первым признаком этого процесса является появление эффекта «стресс-плато» и «стресс-падение». Результаты, полученные в этом эксперименте, могут быть полезны не только как фундаментальные знания, но также для их применения в решении практических задач. Новые знания о свойстве микро-пластичности горных пород позволяют усовершенствовать стандартную вязкоупругую модель, используемую в сейсмических исследованиях. Это может быть достигнуто включением в стандартную модель компоненту микропластической деформации. Комплексная вязко-упруго-пластическая модель может более реалистично описывать процессы деформации в горных породах. При практическом применении полученных знаний, например, в сейсмике и акустике необходимо учитывать амплитудно-зависимый эффект, который влияет на скорость и затухание продольных и поперечных волн в горных породах. Учет этого эффекта повышает точность измерения и интерпретацию полученных данных.

Методики исследования и фактический материал

В эксперименте были использованы образцы мелкозернистого песчаника из керна, взятого с глубины 2545 м. Плотность песчаника 2,45 г/см³, содержание мелкозернистой песчаной фракции 82 % и алевролита 18 %, общая пористость 12 %. Измерение скорости и затухания *P*-, *S*-волны в зависимости от величины амплитуды деформации проводилось при постоянном гидростатическом давлении 20 МПа. Кроме того, на постоянной амплитуде было изучено поведение скорости *P*-, *S*-волны в зависимости от величины гидростатического давления в диапазоне от 10 до 50 МПа. Образцы цилиндрической формы имеют размеры: 40 мм в диаметре и 16 мм в длину. Использовалась стандартная установка в виде трехслойной модели [29, 30]. Первый и третий слои (бериллиевая бронза) обеспечивают идентичное отражение волны на границах раздела. Первый слой – линия задержки, а третий слой – акустическая нагрузка. Образец породы располагается между этими слоями. Возбуждение и прием акустических сигналов обеспечивают пьезокерамические датчики на частоте 1 МГц, которые поляризованы на продольную и поперечную волны. Декремент затухания вычислялся как [11, 31, 32]:

$$Q^{-1} = \frac{\alpha V}{8,686\pi f} = \frac{\alpha \lambda}{8,686\pi}, \quad (1)$$

где α – коэффициент поглощения, дБ · м⁻¹,

$$\alpha(\omega) = \frac{8,686}{L} \ln \left[\frac{R_{23} |A_{top}(f)|}{R_{12} |A_{bot}(f)|} (1 - R_{12}^2(f)) \right], \quad (2)$$

где L – двойная длина образца, м; $A_{top}(f)$ – амплитуда Фурье отраженного импульса от верхней границы образца; $A_{bot}(f)$ – амплитуда Фурье отраженного импульса от нижней границы образца; $R_{12}(f)$ – коэффициент отражения от верхней границы; $R_{23}(f)$ – коэффициент отражения от нижней границы. В нашем случае границы являются идентичными и поэтому $R_{12}(f) = -R_{23}(f)$. Коэффициент отражения

$$R(f) = \frac{\rho_r V_r(f) - \rho_b V_b(f)}{\rho_r V_r(f) + \rho_b V_b(f)}, \quad (3)$$

где ρ_r и ρ_b – плотность породы и бериллиевой бронзы, кг · м⁻³, соответственно; $V_r(f)$ и $V_b(f)$ – скорости волны, м · с⁻¹; V – фазовая скорость, м · с⁻¹; f – частота, Гц.

При измерении скорости волны и затухания изменение величины амплитуды деформации происходило по замкнутому циклу. Сначала амплитуда возрастала от минимальной до максимальной величины (восходящий курс), затем по тем же величинам уменьшалась (нисходящий курс). Полный курс: $\varepsilon_1 \approx 0,5 \times 10^{-6} \rightarrow \varepsilon_2 \approx 1,0 \times 10^{-6} \rightarrow \varepsilon_3 \approx 1,3 \times 10^{-6} \rightarrow \varepsilon_4 \approx 1,67 \times 10^{-6} \rightarrow \varepsilon_3 \approx 1,3 \times 10^{-6} \rightarrow \varepsilon_2 \approx 1,0 \times 10^{-6} \rightarrow \varepsilon_1 \approx 0,5 \times 10^{-6}$. Увеличение и последующее уменьшение амплитуды на всех рисунках помечено стрелками. Регистрация импульсов проводилась с накоплением сигналов. Это обеспечивает повышенную помехоустойчивость.

Результаты исследований

На рис. 1 и 2 представлена зависимость скорости *P*- и *S*-волны от амплитуды деформации в сухом и водонасыщенном (50 %) песчанике на постоянном давлении 20 МПа. На рис. 1 в сухом песчанике на восходящем и нисходящем курсе амплитуды деформации скорость *P*-волны возрастает на 1,12 %. В водонасыщенном песчанике изменение скорости волны при тех же условиях составляет 0,28 %. Диаграммы скоростей представляют незамкнутые петли гистерезиса (помечены скобками). Открытый гистерезис сухого и насыщенного песчаника составляет соответственно 1,41 и 0,28 %. Изменение скорости *S*-волны при тех же условиях измерения не превышало 0,35 %. Незамкнутая часть петли гистерезиса для сухого и смоченного песчаника составляет 0,54 и 0,35 % соответственно.

На рис. 3 представлено затухание *P*-волны в зависимости от амплитуды деформации в сухом и водонасыщенном песчанике при постоянном давлении. В сухом песчанике при изменении амплитуды от минимальной до максимальной величины затухание волны нелинейно возрастает на 5,43 %. При возвращении амплитуды к минимальной величине затухание уменьшается до начальной величины. В результате петля гистерезиса затухания является замкнутой. В смоченном песчанике увеличение амплитуды слабо

влияет на затухание. На обратном курсе амплитуды затухание уменьшается на 4,93 %, что приводит к появлению незамкнутой петли гистерезиса. График смоченного песчаника располагается выше графика сухого песчаника.

На рис. 4 показано затухание S -волны в зависимости от амплитуды деформации в сухом и водонасыщенном песчанике при постоянном давлении. Графики сухого и смоченного песчаника существенно удалены друг от друга. Величина затухания волны в сухом песчанике значительно меньше, чем в смоченном. В обоих случаях с увеличением амплитуды затухание уменьшается. В сухом и смоченном песчанике уменьшение затухания составляет 8,81 и 2,71 % соответственно. Обе петли гистерезиса незамкнутые. Величина открытой петли гистерезиса в обоих случаях не превышает 0,8 %.

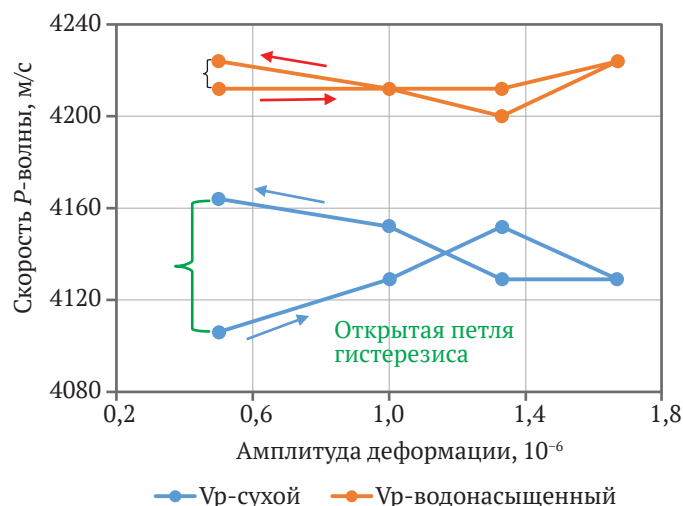


Рис. 1. Скорость P -волны в зависимости от амплитуды деформации в сухом и водонасыщенном песчанике

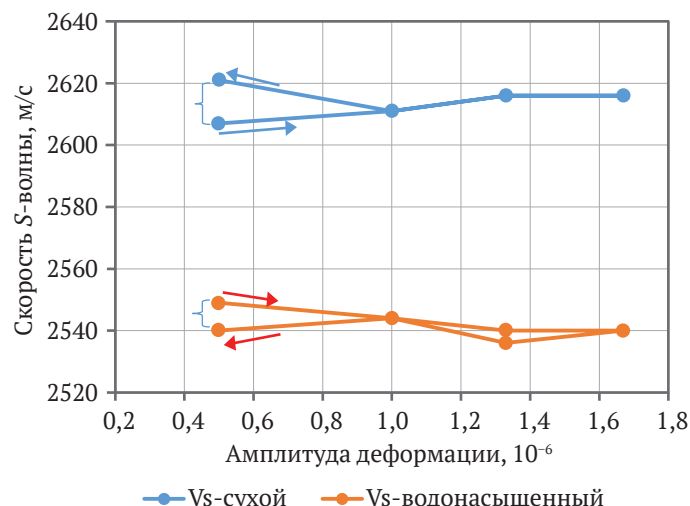


Рис. 2. Скорость S -волны в зависимости от амплитуды деформации в сухом и водонасыщенном песчанике

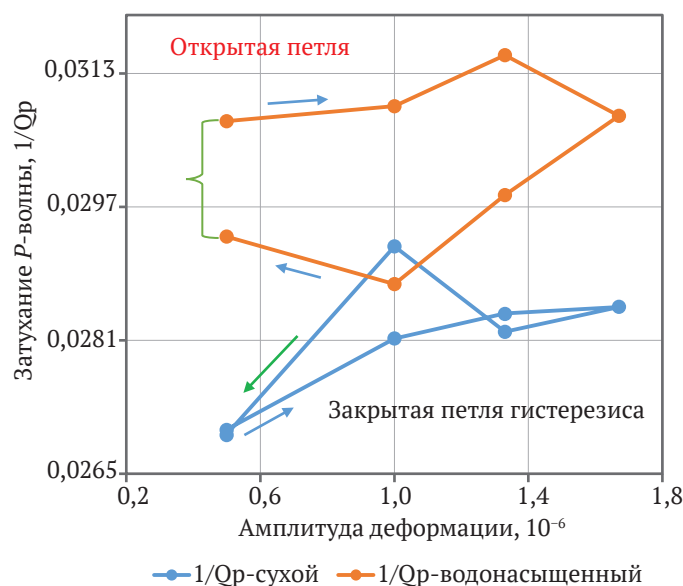


Рис. 3. Затухание P -волны в зависимости от амплитуды деформации в сухом и водонасыщенном песчанике

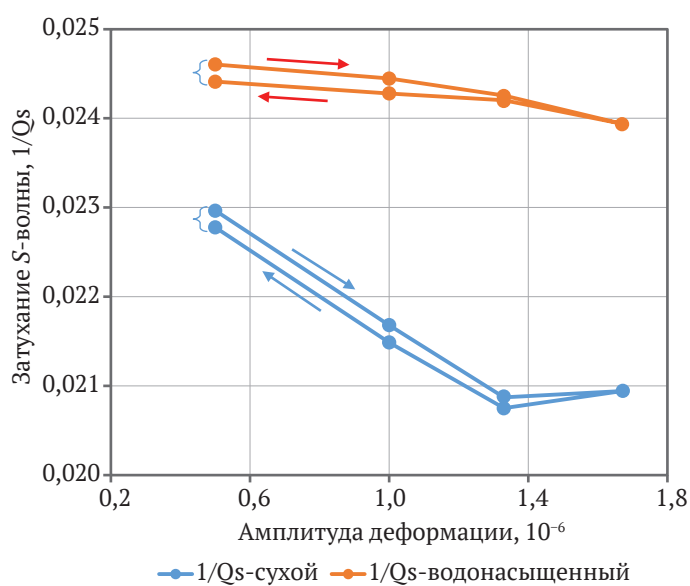


Рис. 4. Затухание S -волны в зависимости от амплитуды деформации в сухом и водонасыщенном песчанике

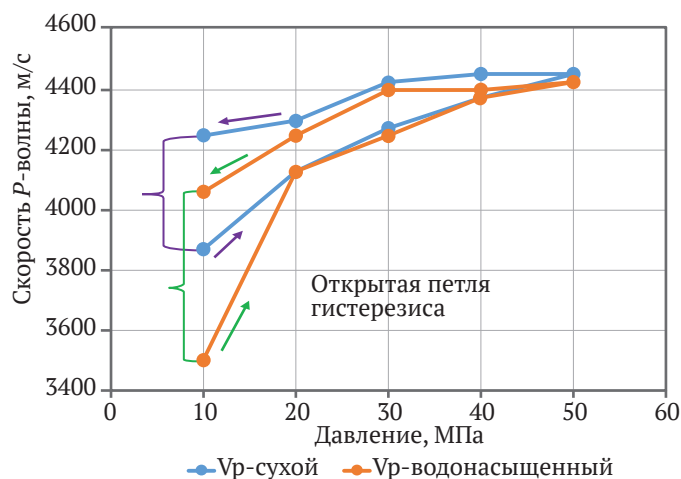


Рис. 5. Скорость P -волны в зависимости от всестороннего давления в сухом и водонасыщенном песчанике

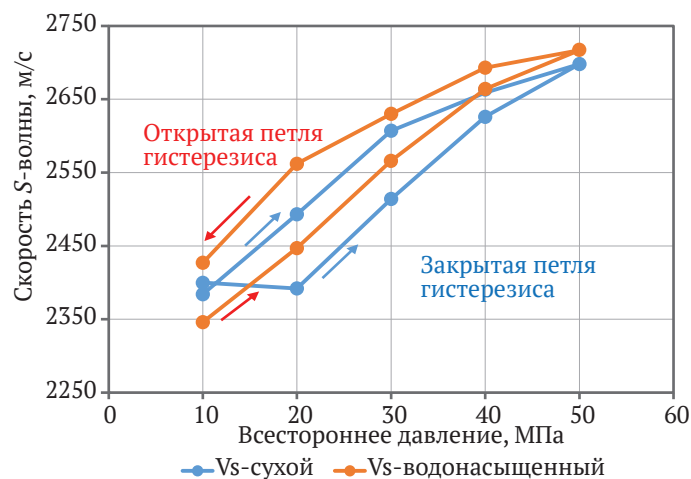


Рис. 6. Скорость S -волны в зависимости от всестороннего давления в сухом и водонасыщенном песчанике

Обсуждение результатов

Проведенное исследование показывает сложное влияние амплитуды деформации, давления и состояния песчаника на поведение скорости и затухания P - и S -волн. Затухание волны по сравнению со скоростью волны более чувствительно к девиации амплитуды и смоченного состояния песчаника. Поведение скорости продольной волны существенно отличается от поперечной. Измерение скорости P -волны показывает, что смена состояния песчаника влияет на форму гистерезиса и величину его открытия. Открытая часть гистерезиса для продольной волны в сухом песчанике составляет 1,41 %, а в смоченном 0,28 %, т.е. имеется большое различие между ними. Скорость S -волны как в сухом, так и смоченном песчанике, слабо реагирует на девиацию амплитуды.

Наибольшее изменение величины затухания продольной волны за счет амплитуды деформации получено в сухом песчанике (5,43 %) и том же состоянии на поперечной волне (8,81 %). Изменение величины затухания поперечной волны в смоченном песчанике за счет амплитуды достигает 2,71 %. На продольной волне открытый гистерезис зарегистрирован в смоченном песчанике (4,5 %), в сухом он отсутствует. На поперечной волне как в сухом, так и смоченном песчанике проявление открытого гистерезиса незначительно. Изменение всестороннего давления в замкнутом режиме как для продольной, так и поперечной волны приводит к нелинейному возрастанию скорости и появлению незамкнутой петли гистерезиса. Стоит отметить, что скорость продольной и поперечной волн при обоих состояниях песчаника реагирует на изменение величины всестороннего давления.

Заключение

Анализ полученных в эксперименте новых данных показывает сложный характер поведения скорости и затухания продольной и поперечной волн в зависимости от величины амплитуды деформации

и сухо-водного состояния песчаника. Изменение амплитуды деформации и всестороннего давления по замкнутому циклу (то есть ее увеличение и адекватное уменьшение) приводит к существенному изменению динамических характеристик регистрируемого сигнала. Это преобразование имеет место для скорости волны и затухания. Влияние амплитуды деформации на гистерезис открытого и закрытого типа происходит как для скорости волны, так и для затухания. Как в сухом, так и смоченном песчанике в большинстве случаев наблюдается открытая петля гистерезиса. Имеются случаи проявления закрытой петли гистерезиса и также эффект перехлеста петель гистерезиса. Наибольшее изменение скорости волны за счет амплитуды деформации получено для продольной волны в сухом песчанике. Однако параметр затухания превышает достижения скорости волны. Наибольший результат для амплитудно-зависимого затухания получен для сухого песчаника при распространении продольной волны – 5,43 % и при распространении поперечной волны – 8,81 %.

В нашем исследовании к признакам проявления микропластичности можно отнести следующее. Гистерезис открытого и закрытого типа, обнаруженный в амплитудно-зависимой скорости и затухании в сухом и смоченном песчанике. Нелинейный характер и перехлест восходящего и нисходящего курсов амплитуды. Их расхождение может быть вызвано эффектом микропластичности. Сложное и своеобразное поведение обеих петель гистерезиса предполагает возможность участия в процессе деформирования песчаника нестандартного механизма. Многообразное поведение скорости волны и затухания при деформировании горной породы может быть вызвано совместным действием процессов вязко-упругости и микропластичности. Качественные и количественные характеристики осложнений динамических параметров могут являться признаками внутреннего строения исследуемого объекта.



Список литературы

1. Гушин В.В., Павленко О.В. Изучение нелинейно-упругих свойств земных пород по сейсмическим данным. В: *Современная сейсмология. Достижения и проблемы*. Т. 13. М.; 1998.
2. Егоров Г.В. Вариация нелинейных параметров консолидированного пористого водонасыщенного образца в зависимости от степени газонасыщения. *Физическая мезомеханика*. 2007;10(1):107–110.
3. Кондратьев О.К. *Сейсмические волны в поглощающих средах*. М.: Недра; 1986. 176 с.
4. Николаев А.В. *Проблемы нелинейной сейсмологии*. М.: Наука; 1987. 288 с.
5. Diallo M. S., Prasad M., Appel E. Comparison between experimental results and theoretical predictions for P-wave velocity and attenuation at ultrasonic frequency. *Wave Motion*. 2003;37(1):1–16. [https://doi.org/10.1016/S0165-2125\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0165-2125(02)00018-5)
6. Duretz T., Souche A., Borst R., Le Pourhiet L. The benefits of using a consistent tangent operator for viscoelastoplastic computations in geodynamics. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2018;19(12):4904–4924. <https://doi.org/10.1029/2018GC007877>
7. Golovin I.S., Pavlova T.S., Golovina S.B. et al. Effect of severe plastic deformation on internal friction of an Fe–26at.% Al alloy and titanium. *Materials Science and Engineering: A*. 2006;442(1–2):165–169.
8. Guyer R.A., Johnson P.A. Nonlinear mesoscopic elasticity: Evidence for a new class of materials. *Physics Today*. 1999;52(4):30–36. <https://doi.org/10.1063/1.882648>
9. Mashinskii E.I. Difference between static and dynamic elastic moduli of rocks: Physical causes. *Russian Geology and Geophysics*. 2003;44(9):953–959.
10. Derlet P.M., Maaß R. *Micro-plasticity and intermittent dislocation activity in a simplified micro structural model*. arXiv:1205.1486v2. Condensed Matter – Materials Science. 8 February 2013. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1205.1486>
11. Mashinskii E.I. Amplitude-frequency dependencies of wave attenuation in single-crystal quartz: experimental study. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 2008;113(B11). <https://doi.org/10.1029/2008JB005719>
12. Mashinskii E.I. Seismo-micro-plasticity phenomenon in the rocks. *Natural Science*. 2010;2(3):155–159. <https://doi.org/10.4236/ns.2010.23025>
13. Mashinskii E.I. Jump-like inelasticity in sandstone and its effect on the amplitude dependence of P-wave attenuation: An experimental study. *Wave Motion*. 2020;97:102585. <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2020.102585>
14. Huang J., Zhao M., Du X. et al. An elasto-plastic damage model for rocks based on a new nonlinear strength criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2018;51:1413–1429. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1417-1>
15. Vodenitcharova T., Zhang L.C. A new constitutive model for the phase transformations in monocrystalline silicon. *International Journal of Solids and Structures*. 2004;41(18–19):5411–5424. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1417-1>
16. Liu Y., Dai F., Feng P., Xu N.-W. Mechanical behavior of intermittent jointed rocks under random cyclic compression with different loading parameters. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2018;113:12–24. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.05.030>
17. Nourifard N., Lebedev M. Research note: the effect of strain amplitude produced by Ultrasonic waves on its velocity. *Geophysical Prospecting*. 2019;67(4):715–722. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12674>
18. Nourifard N., Mashinskii E., Lebedev M. The effect of wave amplitude on S-wave velocity in porous media: an experimental study by Laser Doppler Interferometry. *Exploration Geophysics*. 2019;50(6):683–691. <https://doi.org/10.1080/08123985.2019.1667228>
19. Baud P., Vajdova V., Wong T. Shear-enhanced compaction and strain localization: Inelastic deformation and constitutive modeling of four porous sandstones. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 2006;111(B12). <https://doi.org/10.1029/2005JB004101>
20. Gurmani S.F., Jahn S., Brasse H., Schilling F.R. Atomic scale view on partially molten rocks: Molecular dynamics simulations of melt-wetted olivine grain boundaries. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 2011;116(B12). <https://doi.org/10.1029/2011JB008519>
21. Olsson A.K., Austrell P.-E. A fitting procedure for viscoelastic-elastoplastic material models. In: *Proceedings of the Second European Conference on Constitutive Models for Rubber*. Hannover, Germany, 10–12 September 2001.
22. Головин Ю.И., Дуб С.Н., Иволгин В.И. и др. Кинетические особенности деформации твердых тел в нано-микрообъемах. *Физика твердого тела*. 2005;47(6):961–973.
23. Песчанская Н.Н., Смирнов Б.И., Шпейзман В.В. Скачкообразная микро-деформация в нано-структурных материалах. *Физика твердого тела*. 2008;50(5):815–819.
24. Zhou C., Biner S.B., LeSar R. Discrete dislocation dynamics simulations of plasticity at small scales. *Acta Materialia*. 2010;58:1565–1577.



25. Luo Sh.-N., Swadener J.G., Ma Ch., Tschauner O. Examining crystallographic orientation dependence of hardness of silica stishovite. *Physica B: Condensed Matter*. 2007;399(2):138–142. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2007.06.011>
26. Yin H., Zhang G. Nanoindentation behavior of muscovite subjected to repeated loading. *Journal of Nanomechanics and Micromechanics*. 2011;1(2):72–83. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)nm.2153-5477.0000033](https://doi.org/10.1061/(asce)nm.2153-5477.0000033)
27. Mashinskii E.I., Dynamic micro-plasticity manifestation in consolidated sandstone in the acoustical frequency range. *Geophysical Prospecting*. 2016;64:1588–1601. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12368>
28. Nishino Y., Kawaguchia R., Tamaoka S., Idea N. Amplitude-dependent internal friction study of fatigue deterioration in carbon fiber reinforced plastic laminates. *Materials Research*. 2018;21(2):e20170858. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0858>
29. Johnston D.H., Toksoz M.N. Thermal cracking and amplitude dependent attenuation. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 1980;85(B2):937–942. <https://doi.org/10.1029/JB085iB02p00937>
30. Jones S.M. Velocity and quality factors of sedimentary rocks at low and high effective pressures. *Geophysical Journal International*. 1995;123(3):774–780. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb06889.x>
31. Mavko G.M. Frictional attenuation: an inherent amplitude dependence. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 1979;84(B9):4769–4775. <https://doi.org/10.1029/JB084iB09p04769>
32. Winkler K.W. Frequency dependent ultrasonic properties of high-porosity sandstones. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 1983;88(B11):9493–9499. <https://doi.org/10.1029/JB088iB11p09493>

References

1. Gushchin V.V., Pavlenko O.V. Study of nonlinear elastic properties of rocks based on seismic data. In: *Modern seismology. Achievements and Challenges*. Vol. 13. Moscow; 1998. (In Russ.)
2. Egorov G.V. Variation of nonlinear parameters of a consolidated water-saturated porous specimen depending on the degree of gas saturation. *Fizicheskaya Mezomekhanika*. 2007;10(1):107–110. (In Russ.)
3. Kondratyev O.K. *Seismic waves in absorbing media*. Moscow: Nedra Publ.; 1986, 176 p. (In Russ.)
4. Nikolaev A.V. *Problems of nonlinear seismic*. Moscow: Nauka Publ.; 1987. 288 p. (In Russ.)
5. Diallo M.S., Prasad M., Appel E. Comparison between experimental results and theoretical predictions for P-wave velocity and attenuation at ultrasonic frequency. *Wave Motion*. 2003;37(1):1–16. [https://doi.org/10.1016/S0165-2125\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0165-2125(02)00018-5)
6. Duretz T., Souche A., Borst R., Le Pourhiet L. The benefits of using a consistent tangent operator for viscoelastoplastic computations in geodynamics. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2018;19(12):4904–4924. <https://doi.org/10.1029/2018GC007877>
7. Golovin I.S., Pavlova T.S., Golovina S.B. et al. Effect of severe plastic deformation on internal friction of an Fe–26at.% Al alloy and titanium. *Materials Science and Engineering: A*. 2006;442(1–2):165–169.
8. Guyer R.A., Johnson P.A. Nonlinear mesoscopic elasticity: Evidence for a new class of materials. *Physics Today*. 1999;52(4):30–36. <https://doi.org/10.1063/1.882648>
9. Mashinskii E.I. Difference between static and dynamic elastic moduli of rocks: Physical causes. *Russian Geology and Geophysics*. 2003;44(9):953–959.
10. Derlet P.M., Maaß R. *Micro-plasticity and intermittent dislocation activity in a simplified micro structural model*. arXiv:1205.1486v2. Condensed Matter – Materials Science. 8 February 2013. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1205.1486>
11. Mashinskii E.I. Amplitude-frequency dependencies of wave attenuation in single-crystal quartz: experimental study. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 2008;113(B11). <https://doi.org/10.1029/2008JB005719>
12. Mashinskii E.I. Seismo-micro-plasticity phenomenon in the rocks. *Natural Science*. 2010;2(3):155–159. <https://doi.org/10.4236/ns.2010.23025>
13. Mashinskii E.I. Jump-like inelasticity in sandstone and its effect on the amplitude dependence of P-wave attenuation: An experimental study. *Wave Motion*. 2020;97:102585. <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2020.102585>
14. Huang J., Zhao M., Du X. et al. An elasto-plastic damage model for rocks based on a new nonlinear strength criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2018;51:1413–1429. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1417-1>
15. Vodenitcharova T., Zhang L.C. A new constitutive model for the phase transformations in mono-crystalline silicon. *International Journal of Solids and Structures*. 2004;41(18–19):5411–5424. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1417-1>
16. Liu Y., Dai F., Feng P., Xu N.-W. Mechanical behavior of intermittent jointed rocks under random cyclic compression with different loading parameters. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2018;113:12–24. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.05.030>
17. Nourifard N., Lebedev M. Research note: the effect of strain amplitude produced by Ultrasonic waves on its velocity. *Geophysical Prospecting*. 2019;67(4):715–722. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12674>



18. Nourifard N., Mashinskii E., Lebedev M. The effect of wave amplitude on S-wave velocity in porous media: an experimental study by Laser Doppler Interferometry. *Exploration Geophysics*. 2019;50(6):683–691. <https://doi.org/10.1080/08123985.2019.1667228>
19. Baud P., Vajdova V., Wong T. Shear-enhanced compaction and strain localization: Inelastic deformation and constitutive modeling of four porous sandstones. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 2006;111(B12). <https://doi.org/10.1029/2005JB004101>
20. Gurmani S.F., Jahn S., Brasse H., Schilling F.R. Atomic scale view on partially molten rocks: Molecular dynamics simulations of melt-wetted olivine grain boundaries. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 2011;116(B12). <https://doi.org/10.1029/2011JB008519>
21. Olsson A.K., Austrell P.-E. A fitting procedure for viscoelastic-elastoplastic material models. In: *Proceedings of the Second European Conference on Constitutive Models for Rubber*. Hannover, Germany, 10–12 September 2001.
22. Golovin Yu.I., Dub S.N., Ivolgin V.I. et al. Kinetic features of strain of solids in nano-microvolumes. *Physics of the Solid State*. 2005;47(6):961–973. (In Russ.)
23. Peschanskaya N.N., Smirnov B.I., Shpeizman V.V. Steplike micro-strain in nano-structural materials. *Physics of the Solid State*. 2008;50(5):815–819.
24. Zhou C., Biner S.B., LeSar R. Discrete dislocation dynamics simulations of plasticity at small scales. *Acta Materialia*. 2010;58:1565–1577.
25. Luo Sh.-N., Swadener J.G., Ma Ch., Tschauner O. Examining crystallographic orientation dependence of hardness of silica stishovite. *Physica B: Condensed Matter*. 2007;399(2):138–142. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2007.06.011>
26. Yin H., Zhang G. Nanoindentation behavior of muscovite subjected to repeated loading. *Journal of Nanomechanics and Micromechanics*. 2011;1(2):72–83. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)nm.2153-5477.0000033](https://doi.org/10.1061/(asce)nm.2153-5477.0000033)
27. Mashinskii E.I., Dynamic micro-plasticity manifestation in consolidated sandstone in the acoustical frequency range. *Geophysical Prospecting*. 2016;64:1588–1601. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12368>
28. Nishino Y., Kawaguchia R., Tamaoka S., Idea N. Amplitude-dependent internal friction study of fatigue deterioration in carbon fiber reinforced plastic laminates. *Materials Research*. 2018;21(2):e20170858. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0858>
29. Johnston D.H., Toksoz M.N. Thermal cracking and amplitude dependent attenuation. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 1980;85(B2):937–942. <https://doi.org/10.1029/JB085iB02p00937>
30. Jones S.M. Velocity and quality factors of sedimentary rocks at low and high effective pressures. *Geophysical Journal International*. 1995;123(3):774–780. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb06889.x>
31. Mavko G.M. Frictional attenuation: an inherent amplitude dependence. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 1979;84(B9):4769–4775. <https://doi.org/10.1029/JB084iB09p04769>
32. Winkler K.W. Frequency dependent ultrasonic properties of high-porosity sandstones. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 1983;88(B11):9493–9499. <https://doi.org/10.1029/JB088iB11p09493>

Информация об авторе

Эдуард Иннокентьевич Машинский – доктор геолого-минералогических наук, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-8621-0719](https://orcid.org/0000-0001-8621-0719), Scopus ID [8886240600](https://scopus.org/8886240600); e-mail MashinskiiEI@ipgg.sbras.ru

Information about the author

Eduard I. Mashinskii – Dr. Sci. (Geol. and Min.), Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation; ORCID [0000-0001-8621-0719](https://orcid.org/0000-0001-8621-0719), Scopus ID [8886240600](https://scopus.org/8886240600); e-mail MashinskiiEI@ipgg.sbras.ru

Поступила в редакцию	01.12.2022	Received	01.12.2022
Поступила после рецензирования	07.02.2023	Revised	07.02.2023
Принята к публикации	08.02.2023	Accepted	08.02.2023



СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-07-11>

УДК 622.83:550.83

**Влияние длины трещин со случайными параметрами
на электрическую проводимость горных пород****П. Е. Сизин  , А. С. Вознесенский  , Л. К. Кидима Мбомби ***Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация* *al48@mail.ru***Аннотация**

При решении практических задач горного производства возникает необходимость оценки трещинной пустотности горных пород. Геофизические методы при решении данной задачи являются косвенными, поэтому интерпретация результатов может вызывать определенные трудности, обусловленные непрозрачностью физических связей между параметрами трещин и результатами измерений. В этой связи одним из путей решения данной проблемы является сочетание экспериментальных методов исследования с аналитическим и численным моделированием. Исследования были направлены на изучение электрической проводимости двумерной среды при наличии тонких изолирующих трещин. В статье предложен аналитический метод оценки зависимости удельной проводимости среды с включениями в виде эллиптических трещин от их полудлины. Показано, что данная зависимость имеет вид экспоненты, зависящей от квадрата длины максимальной полуоси в качестве аргумента. Метод моделирования основан на допущении эллиптической формы трещины при устремлении к нулю длины малой полуоси эллипсов. Анализ публикаций и результаты, изложенные в статье, показали, что такой метод нахождения удельной проводимости среды с тонкими трещинами один из наилучших в плане соответствия экспериментальным данным. Его предсказания близки к предсказаниям метода эффективной среды (ЕМА), но он отличается простотой формул и их физической наглядностью, что существенно для использования при интерпретации данных физического эксперимента. В двумерной постановке проведено численное моделирование в среде COMSOL Multiphysics удельной электрической проводимости образца среды размером 1×1 м с эллиптическими трещинами меньшей, чем у матрицы, проводимости. Рассмотрен квадратный образец единичных размеров с единичной проводимостью, в котором помещалось 25 трещин, имевших равномерное распределение по длине. Было построено 40 моделей, в которых максимальная длина трещин менялась от 0,01 до 0,4 размера образца, с шагом 0,01 м. Показано удовлетворительное соответствие результатов численной и аналитической моделей как визуальное, так и подтвержденное с помощью статистических оценок. Отмечено, что при изменении размера трещин до значения максимальной полуоси $a = 0,15$ м преобладает влияние одиночных трещин, не выходящих за границы образца. Выше этого значения при $a > 0,15$ м начинает сказываться влияние слияния трещин, а также их выхода на границы и за пределы образца. Сравнение предложенной теоретической модели электрической проводимости, зависящей от квадрата длины максимальной полуоси трещины, с похожей моделью в виде экспоненты с линейной зависимостью показало лучшее соответствие предложенной модели на стадии отсутствия слияния трещин и их выхода на границы образца при $a < 0,15$ м. При $a > 0,15$ м предложенная модель имеет меньший коэффициент детерминации по сравнению с полным диапазоном, включающим оба участка, но более высокий, чем у модели с линейной зависимостью в аргументе экспоненты, что говорит об универсальном характере предложенной модели.

Ключевые слова

электрическое сопротивление, длина трещины, численный, аналитический, моделирование, COMSOL Multiphysics

Для цитирования

Sizin P.E., Voznesenskii A.S., Kidima-Mbombi L.K. Influence of random parameter joint length on rock electrical conductivity. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):30–38. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-07-11>



MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research paper

Influence of random parameter joint length on rock electrical conductivity

P. E. Sizin , A. S. Voznesenskii , L. K. Kidima-Mbombi 

University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

 al48@mail.ru

Abstract

Rock joint hollowness coefficient is an important parameter when resolving practical mining problems. Geophysical methods used to resolve this problem are indirect. Thus the interpretation of their results may cause certain difficulties as a result of the uncertainty of the physical relationships between the parameters of joints and the measurement results. One of the ways to resolve this problem is to combine experimental research methods with analytical and numerical simulation. The studies were aimed at investigating the electrical conductivity of a two-dimensional medium in the presence of thin insulating (non-conducting) joints. This paper proposes an analytical method for assessing the dependence of the specific conductivity of a medium with inclusions in the form of elliptical joints on their half-length. This dependence is shown to have the form of an exponent depending on the square of the length of the maximum semi-axis as an argument. The simulation method is based on the assumption of the elliptical shape of a joint when the length of the minor semi-axis of the ellipses tends to zero. A review of publications and their results presented in this paper showed that this method for determining the specific conductivity of the medium with thin joints is one of the best in terms of compliance with experimental data. Its predictions are close to those of the Effective Media Approximation (EMA). However, the proposed method is distinguished by the simplicity of the formulas and their physical visibility essential for the use in interpreting the data of a physical experiment. In two-dimensional formulation, numerical simulation of the specific electrical conductivity of a sample of a medium measuring 1×1 m with elliptical joints of conductivity less than that of the matrix was carried out in the COMSOL Multiphysics environment. A square sample of unit sizes with unit conductivity was considered in which 25 joints with uniform distribution along the length occurred. 40 models were built wherein the maximum length of the joints varied from 0.01 to 0.4 sample size in increments of 0.01 m. The satisfactory concordance of the results of numerical and analytical models, both visual and confirmed by statistical estimates, has been shown. It was noted that when the size of the joints changes to achieve the value of the maximum semi-axis $a = 0.15$ m, the influence of single joints that do not extend beyond the boundaries of the sample prevails. Above this value, at $a > 0.15$ m, the influence of joint coalescence, as well as their extension to and beyond the sample boundaries begins to affect. Comparison of the proposed theoretical model of electrical conductivity, depending on the square of the length of the maximum semi-axis of a joint, with a similar model in the form of an exponent with a linear dependence showed a better concordance of the proposed model with observations at the stage of the lack of joint coalescence and their extension to the sample boundaries at $a < 0.15$ m. At $a > 0.15$ m. The proposed model has a lower coefficient of determination compared to the full range including both intervals, but higher than that of the model with a linear dependence in the exponent argument. This indicates the universal nature of the proposed model.

Keywords

electrical resistance, joint length, numerical, analytical, simulation, COMSOL Multiphysics

For citation

Sizin P.E., Voznesenskii A.S., Kidima-Mbombi L.K. Influence of random parameter joint length on rock electrical conductivity. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):30–38. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-07-11>

Введение

Актуальность темы оценки параметров трещинной пустотности горных пород вытекает из необходимости решения задач прочности [1–4], устойчивости пород вокруг горных выработок [5–7], гидроразрыва породных массивов [8–10], фильтрации флюида через массив [11, 12], расчета параметров бурения и взрыва [13–15], а также из других практических задач горного производства. Для определения трещиноватости используют геологические [16–18], маркшейдер-

ские [19–21], видеометоды [22, 23]. Особое место здесь занимают геофизические методы [24–26]. Среди них значительное место отводится электромагнитным [27] и электрическим [28] методам. Несмотря на значительные преимущества электрических методов исследования трещиноватости горных пород, они имеют и ряд недостатков. Геофизические методы являются косвенными, поэтому интерпретация результатов может вызывать определенные трудности, обусловленные непрозрачностью физических связей между параме-



трами трещин и результатами измерений. В этой связи одним из путей решения данной проблемы является сочетание экспериментальных методов исследования с аналитическим и численным моделированием. В качестве примера можно привести работу [29], где показана теоретическая возможность аналитического расчета зависимости между трещиноватостью и электросопротивлением горных пород.

Задача о сопротивлении образца с трещинами сводится в конечном счёте к задаче о проводимости двухкомпонентной среды, состоящей из сплошного компонента (матрицы) и компонента, представленного отдельными включениями. При небольшой концентрации включений такая проводимость находится легко [30]. Она связана с концентрацией включений по линейному закону. Для немалых концентраций наилучшим методом считается приближение эффективной среды (effective media approximation, ЕМА) [31–33]. Изначально разработанное для «объёмных» включений (сфер в трёхмерном пространстве, кругов, квадратов и т. д. в двумерных задачах), оно затем было модифицировано для случая «бестелесных» включений, например, бесконечно тонких дисков в трёхмерном случае и «царапин» в двумерном [34]. Такой подход позволяет, в частности, моделировать электрическую проводимость горных пород, содержащих трещины. При этом в реальных горных породах трещины могут быть как пустыми или содержащими низкопроводящие жидкости (нефть), так и заполненными раствором солей (высокопроводящим флюидом) [35]. В первом случае трещины следует считать изолирующими, во втором – практически идеально проводящими, когда проводимость флюида на несколько порядков выше проводимости вмещающей его горной породы [29]. В настоящей работе используется модель «сухих» или заполненных флюидами трещин с проводимостью, составляющей 10^{-4} от проводимости минеральной матрицы. Следует отметить также, что при некоторой достаточно высокой концентрации включений происходит перколяция, когда они перекрываются, образуя непрерывный проводящий или изолирующий кластер [36–38]. Однако в первую очередь столь высокие концентрации трещин не будут рассматриваться, поскольку при приближении к перколяционному порогу наступает механическое разрушение образца.

Целью настоящей работы являются разработка аналитической и численной моделей зависимостей электросопротивления образца горной породы от размеров трещин и сравнение между собой результатов моделирования этими методами, а также с результатами, полученными в физическом эксперименте на образцах горных пород.

2. Методы исследования

2.1. Аналитический метод

Рассмотрим задачу о проводимости двумерной среды с тонкими трещинами (в пределе – царапинами нулевой толщины). Для случая малой концентрации царапин, перпендикулярных градиенту приложенного напряжения (и направлению электрического тока), получаем [34]

$$\sigma = \sigma_0 \left(1 - \pi \left(\frac{l}{2} \right)^2 N \right), \quad (1)$$

где σ_0 – проводимость среды без трещин; $l/2$ – «радиус» трещины, равный половине её длины; N – двумерная концентрация трещин. В случае хаотической ориентации трещин (равномерного распределения по углу) вклад этих трещин в проводимость уменьшается в два раза:

$$\sigma = \sigma_0 \left(1 - \frac{\pi l^2}{8} N \right).$$

Причина этого заключается в том, что при усреднении проводимости по статистическому ансамблю трещин одна из двух координатных осей не даёт вклада: изолирующие трещины, ориентированные параллельно току, сколь-нибудь заметно не влияют на проводимость.

Заметим, что при наличии в квадратном образце со стороной L и проводимостью σ_0 ровно одной трещины длиной l , перпендикулярной полю, концентрация $N = 1/L^2$, а проводимость образца

$$\sigma = \sigma_0 \left(1 - \frac{\pi l^2}{4L^2} \right).$$

Пусть теперь квадратный образец со стороной L содержит n трещин, перпендикулярных приложенному напряжению, и имеет проводимость σ . Поместим в этот образец ещё одну такую же трещину. При этом приращение проводимости образца

$$\Delta\sigma = -\sigma \frac{\pi l^2}{4L^2}.$$

Таким образом, получаем дифференциальное уравнение ($\Delta n = 1$)

$$\frac{\Delta\sigma}{\Delta n} = -\sigma \frac{\pi l^2}{4L^2}, \quad (2)$$

решением которого является

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\pi l^2}{4L^2} n},$$

где использовано очевидное начальное условие: проводимость при отсутствии трещин равна σ_0 . С учетом двумерной концентрации трещин это решение можно записать в виде

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\pi l^2}{4} N}. \quad (3)$$

Пусть теперь длины трещин распределены равномерно в интервале от 0 до l . В этом случае среднее значение квадрата длины трещины составляет $l^2/3$. Этой величиной и будет определяться средний вклад отдельной трещины в изменение проводимости. Тогда исходное дифференциальное уравнение следует заменить на

$$\frac{\Delta\sigma}{\Delta n} = -\sigma \frac{\pi l^2}{12L^2},$$

и для проводимости образца получаем

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\pi l^2}{12 L^2} n},$$

или с учётом концентрации трещин в двумерном случае $N = n/L^2$

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\pi l^2}{12} N}. \quad (4)$$

Часто бывает удобно использовать половину длины трещины $a = l/2$ (аналогично радиусу кругового включения), и тогда

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\pi a^2}{3} N}. \quad (5)$$

Если обозначить $A = \pi N/3$, формула (3) принимает вид

$$\sigma = e^{-Aa^2}. \quad (6)$$

Параметр A имеет физический смысл эффективной концентрации трещин и может быть найден из численного или физического эксперимента.

Следует отметить, что в [36] с помощью метода ЕМА для проводимости двумерной среды с параллельными изолирующими трещинами получено выражение

$$\sigma = \sigma_0 \left(\sqrt{1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\pi l^2}{4} N \right)^2} - \frac{1}{2} \frac{\pi l^2}{4} N \right)^2. \quad (7)$$

Это выражение при не очень больших концентрациях трещин, вплоть до

$$\frac{\pi l^2}{4} N \approx 1,$$

очень близко к (3), но (3) гораздо проще, удобнее для анализа и имеет наглядный физический смысл.

2.2. Численный метод

Методология построения геометрии и задания свойств и граничных условий модели при использовании этого метода изложена в [39]. Особенностью такого подхода являлось построение геометрии, свойств, граничных условий модели с помощью программных скриптов. Изменение параметров трещин в каждой конкретной модели достигалось с помощью изменения значений переменных, используемых для задания длины, положения, угла наклона эллипсов, моделировавших трещины. Эти параметры менялись в заданных пределах с использованием генератора случайных чисел с равномерным распределением.

Моделирование осуществлялось в среде COMSOL Multiphysics в связке с Matlab, в котором записывался скрипт и в который вносились изменения в соответствии с необходимыми параметрами трещин. На рис. 1 для примера показан чертеж одной из моделей. Моделирование осуществлялось в безразмерных относительных единицах. Поскольку результаты для электрической проводимости и сопротивления удобнее всего представлять в относительных величинах, при моделировании использовалась следующая методика. Образец породы выбирался в виде квадрата со стороной 1 м, с удельной проводимостью 1 См/м.

На две противоположные стороны подавалось напряжение 1 В. При отсутствии трещин ток в образце составлял 1 А. При добавлении трещин ток становился менее 1 А. В силу закона Ома он численно совпадал как с проводимостью, так и с удельной проводимостью трещиноватой породы.

Всего было использовано 40 моделей при изменении полудлин трещин от 0,01 до 0,4 м. Еще одна модель была без трещин и соответствовала случаю $a/2 = 0$. Малая полуось трещин 0,01 м, большая полуось в соответствии с равномерным распределением менялась в пределах от 0,01 м до величины, назначаемой в серии опытов в пределах от 0,01 до 0,4 м. Наклоны трещин менялись в пределах $\pm 20^\circ$. Количество трещин в образце было равно 25. Максимальные смещения центров эллипсов от регулярной сетки по горизонтали и вертикали при равномерном их распределении составляли $\pm 0,2DX$ и $\pm 0,5DY$, где DX , DY – средние расстояния между центрами трещин по осям X и Y соответственно. При некоторых сочетаниях размеров и смещений трещин относительно их центров они могли частично или полностью выйти за пределы контура образца, при этом их общее количество было меньше указанного значения. Кроме того, слияние трещин приводило к уменьшению их эквивалентного числа, когда несколько соединенных между собой трещин приводили к действию, эквивалентному действию одной трещины большей длины. Удельная проводимость минеральной матрицы 1 См/м, материала трещин 10^{-4} См/м. Граничные условия: на верхней грани задан потенциал $V_0 = 1$ В, на нижней грани $V_0 = 0$ В, «земля». На боковых гранях задана нулевая проводимость $\sigma = 0$ См/м, изоляция.

Для решения в системе COMSOL Multiphysics при моделировании использовался статический решатель, позволяющий получить распределения токов и напряжений в установившемся режиме.

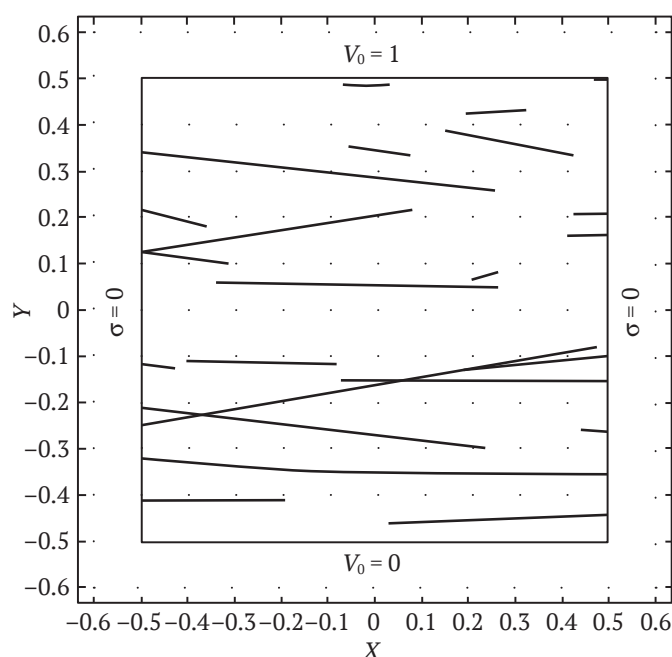


Рис. 1. Пример схемы 2D-модели для численного эксперимента

3. Результаты

На рис. 2 представлены примеры результатов моделирования протекания тока через образец без трещин (а), с эллиптическими трещинами полудлиной от 0,01 до 0,1 м (б), от 0,01 до 0,2 м (в), от 0,01 до 0,5 м (г). Линии тока красного цвета наглядно демонстрируют действие трещин, представляющих собой «запруды» для протекающего тока.

На графике на рис. 3 в виде отдельных точек представлены зависимости проводимости образца, полученные с помощью расчетов методом конечных элементов. Для аппроксимации полученных результатов использована формула (6).

Внешне обращает на себя удовлетворительная сходимость теоретической и экспериментальной зависимостей друг с другом. Ниже приведены количественные оценки такой сходимости.

4. Обсуждение результатов

При отсутствии в образце трещин линии тока на рис. 2, а равномерно распределены по пространству образца вдоль горизонтальной оси, а электрический потенциал имеет равномерное изменение вдоль вертикальной оси. Этот случай на графике рис. 3 соответствует значению полудлины трещин $a/2 = 0$. Присутствие трещин горизонтального направления на рис. 2, б увеличивает длину линий тока. Это является причиной уменьшения проводимости при увеличении $a/2$. При значительном увеличении длины трещин вплоть до полного пересечения образца на рис. 2, г длина линий тока увеличивается в значительной степени, существенно меняя свою конфигурацию по сравнению с ненарушенным образцом на рис. 2, а. При этом электрический потенциал имеет скачкообразное изменение в местах трещин. Поскольку чис-

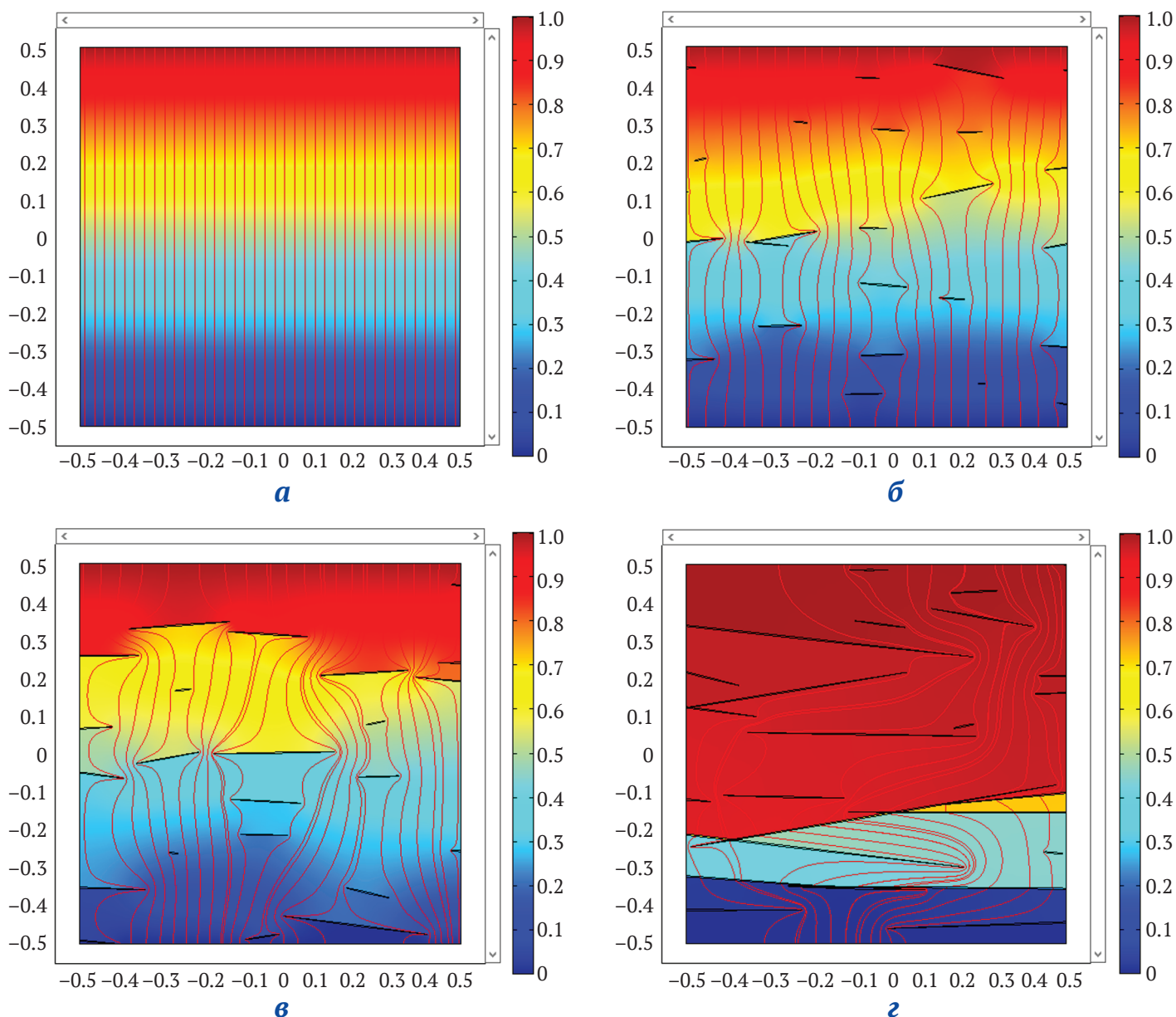


Рис. 2. Линии тока (красные линии) и распределение электрического потенциала относительно нижней границы в соответствии со шкалами справа

ленная модель включает вероятностное распределение параметров трещин, экспериментальные точки на рис. 3 имеют случайные отклонения от аналитической кривой. При этом до величины $a/2 = 0,15$ (м) точки расположены ближе к аналитической кривой, чем при больших значениях $a/2$. Это связано с тем, что здесь начинает сказываться выход высокоомных трещин за границы образца, а также их слияние (перколяция), приводящее к значительным искривлениям линий тока.

Экспериментальные точки хорошо описываются зависимостью (6), параметр A которой подобран с помощью пакета Statistica по критерию наименьших квадратов

$$y = \exp(-21,23x^2),$$

где $x = a/2$ – максимальная величина большой полуоси эллиптической трещины, она менялась от 0,01 до 0,4; $y = \sigma/\sigma_0$ – относительная проводимость образца; σ_0 – проводимость образца без трещин. В данном случае параметр $A = 21,33$, что соответствует эквивалентному числу трещин $N_{\text{экв}} = 3A/\pi = 20,4$. Это число заметно меньше 25 – истинного количества трещин в образце. Это объясняется тем, что при немалых размерах трещин часть из них сливается друг с другом или попадает на границы образца. Коэффициент детерминации результатов численного моделирования при аппроксимации $R^2 = 0,977$, среднеквадратическое отклонение СКО = 0,0494 См/м, что отражает случайный характер параметров трещин и меньше 10% среднего значения проводимости 0,5 См/м в эксперименте. Для начального участка кривой, где не сказывается влияние краевых эффектов и слияния трещин, эта величина значительно меньше.

В соответствии с этим для более детального анализа весь диапазон значений полудлин трещин a был разбит на два участка: $0 \leq a < 0,15$ м (участок 1) и $0,15 \leq a \leq 0,40$ м (участок 2), для которых отдельно были проведены статистические оценки.

Интересно сравнить полученные результаты с экспериментальными. В [40] рассмотрены результаты исследования проводимости образцов пород-коллекторов Чаяндинского месторождения. Зависимость изменения удельной электропроводности от доли трещинной пористости аппроксимировалась экспонентой

$$y = a_0 \exp(-a_1 x), \quad (8)$$

где a_0, a_1 – параметры экспоненциальной зависимости. График зависимости по формуле (8) в сравнении с результатами численного эксперимента приведен на рис. 4. При этом $a_0 = 1,179$; $a_2 = 5,251$.

Как следует из сравнения рис. 4 с рис. 3, визуально аппроксимация зависимостью (8) хуже, чем зависимостью (6). Если кривая экспериментальных данных на первом участке выгнута вверх, то зависимость (8) выгнута вниз. На втором участке кривая (8) проходит выше экспериментальных точек, хотя на этом участке кривизна хода обеих кривых совпадает.

В табл. 1 приведены результаты аппроксимации полученных результатов по формулам (6) и (8). Для формулы (6) приведены также значения параметра A

и расчетные значения эквивалентного количества трещин $N_{\text{экв}}$. Следует отметить, что расчеты по формуле (7) дали результаты, близкие к результатам формулы (6), поэтому в табл. 1 они отдельно не приведены. Для формулы (8) значения параметра A не рассчитывались, т. к. эта модель отличалась от модели (6) по своей сути.

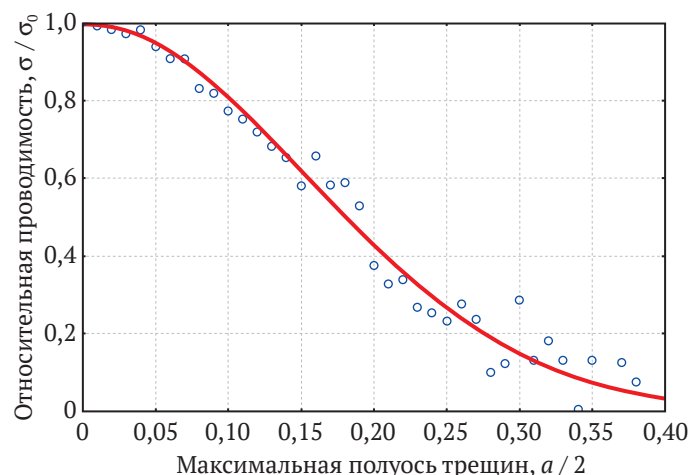


Рис. 3. Зависимости проводимости образца от длины трещин, полученные численным методом (полые кружки) и аппроксимацией по формуле (6) (сплошная линия)

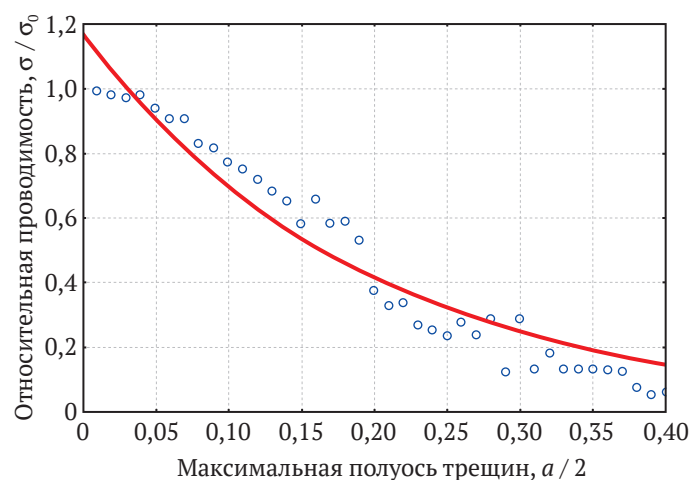


Рис. 4. Аппроксимация экспериментальных точек зависимостью (8)

Таблица 1

Показатели аппроксимации результатов численного моделирования по формулам (6) и (8)

Номер формулы	Участки	R^2	СКО	A	$N_{\text{экв}}$
(6)	1+2	0,979	0,014	20,34	21,30
	1	0,987	0,00014	23,32	24,42
	2	0,901	0,016	19,96	20,90
(8)	1+2	0,935	0,044	–	–
	1	0,932	0,0036	–	–
	2	0,922	0,012	–	–



Как следует из табл. 1, формула (8) дает худшие результаты по сравнению с формулой (6). Так, для полной кривой (8) и для ее первого участка коэффициент детерминации R^2 ниже, а СКО выше, чем для кривой (6). Для второго участка, где начинают сказываться перекрытия трещин и их выход за пределы образца, это различие меньше, но все равно значительно.

В упомянутой статье [40] автор поясняет, что зависимость вида (8) использована для аппроксимации трещин в реальных образцах. Такие образцы имеют достаточно развитую систему трещин, которые в значительной части перекрываются между собой, а также имеют выход за пределы образца. Этот фактор является преобладающим при описании рассматриваемых зависимостей, и зависимость (8) для этого случая является приемлемой.

Таким образом, можно сделать вывод о приемлемости формулы (6) для описания зависимости между размерами трещин и проводимостью образца горной породы в случае «сухих» или заполненных низкопроводящей жидкостью трещин при их малой концентрации до проявления перколяционных явлений.

Заключение

1. Предложен аналитический метод оценки зависимости удельной электрической проводимости среды с включениями в виде эллиптических тонких трещин от их полудлины. Показано, что данная зависимость имеет вид экспоненты, зависящей от квадрата длины максимальной полуоси в качестве аргумента. Метод моделирования основан на допущении эллиптической формы трещины при устремлении к нулю длины малой полуоси эллипсов. Анализ публикаций и результаты, изложенные в статье, показали,

что такой метод нахождения удельной проводимости среды с тонкими трещинами один из наилучших в плане соответствия экспериментальным данным. Его предсказания близки к предсказаниям метода эффективной среды (ЕМА), но он отличается простой формул и их физической наглядностью, что существенно для использования при интерпретации данных физического эксперимента.

2. В двумерной постановке проведено численное моделирование в среде COMSOL Multiphysics удельной электрической проводимости образца среды размером 1×1 м с эллиптическими трещинами меньшей, чем у матрицы, проводимости. Показано соответствие результатов численной и аналитической моделей как визуальное, так и подтвержденное с помощью статистических оценок. Отмечено, что при изменении размера трещин до значения максимальной полуоси $a = 0,15$ м преобладает влияние одиночных трещин, не выходящих за границы образца. Выше этого значения начинает сказываться влияние слияния трещин и их выхода на границы и за пределы образца.

3. Сравнение предложенной теоретической модели электрической проводимости, зависящей от квадрата длины максимальной полуоси эллиптической трещины, с похожей моделью в виде экспоненты с линейной зависимостью от полудлины трещины показало лучшее соответствие предложенной модели на стадии отсутствия слияния трещин и их выхода на границы образца при $a < 0,15$ м. При $a > 0,15$ м предложенная модель имеет меньший коэффициент детерминации по сравнению с полным диапазоном, включающим оба участка, но более высокий, чем у модели с линейной зависимостью в аргументе экспоненты, что говорит об универсальном характере предложенной модели.

Список литературы / References

1. Feng P., Zhao J., Dai F. et al. Mechanical behaviors of conjugate-flawed rocks subjected to coupled static-dynamic compression. *Acta Geotechnica*. 2022;17(5):1765–1784. <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01322-6>
2. Feng P., Dai F., Shuai K. et al. Dynamic mechanical behaviors of pre-fractured sandstone with noncoplanar and unparallel flaws. *Mechanics of Materials*. 2022;166:104219. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2022.104219>
3. Yan Z., Dai F., Liu Y. et al. Experimental investigation of pre-flawed rocks under combined static-dynamic loading: Mechanical responses and fracturing characteristics. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021;211:106755. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106755>
4. Qi C., Xia C., Dyskin A. et al. Effect of crack interaction and friction on the dynamic strength of rock-like materials with many cracks. *Engineering Fracture Mechanics*. 2021;257:108006. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.108006>
5. Gao M., Xie J., Gao Y. et al. Mechanical behavior of coal under different mining rates: A case study from laboratory experiments to field testing. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2021;31(5):825–841. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.06.007>
6. Lu J., Jiang C., Jin Z. et al. Three-dimensional physical model experiment of mining-induced deformation and failure characteristics of roof and floor in deep underground coal seams. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021;150:400–415. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.04.029>
7. Li T., Chen G., Li Y. et al. Study on Progressive Instability Characteristics of Coal-Rock Composite Structure with the Different Height Ratios. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2022;40(3):1135–1148. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01947-0>
8. Serdyukov S., Patutin A., Rybalkin S.L. et al. Directional hydraulic fracturing based on tensile loading. In: *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management – SGEM. International Multidisciplinary Scientific Geoconference*. 2017;17(13):269–274. <https://doi.org/10.5593/sgem2017/13/S03.034>



9. Ingles J., Lamouroux C., Soula J.C. et al. Nucleation of ductile shear zones in a granodiorite under greenschist facies conditions, Neouvielle massif, Pyrenees, France. *Journal of Structural Geology*. 1999;21(5):555–576. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(99\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(99)00042-5)
10. Economides M.J., Mikhailov D.N., Nikolaevskiy V.N. On the problem of fluid leakoff during hydraulic fracturing. *Transport in Porous Media*. 2007;67(3):487–499. <https://doi.org/10.1007/s11242-006-9038-7>
11. Khramchenkov M.G., Korolev E.A. Dynamics of fractures growth in oil saturated carbonate beds of the Republic of Tatarstan. *Neftyanoe Khozyaistvo*. 2017;(4):54–57. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-4-54-57>
12. Petrov V.A., Lespinasse M., Poluektov V.V. et al. Rescaling of fluid-conducting fault structures. *Doklady Earth Sciences*. 2017;472(2):130–133. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17020027>
13. Matray J.M., Savoye S., Cabrera J. Desaturation and structure relationships around drifts excavated in the well-compacted Tournemire's argillite (Aveyron, France). *Engineering Geology*. 2007;90(1–2):1–16. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.09.021>
14. Andrievskiy A.P. Design procedure of optimal parameters of drilling and blasting operations certificate under drilling with straight slot tier cut. *Fiziko-Tekhnicheskie Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 1992;(5):71–76.
15. Kononenko M., Khomenko O., Savchenko M. et al. Method for calculation of drilling-and-blasting operations parameters for emulsion explosives. *Mining of Mineral Deposits*. 2019;13(3):22–30. <https://doi.org/10.33271/mining13.03.022>
16. Krstic S., Ljubojev M., Ljubojev V. et al. Monitoring the stability of the rock mass excavating of underground premises in the ore body t1, jama bor. In: *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management – SGEM. International Multidisciplinary Scientific Geoconference*. 2014;2(1):613–619. <https://doi.org/10.5593/sgem2014/b12/s2.078>
17. Sudarikov A.E., Merkulova V.A. Specifics of calculating the stability of mine workings when applying drilling and blasting. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017;12(21):6192–6196. URL: https://arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2017/jeas_1117_6471.pdf
18. Abaturova I., Savintsev I., Korchak S. Assessment of risk of development of contingency situations on railway tracks. In: *Engineering and Mining Geophysics 2018 – 14th Conference and Exhibition. European Association of Geoscientists and Engineers*. 2018. P. 137600. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201800545>
19. Nurpeisova M.B., Kirgizbayeva D.M., Kopzhassaruly K. Innovative methods of the rock massif fractures survey and treatment of its results. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2016;(2):11–18.
20. Levytskyi V., Sobolevskiy R., Zawieska D. et al. The accuracy of determination of natural stone cracks parameters based on terrestrial laser scanning and dense image matching data. In: *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. 2017;17(23):255–262. <https://doi.org/10.5593/sgem2017/23/S10.031>
21. Golik V., Stas G., Morkun V. et al. Study of rock structure properties during combined stopping and development headings. In: *The International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2020)*. 2020;166:03006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016603006>
22. Tian W.L., Yang S.Q., Dong J.P. et al. An experimental study on triaxial failure mechanical behavior of jointed specimens with different JRC. *Geomechanics and Engineering*. 2022;28(2):181–195. <https://doi.org/10.12989/gae.2022.28.2.181>
23. Fan X., Yu H., Deng Z. et al. Cracking and deformation of cuboidal sandstone with a single non-penetrating flaw under uniaxial compression. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2022;119:103284. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103284>
24. Ren S., Han T., Fu L. et al. Pressure effects on the anisotropic velocities of rocks with aligned fractures. *Acta Geophysica Sinica*. 2021;64(7):2504–2514. (In Chinese) <https://doi.org/10.6038/cjg202100318>
25. Anderson I., Ma J., Wu X. et al. Determining reservoir intervals in the Bowland Shale using petrophysics and rock physics models. *Geophysical Journal International*. 2022;228(1):39–65. <https://doi.org/10.1093/gji/ggab334>
26. Wu J., Goto T., Koike K. Estimating fractured rock effective permeability using discrete fracture networks constrained by electrical resistivity data. *Engineering Geology*. 2021;289:166–178. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106178>
27. Attya M., Hachay O., Khachay O. New method of defining the geotechnical parameters from CSEM (controlled source electromagnetic method) monitoring data at the 15th May City, Egypt. *Methods and Applications in Petroleum and Mineral Exploration and Engineering Geology*. 2021;371–388. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-85617-1.00022-9>
28. Grib N.N., Uzbekov A.N., Imaev V.S. et al. Variations in the geoelectric properties of the rock masses as a result of the seismic effects of industrial explosions. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMESS 2019)*. 9–13 September 2019, Prague, Czech Republic. 2019;362(1):012120. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/362/1/012120>
29. Sizin P.E., Shkuratnik V.L. Theoretical estimation of microcracks influence on rocks conductivity with maxwell approximation. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(3):212–218.



30. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Теоретическая физика: В 10 ч. Т. VIII. Электродинамика сплошных сред*. М.: Физматлит; 2005. 656 с.
Landau L.D., Lifshits E.M. *Theoretical physics: At 10 parts. T. VIII. Electrodynamics of continuous media*. Moscow: Fizmatlit; 2005. 656 p. (In Russ.)
31. Bruggeman D.A.G. Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen. *Annalen der Physik*. 1935;416(8):665–679. (In German) <https://doi.org/10.1002/andp.19354160802>
32. Landauer R. Conductivity of cold-worked metals. *Physical Review*. 1951;82(4):520–521. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.82.520>
33. Landauer R. High-field magnetoresistance of point defects. *Journal of Physics F: Metal Physics*. 1978;8(11):L245–L250. <https://doi.org/10.1088/0305-4608/8/11/001>
34. Балагуров Б.Я. *Электрофизические свойства композитов: Макроскопическая теория*. М.: ЛЕНАНД; 2015. 752 с.
Balagurov B.Ya. *Electrophysical properties of composites: Macroscopic theory*. Moscow: LENAND; 2015. 752 p. (In Russ.)
35. Касахара К. *Механика землетрясений*. М.: Мир; 1985. 264 с.
Kasakhara K. *Earthquake Mechanics*. Moscow: Mir; 1985. 264 p. (In Russ.)
36. Shklovskii B.I., Éfros A.L. Percolation theory and conductivity of strongly inhomogeneous media. *Soviet Physics Uspekhi*. 1975;18(11):845–862. <https://doi.org/10.1070/PU1975v018n11ABEH005233>
37. Pride S.R., Berryman J.G., Commer M. et al. Changes in geophysical properties caused by fluid injection into porous rocks: analytical models. *Geophysical Prospecting*. 2017;65(3):766–790. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12435>
38. Tan X., Konietzky H. Numerical simulation of permeability evolution during progressive failure of Aue granite at the grain scale level. *Computers and Geotechnics*. 2019;112:185–196. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.04.016>
39. Voznesensky A.S., Kidima-Mbombi L.K. Formation of synthetic structures and textures of rocks when simulating in COMSOL Multiphysics. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(2):65–72. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-65-72>
40. Жуков В.С. Влияние межзерновой и трещинной пористости на электросопротивление коллекторов Чаяндынского месторождения (Восточная Сибирь). *Геофизические исследования*. 2022;23(2):5–17. <https://doi.org/10.21455/gr2022.2-1>
Zhukov V.S. Influence of intergranular and fractured porosity on the electrical resistivity of reservoirs of the Chayandinsky field (Eastern Siberia). *Geophysical Research*. 2022;23(2):5–17. (In Russ.) <https://doi.org/10.21455/gr2022.2-1>

Информация об авторах

Павел Евгеньевич Сизин – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-8156-4972](https://orcid.org/0000-0001-8156-4972), Scopus ID [6506196727](https://orcid.org/6506196727); e-mail sizin.pe@misis.ru

Александр Сергеевич Вознесенский – доктор технических наук, профессор кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-0926-1808](https://orcid.org/0000-0003-0926-1808), Scopus ID [57210211383](https://orcid.org/57210211383), ResearcherID [C-3863-2015](https://orcid.org/C-3863-2015), SPIN 5976-3030; e-mail al48@mail.ru

Лемюэль Кетюра Кидима-Мбомби – аспирантка кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; Scopus ID [57226447408](https://orcid.org/57226447408)

Information about the authors

Pavel E. Sizin – Cand. Sci. (Phis. and Math.), Associate Professor of the Department of Mathematics, University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0001-8156-4972](https://orcid.org/0000-0001-8156-4972), Scopus ID [6506196727](https://orcid.org/6506196727); e-mail sizin.pe@misis.ru

Alexander S. Voznesenskii – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Physical Processes of Mining and Geocontrol, University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0003-0926-1808](https://orcid.org/0000-0003-0926-1808), Scopus ID [57210211383](https://orcid.org/57210211383), ResearcherID [C-3863-2015](https://orcid.org/C-3863-2015), SPIN 5976-3030; e-mail al48@mail.ru

Lemuel Ketura Kidima-Mbombi – PhD student, Department of Physical Processes of Mining and of Geocontrol, University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; Scopus ID [57226447408](https://orcid.org/57226447408)

Поступила в редакцию

12.07.2022

Received

12.07.2022

Поступила после рецензирования

08.08.2022

Revised

08.08.2022

Принята к публикации

15.12.2022

Accepted

15.12.2022



ОБОГАЩЕНИЕ, ПЕРЕРАБОТКА МИНЕРАЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-10-20>

УДК 553.495.061.4



Влияние глинистых минералов на процесс подземного выщелачивания урана

О.Ф. Петухов¹, И.У. Халимов¹ , В.П. Истомин², Н.М. Каримов¹ ¹ Навоийский государственный горно-технологический университет, г. Навои, Узбекистан² Навоийский горно-металлургический комбинат, г. Навои, Узбекистан halimov_i@bk.ru

Аннотация

В последние годы с развитием техники и технологии подземного выщелачивания (ПВ) доизвлечение урана из ранее отработанных блоков становится не только актуальной, но и вполне достижимой задачей, так как извлечение остаточного запаса урана из ранее отработанных блоков не требует дополнительных расходов на необходимую инфраструктуру. Одним из важнейших факторов формирования остаточного запаса урана в отработанных блоках является присутствие глинистых минералов в рудном горизонте. В связи с этим нами был проведен ряд исследований по изучению отрицательного и положительного влияния глинистых минералов на процесс ПВ. Водопроницаемость и относительно хорошая фильтрация (не менее 0,5–1 м/сут) руд и пород продуктивного горизонта занимают первое место в ряду гидрогеологических факторов, влияющих на эффективность ПВ урана. Вторым по значимости гидрогеологическим фактором является отсутствие гидрологической связи продуктивного водоносного горизонта с непродуктивными горизонтами, то есть обязательное наличие водоупоров. При этом роль глин в указанных гидрогеологических факторах – двоякая. В первом случае наличие глин негативно сказывается как на скорости фильтрации растворов, так и на извлечении урана. Во втором – наличие глинистых минералов (в качестве водоупоров) усиливает эффект ПВ. В результате исследования дана оценка роли глинистых минералов в процессе подземного выщелачивания урана; определены коэффициенты диффузии нитрат-ионов в глинах и рассчитано защитное действие водоупоров; установлено влияние содержания глин в рудном песчаном горизонте на коэффициенты фильтрации растворов; определены статические обменные емкости глин по урану путем исследования процесса сорбции урана на глинистых образцах из сернокислых и бикарбонатных растворов. Проведенными исследованиями установлены коэффициенты диффузии нитрат-ионов в монтмориллонитовых и каолиновых глинах, которые составили $3,34 \cdot 10^{-6}$ и $2,14 \cdot 10^{-6}$ см²/с. С учетом полученных расчетами значений коэффициентов диффузии защитное время глинистого водоупора для нитрат-ионов составило 43 года. При 20%-ном содержании глинистых минералов коэффициент фильтрации растворов снижается до значений, когда условия ПВ становятся неблагоприятными. Экспериментально установлено, что сорбция урана глинистыми минералами зависит как от природы глин, так и от состава раствора. Из сернокислых растворов сорбция урана протекает заметно лучше, чем из бикарбонатных растворов. При этом наибольшие значения статической обменной емкости по урану получены для бентонита (104 мг/г).

Ключевые слова

уран, подземное выщелачивание, глина, фильтрация, коэффициент диффузии, водопроницаемость, сорбция

Для цитирования

Petukhov O.F., Khalimov I.U., Istomin V.P., Karimov N.M. The effect of clay minerals on in-situ leaching of uranium. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):39–46. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-10-20>

BENEFICIATION AND PROCESSING OF NATURAL AND TECHNOGENIC RAW MATERIALS

Research paper

The effect of clay minerals on in-situ leaching of uranium

O.F. Petukhov¹, I.U. Khalimov¹ , V.P. Istomin², N.M. Karimov¹ ¹ NavoiState Mining and Technological University, Navoi, Uzbekistan² Navoi Mining and Metallurgical Complex, Navoi, Uzbekistan halimov_i@bk.ru

Abstract

In recent years, with the development of techniques and methods for in-situ leaching (ISL), additional uranium extraction from previously worked-out blocks is becoming not only relevant, but also quite achievable. In this case, the extraction of residual uranium reserves from previously worked-out blocks does not require additional costs for the necessary infrastructure. One of the most important factors in the formation of residual uranium



reserves in worked-out blocks is the presence of clay minerals in the ore horizon. In this regard, we conducted a number of studies on the adverse and positive effects of clay minerals on ISL process. Water permeability and relatively good filtration (not less than 0.5–1 m/day) of ores and rocks of a productive horizon (aquifer) is the most important hydrogeological factors affecting the performance of uranium ISL. The second most important hydrogeological factor is the lack of fluid communication between the productive aquifer and non-productive aquifers, i.e., the obligatory presence of aquicludes. The role of clays in these hydrogeological factors is twofold. On the one hand, the presence of clays negatively affects both the solutions filtration rate and uranium extraction. On the other hand, the presence of clay minerals (forming an aquiclude) enhances the effect of ISL. The study findings allowed the role of clay minerals in uranium ISL to be assessed. The diffusion coefficients of nitrate ions in the clays were determined, and the protective effect of aquicludes was calculated. The effect of the clay content in the ore sand horizon on the solutions filtration coefficients was also established. The static uranium exchange capacity of clays was determined by studying the process of uranium sorption by clay samples from sulfate and bicarbonate solutions. The studies established the diffusion coefficients of nitrate ions in montmorillonite and kaolinite clays, which amounted to $3.34 \cdot 10^{-6}$ and $2.14 \cdot 10^{-6}$ cm²/s. Taking into account the calculated values of diffusion coefficients, the protective time of the clayey aquiclude for nitrate ions was 43 years. At 20 % clay minerals content, the solution filtration coefficient decreases to values where ISL conditions become unfavorable. It was found experimentally that the sorption of uranium by clay minerals depends on both the nature of the clays and the composition of the solution. Uranium sorption from sulfate solutions proceeds noticeably better than that from bicarbonate solutions. The highest values of the static uranium exchange capacity were obtained for bentonite (104 mg/g).

Keywords

uranium, ISL, clay, filtration, diffusion coefficient, water permeability, sorption

For citation

Petukhov O.F., Khalimov I.U., Istomin V.P., Karimov N.M. The effect of clay minerals on in-situ leaching of uranium. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):39–46. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-10-20>

Введение

Добыча полезных ископаемых на основе технологий подземного выщелачивания (ПВ) находит масштабное воплощение и обеспечивает эффективную работу горнопромышленного комплекса во многих странах [1–4]. Очевидно, что свойства горных пород и минералов, принимающих участие в процессах ПВ, определяют его успешность. Поэтому исследования, направленные на изучение ключевых физических и химических процессов при реализации технологий ПВ, имеют большое значение.

В более ранних исследованиях изучению влияния свойств глин на процесс ПВ уделено, на наш взгляд, недостаточное внимание [5–8]. Так, в работах [5, 6] акцент сделан на влиянии глин на фильтрацию растворов через рудный горизонт, однако количественные характеристики коэффициентов фильтрации не указаны. В работе [7] роль глинистых водоупоров впервые включена в факторы классификации месторождений, отрабатываемых методом ПВ, но численные значения коэффициентов диффузии элементов не представлены, нет примеров расчета мощности защитного водоупорного слоя. В работе [8] описано влияние глин на водопроницаемость рудного пласта, но так же, как и в работах [5–7], ничего не сказано о влиянии глинистых минералов на сорбцию урана из продуктивных растворов, приводящую к потерям выщелоченного металла.

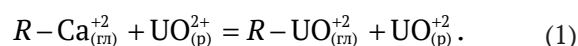
Целью работы явилось: а) изучение коэффициентов диффузии в глинистых минералах и проведение расчетов мощности защитного водоупорного слоя; б) изучение влияния содержания глинистых минералов на коэффициент фильтрации растворов; в) изучение сорбции урана глинистыми минералами.

Позитивное влияние свойств

глинистых минералов на процессы ПВ

С целью установления мощности (высоты) глинистых водоупоров в качестве экрана для защиты от вредного воздействия растворов выщелачивания на природные воды нами проведены исследования по определению коэффициентов диффузии некоторых химических компонентов в глинах. Поскольку глинистые водоупоры представлены в основном монтмориллонитом (бентонитом), реже – каолинитом, то эти глины и были использованы в исследованиях. При этом было принято во внимание, что скорость проникновения химических компонентов через глины лимитируется диффузией [9]. Во-вторых, в качестве химического компонента был выбран относительно токсичный NO₃⁻-анион (ПДК = 45 мг/л), присутствующий в продуктивных растворах ПВ урана.

Использовать в исследованиях по диффузии в качестве химических компонентов катионы металлов (например, UO₂²⁺) некорректно, поскольку процесс диффузии сопровождается катионообменной сорбцией металлов на глинах (в обмен на Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺) по реакции:



Что касается анионов, то в соответствии с данными работы [9] и нашими исследованиями [10] NO₃⁻-анионы бентонитом и каолинитом не сорбируются.

В экспериментальных исследованиях использовали ненарушенные образцы бентонитовой и каолинитовой глин. Идентификацию глин на составляющие их минералы проводили рентгеноструктурным методом с использованием дифрактометра «Дрон-3,0» на трубке 03БСВ – 25-Cu. Содержание обменных форм

катионов и суммарную катионообменную емкость (КОЕ) глин определяли путем их взаимодействия с 0,1N раствором ацетата аммония при pH = 7,0 [11]. Состав исследуемых образцов глин приведен в табл. 1, из которой видно, что щелочно-земельный бентонит представлен на 93 % монтмориллонитом, а содержание основного минерала в образце каолининовой глины составляет 88,2 %.

Исследования по определению коэффициентов диффузии в глинах проводили по методике, описанной в работах [12, 13], на лабораторной установке, схема которой приведена на рис. 1.

Образец глины ненарушенной структуры с известными площадью S и толщиной (мощностью) h помещался в стеклянную трубку. Для устойчивости и предохранения от разрушения с обеих сторон от образца помещали марлевые тампоны. Трубку с образцом глины через резиновые пробки соединяли с сосудами. В сосуд A заливался раствор объемом V_A с известной концентрацией NO_3^- . В сосуд B заливалась дистиллированная вода объемом V_B . Уровень жидкостей в сосудах поддерживался одинаковым с обеих сторон. С помощью магнитных мешалок производи-

лось перемешивание растворов для создания равномерной концентрации NO_3^- по всему объему. Постоянные условия опытов: $t = 200^\circ\text{C}$, перемешивание растворов со скоростью $n = 50$ об/мин; $V_A = V_B = 1$ л.

Вычисление коэффициентов диффузии проводили на базе полученных экспериментальных данных с использованием уравнения первого закона Фика:

$$D = \Delta m(h / \tau) S(C_A - C_B), \quad (2)$$

где D – коэффициент диффузии, $\text{см}^2/\text{с}$; Δm – масса вещества, перенесенного в процессе диффузии, мг, $\Delta m = C_B V_B$; h – толщина образца глины, см; τ – время диффузии, с; S – площадь образца глины, см^2 ; C_A – равновесная концентрация в сосуде A , мг/см³; C_B – равновесная концентрация в сосуде B , мг/см³.

Условия опытов, полученные результаты и выполненные расчеты коэффициентов диффузии NO_3^- -ионов в глинах представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, полученные значения коэффициентов диффузии хорошо согласуются с результатами, представленными в работах [14, 15]. В частности, по данным работы [15] коэффициент диффузии в бентоните составил $3,0 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$.

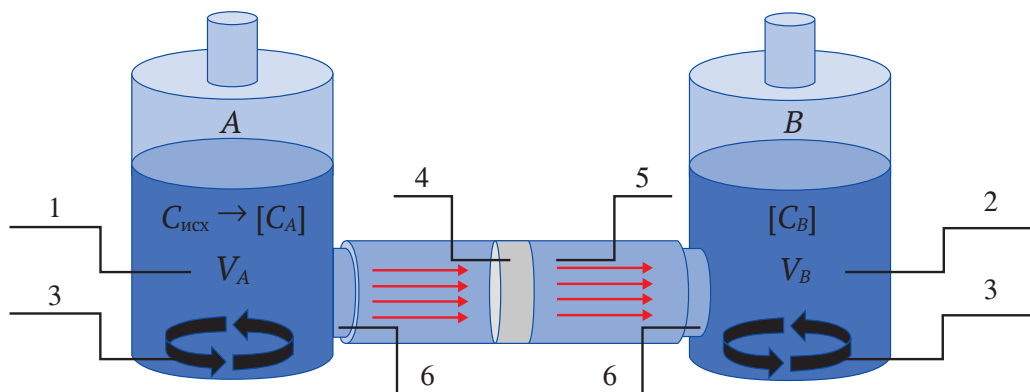


Рис. 1. Схема лабораторной установки для определения коэффициентов диффузии в глинах: 1 – сосуд A с исходной концентрацией $C_{\text{исх}}$, равновесной концентрацией C_A и объемом V_A ; 2 – сосуд B с равновесной концентрацией C_B и объемом V_B ; 3 – перемешивающие устройства; 4 – ненарушенный образец глины; 5 – стеклянная трубка, соединяющая сосуды; 6 – резиновые пробки

Таблица 1

Состав глин

Образец глины	Минеральный состав, %				Содержание противоионов, г/кг				КОЕ, г-экв/кг
	Монтмориллонит	Каолинит	Серицит	Кварц	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	
Щелочно-земельный бентонит	93,0	2,0	5,0	–	6,32	0,60	0,05	0,15	0,372
Каолинит	–	88,2	5,8	6,0	1,85	0,19	0,07	0,12	0,113

Таблица 2

Результаты по определению коэффициентов диффузии

Образец глины	Условия опытов				Результаты				
	h , см	S , см^2	$C_{\text{NO}_3}(\text{исх})$, мг/см ³	τ , с	$[C_A]$, мг/см ³	$[C_B]$, мг/см ³	$C_A - C_B$, г/см ³	Δm , мг	D , $\text{см}^2/\text{с}$
Бентонит	0,5	7,0	1,0	$2,6 \cdot 10^5$	0,65	0,35	0,30	350	$3,34 \cdot 10^{-6}$
Каолинит	0,5	7,0	1,0	$2,6 \cdot 10^5$	0,70	0,30	0,40	300	$2,14 \cdot 10^{-6}$

Во-вторых, коэффициент диффузии в бентоните примерно в 1,5 раза выше, чем в каолините. Это объясняется тем, что каолинит имеет прочную, неподвижную решетку, межпакетное расстояние в которой составляет 0,71–0,72 нм. В монтмориллоните пакет кристаллической решетки подвижный, трехслойный; межпакетное расстояние составляет 1,5 нм и может расширяться до 14 нм. Различие в решетках глин хорошо видно на рис. 2.

Установленные значения коэффициентов диффузии имеют большое практическое значение, поскольку позволяют рассчитать время защитного действия глинистого водоупора. Например, концентрация NO_3^- -ионов в продуктивных растворах рудного горизонта $C_{\text{исх}} = 2,0$ г/л (2 мг/см^3) и в процессе не меняется за счет обновления потока. Концентрация NO_3^- -ионов в природных водах не должна превышать $C_B = 0,045$ г/л ($0,045 \text{ мг/см}^3$). Площадь бентонитового водоупора $S = 1000 \text{ м}^2$ ($1 \cdot 10^7 \text{ см}^2$), а мощность $h = 10 \text{ м}$ ($1 \cdot 10^5 \text{ см}$). Объем природных вод принимаем 2000 м^3 ($2 \cdot 10^9 \text{ см}^3$). Масса NO_3^- , перенесенных в результате диффузии в природные воды, $\Delta m = 9 \cdot 10^7 \text{ мг}$. По формуле (2) определяем время защитного действия водоупора:

$$\begin{aligned} \tau &= m(h/D)S(C_A - C_B) = \\ &= 9 \cdot 10^7 \cdot 1 \cdot 10^5 / 3,34 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 10^7 \cdot (2,0 - 0,045) = \\ &= 1,37 \cdot 10^9 \text{ с или 43 года.} \end{aligned}$$

Однако на этом положительное влияние глин на процесс ПВ заканчивается.

Негативное влияние свойств

глинистых минералов на процессы ПВ

Другие три свойства глинистых минералов: крайне низкий коэффициент фильтрации ($K_f = 10^{-4}$ – 10^{-6} м/сут [15, С. 3–6]), заметные сорбционные свойства по отношению к катионам металлов [10] и склонность к образованию коллоидных растворов – имеют негативное влияние на процесс ПВ урана.

Вначале подробнее остановимся на низких коэффициентах фильтрации глин. Рудные водопроницаемые горизонты представлены в основном песками. Помимо песков, в рудном горизонте часто присутствуют глинистые минералы, цементирующие пески (отсюда название – «месторождения песчаникового типа» [16]). Содержание глинистых минералов ограничивает скорость процесса фильтрации раствора через рудный горизонт.

Нами проведены исследования по определению коэффициентов фильтрации воды и растворов через песок и через смесь песка с различным содержанием глин – бентонита и каолинита. Исследования проводили в стационарном режиме (слой фильтрующего материала был постоянным во всех опытах) при постоянном градиенте напора по ГОСТ 25584–2016¹. В опытах использовали тщательно отмытый песок фракции 0,25–0,50 мм и измельченные глины

¹ ГОСТ 25584–2016. Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации. М.: Стандартинформ; 2016.

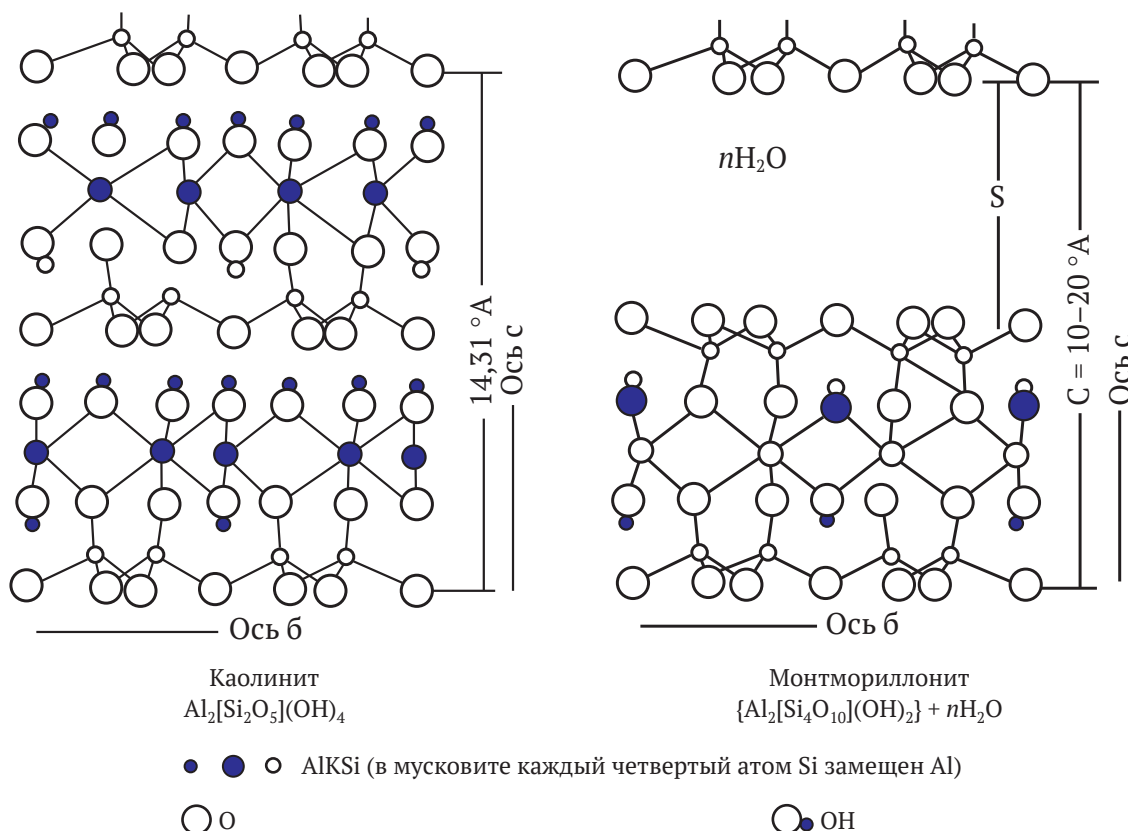


Рис. 2. Схема минералов глин



Таблица 3

Влияние содержания глины в песке на коэффициенты фильтрации воды и растворов

Содержание глины в песке, %	K _ф в присутствии бентонита, см/с · 10 ⁻²			K _ф в присутствии каолинита, см/с · 10 ⁻²		
	H ₂ O	10 г/л H ₂ SO ₄	1 г/л NaHCO ₃	H ₂ O	10 г/л H ₂ SO ₄	1 г/л NaHCO ₃
0,0	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
3,0	1,2	1,1	1,0	1,3	1,3	1,1
6,0	0,9	0,8	0,6	1,1	1,0	0,9
15,0	0,4	0,3	0,2	0,6	0,5	0,4
20,0	0,2	0,1	0,05	0,3	0,2	0,1

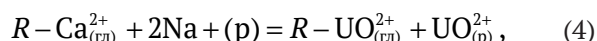
(см. табл. 1). Образцы песка с заданным содержанием глины перед загрузкой в цилиндр фильтрационной установки тщательно перемешивали. В качестве фильтрующих жидкостей использовали воду и растворы 10 г/л H₂SO₄ и 1 г/л NaHCO₃. Расчет коэффициента фильтрации K_ф вели по уравнению Дарси на базе полученных экспериментальных данных, определив скорость фильтрации

$$v = K_{\phi}(\Delta P / h), \quad (3)$$

где K_ф – коэффициент фильтрации, см/с; v – скорость фильтрации, см/с, $v = V/S\tau$; V – объем отфильтрованной жидкости, см³; S – площадь фильтрации, см²; τ – время фильтрации, с; ΔP/h – градиент давления в слое (тангенс угла наклона графика скорости фильтрации ко времени фильтрации); ΔP – перепад давления водного столба, см; h – толщина фильтрующего слоя, см.

Результаты исследований по определению коэффициентов фильтрации приведены в табл. 3.

Из результатов, приведенных в табл. 3, видно, что K_ф жидкостей заметно уменьшается с увеличением содержания глины. При этом K_ф в присутствии бентонита ниже, чем в присутствии каолинита. Это объясняется различными свойствами глины к набуханию, о чем было сказано выше. Использование растворов серной кислоты и бикарбоната натрия также сказывается на K_ф, причем использование раствора NaHCO₃ (даже меньшей концентрации, чем серной кислоты) сказывается сильнее. Этот факт объясняется тем, что за счет катионного обмена ионов Na⁺ на противоионы Ca²⁺, находящиеся в глинах,



происходит набухание глины. При содержании глины 20 % K_ф снижается до значений, когда условия протекания ПВ становятся неблагоприятными [6, С. 405].

в) Далее остановимся на сорбционных свойствах глины, негативно влияющих на процесс добычи урана методом ПВ. В табл. 4 приведены данные по значениям КОЕ некоторых глинистых минералов [17].

Как видно из табл. 4, наибольшими значениями КОЕ обладают вермикулит и монтмориллонит – основной минерал бентонитовых глины, наиболее характерных для условий ПВ урана.

Нами проведены исследования конкретно по сорбции урана из различных растворов бентонитовой и каолиновой глинами. Исследования проводились

в статических условиях с использованием термостатированного реактора с мешалкой при температуре 20 °С, соотношении Т : Ж = 1 : 1000 и времени агитации 1 ч (режим насыщения) [17]. После окончания агитации суспензию фильтровали, осадок промывали водой, сушили и анализировали на содержание урана методом рентгеноспектрального анализа на спектрометре АРФ-7. В опытах использовали реальные производственные растворы, отобранные с участков сернокислотного и бикарбонатного ПВ урана. Состав растворов представлен в табл. 5. В табл. 6 приведены экспериментальные данные по статической обменной емкости (СОЕ) глины по урану.

Таблица 4

Катионообменные емкости глинистых минералов

Тип глины	Минерал	КОЕ, г-экв/кг
Группа каолинов	Каолинит	0,02–0,10
Группа иллитов	Мусковит	0,105
	Иллит	0,13–0,42
Волокнистые глины	Аттапульгит	0,18–0,22
Группа монтмориллонита	Нонтронит	0,57–0,64
	Сапонит	0,69–0,81
	Монтмориллонит	0,8–1,5
Смолообразные производные	Биотит	0,03
	Вермикулит	1,0–1,5

Таблица 5

Состав производственных растворов ПВ

Раствор	Концентрация, мг/л						pH
	U	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Al ³⁺	
Сернокислотный	40,4	12750	–	730	240	544	1,2
Бикарбонатный	36,2	67	665	30	–	–	9,3

Таблица 6

Результаты по определению статической обменной емкости глины по урану

Образец глины	СОЕ глины по урану, мг/г	
	из сернокислого раствора	из бикарбонатного раствора
Бентонит	104	15
Каолинит	32	5



Как видно из представленных в табл. 6 результатов, сорбция урана глинами существенно зависит от природы как глины, так и раствора. Для бентонита СОЕ по урану заметно выше, чем для каолинита, что объясняется более высокими значениями КОЕ (см. табл. 1). Сорбция урана из сернокислых растворов также заметно выше, чем из бикарбонатных, поскольку константы устойчивости сульфатных анионных комплексов уранила ($K = 76\text{--}2500$) значительно меньше карбонатного комплекса ($K = 2,0 \cdot 10^{18}$). С большой степенью вероятности можно утверждать, что сорбция урана из бикарбонатных сред протекает не по ионообменному механизму, а как адсорбция.

Известно, что в глинистых породах осадочного комплекса часто встречается углефицированная органика, которая также является хорошим сорбентом урана.

Нужно отметить, что лабораторные исследования не моделируют в полной мере природные условия. Отличия лабораторных условий проведения опытов от реально существующих процессов состоят в отсутствии горного давления и связанного с ним изменения величины пористости, влажности и анизотропной составляющей искусственно приготовленного пласта глины.

Очевидно, что имитация горного давления при проведении исследований требует использования специальных установок. Что касается изотропности образцов, то ясно, что количественные связи между отдельными параметрами могут быть установлены только при однородности состава и знании его характеристик.

В любом случае, в реальных условиях ПВ наряду с процессом выщелачивания урана параллельно происходит процесс частичной сорбции урана глинистыми минералами, причем как пограничной поверхностью глинистых водоупоров, так и глинами, находящимися в песчаном рудном горизонте.

В заключение рассмотрим еще три свойства глинистых минералов, оказывающих негативное влияние на процесс ПВ. Прежде всего – это свойство глин образовывать коллоидные частицы. При взаимодействии глин с большим объемом растворов, что имеет место при ПВ, происходит пептизация – процесс образования глиняных коллоидных частиц (гелей). Гели, увлекаемые потоком продуктивных растворов, движутся в направлении откачных скважин. При этом часть гелей сорбируется на поверхности вмещающих пород, часть оседает на фильтрах, а часть откачивается с продуктивным раствором на сорбционное извлечение урана. Для предотвращения попадания гелей и других твердых частиц в сорбционные колонны на рудниках ПВ предусмотрены карты-отстойники. Однако в случаях, когда концентрация коллоидных частиц велика (образуются мутные опалесцирующие растворы), поверхности карт отстойников не хватает, происходит забивание сорбционной смолы этими частицами, что приводит к снижению производительности сорбционных колонн, а порой и к их остановке. При этом сорбированный коллоидными частицами глины уран теряется с осадками на дне карт-отстойников.

При бурении и сооружении технологических скважин для ПВ в разрезах часто встречаются гли-

нистые слои и прослои. В процессе бурения происходит обводнение глин, что приводит к их набуханию внутрь скважины и уменьшению заданного диаметра ствола. Это, в свою очередь, препятствует спуску обсадной колонны. На практике приходится применять технические средства для устранения этого явления, что приводит к дополнительным трудозатратам при обсадке скважин.

Бурение, вскрытие продуктивного горизонта, как и всей скважины, производится с использованием в качестве промывочной жидкости глинистого раствора, создающего глинистую корку на стенках скважины. В интервале установки фильтра также происходит глинизация прифильтровой зоны. Для разглинизации прифильтровой зоны производится предварительная промывка ствола скважины чистой водой и строительная прокачка после обсадки. Указанные мероприятия не позволяют полностью очистить прифильтровую зону от глин, что впоследствии отрицательно сказывается на производительности скважины. Особо сложно очистить скважину от глин в условиях низкого напора подземных вод на кровлю продуктивного горизонта.

При сооружении технологических карт-отстойников особое внимание уделяется гидроизоляции их дна. Гидроизоляцию конструкции дна осуществляют с использованием бентонитовых глин, которые, как указывалось выше, также сорбируют уран, приводя к его потерям.

Выводы

1. Глинистые минералы оказывают огромное как положительное, так и негативное влияние на процесс ПВ урана.

2. Глинистые минералы очень эффективны в качестве водоупоров, предотвращая растекание продуктивных и рабочих растворов. Проведенными исследованиями установлены коэффициенты диффузии нитрат-ионов в монтмориллонитовых и каолинитовых глинах, которые составили $3,34 \cdot 10^{-6}$ и $2,14 \cdot 10^{-6}$ см²/с.

3. С учетом полученных расчетами значений коэффициентов диффузии защитное время глинистого водоупора для нитрат-ионов составило 43 года.

4. Глинистые минералы, присутствующие в песчаном рудном горизонте, негативно влияют на коэффициент фильтрации растворов. Экспериментально установлены зависимости снижения коэффициента фильтрации растворов от содержания монтмориллонитовых и каолинитовых глин в песчаном рудном горизонте. При 20%-ном содержании глинистых минералов коэффициент фильтрации растворов снижается до значений, когда условия ПВ становятся неблагоприятными.

5. Проявляя катионообменные сорбционные свойства, глинистые минералы также отрицательно влияют на извлечение урана. Экспериментально установлено, что сорбция урана глинистыми минералами зависит как от природы глин, так и от состава раствора. Из сернокислых растворов сорбция урана протекает заметно лучше, чем из бикарбонатных растворов. При этом наибольшие значения статической обменной емкости по урану получены для бентонита (104 мг/г).



Список литературы

1. Аренс В.Ж. *Физико-химическая геотехнология*. М.: МГТУ; 2001. 656 с.
2. Руденко А.А., Трошкина И.Д., Данилейко В.В. и др. Перспективы селективно-опережающего извлечения рения из продуктивных растворов подземного выщелачивания урановых руд месторождения Добровольное. *Горные науки и технологии*. 2021;6(3):158–169. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-3-158-169>
3. Голик В.И., Комащенко В.И., Разоренов Ю.И., Валиев Н.Г. Опыт подземного выщелачивания металлов из балансовых запасов руд. *Известия УГТУ*. 2017;(2):57–62. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2017-2-57-62>
4. 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>
5. Белецкий В.И., Долгих П.Ф., Петров Р.П. и др. *Справочник по геотехнологии урана*. Под ред. Сковорова Д.И. М.: Энергоатомиздат; 1997. С. 127–132.
6. Петухов О.Ф., Истомин В.П., Руднев С.В., Хасанов А.С. *Уран*. Ташкент: Turon Zamin-ziyo; 2015. С. 437–453.
7. Петухов О.Ф., Курбанов М.А., Ахадов Х.Р., Халимов И.У. Классификация урановых месторождений, отрабатываемых методом подземного выщелачивания. *Горный вестник Узбекистана*. 2021;(2):16–21. URL: <http://gorniyvestnik.uz/assets/uploads/pdf/2021-aprel-iyun.pdf>
8. Аликулов Ш.Ш., Халимов И.У. Интенсификация параметров подземного выщелачивания урана из слабопроницаемых руд на примере урановых месторождений Узбекистана. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(3):37–38. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-3-0-37-48>
9. Затенацкая Н.П., Сафохина И.А. *Диффузионное выщелачивание глин*. М.: Наука; 1968. С. 54–58.
10. Грим Р. *Минералогия и практическое использование глин*. М.: Мир; 1967. С. 47–53. (Ориг.: Grim R.E. *Applied clay mineralogy*. NY, Toronto, London: McGraw-Hill Book Company, Inc.; 1962)
11. Латышев В.Е., Груцинов В.А., Петухов О.Ф. Сорбция тяжелых металлов природными неорганическими минералами. *Горный вестник Узбекистана*. 2002;(4):24–29. URL: <http://gorniyvestnik.uz/assets/uploads/pdf/2002-oktyabr-dekabr.pdf>
12. Дривер Дж. *Геохимия природных вод*. М.: Мир; 1985. С. 97–100. (Ориг.: Drever J.I. *The geochemistry of natural waters*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, Inc.; 1982)
13. Аксельруд Г.А., Лысянский В.М. *Экстрагирование: система твердое тело-жидкость*. Л.: Химия; 1974. С. 167–176.
14. Товбина З.М., Стражко Д.Н. Изучение диффузии растворенных веществ в силикагелях. *Украинский химический журнал*. 1968;34(9):876–880.
15. Гольдберг В.М., Скворцов Н.П. *Проницаемость и фильтрация в глинах*. М.: Недра; 1986. С. 143.
16. Толстов Е.А., Толстов Д.Е. *Физико-химические геотехнологии освоения месторождений урана и золота в Кызылкумском регионе*. М.: Геоинформцентр; 2002. С. 9–28.
17. Амфлет Ч. *Неорганические иониты*. М.: Мир; 1966. С. 34–39. (Ориг.: Amphlett C. B. *Inorganic ion exchangers*. Amsterdam–London–NY: Elsevier Publ. House; 1964)

References

1. Ahrens V.Zh. *Physical and chemical geotechnology*. Moscow: MGGU Publ.; 2001. 656 p. (In Russ.)
2. Rudenko A.A., Troshkina I.D., Danileyko V.V. et al. Prospects for selective-and-advanced recovery of rhenium from pregnant solutions of in-situ leaching of uranium ores at Dobrovolnoye deposit. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(3):158–169. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-3-158-169>
3. Golik V.I., Komashchenko V.I., Razorenov Yu.I., Valiev N.G. Experience of underground leaching of metals from balance reserves of ores. *News of the Ural State Mining University*. 2017;(2):57–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2017-2-57-62>
4. 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>
5. Beletsky V.I., Dolgikh P.F., Petrov R.P., et al. *Handbook of uranium geotechnology*. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 1997. Pp. 127–132. (In Russ.)
6. Petukhov O.F., Istomin V.P., Rudnev S.V., Khasanov A.S. *Uranium*. Tashkent: Turon Zamin-ziyo; 2015. Pp. 437–453. (In Russ.)
7. Petukhov O.F., Kurbanov M.A., Ahadov H.R., Khalimov I.U. The classification of uranium deposits, suitable for practicing the method of in-situ leaching. *Gorniy Vestnik Uzbekistana*. 2021;(2):16–21. (In Russ.) URL: <http://gorniyvestnik.uz/assets/uploads/pdf/2021-aprel-iyun.pdf>



8. Alikulov Sh.Sh., Khalimov I.U. Intensification of in situ uranium leaching from impermeable ore: A case-study of uranium deposits in Uzbekistan. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(3):37–48. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-3-0-37-48>
9. Zatenatskaya N.P., Safokhina I.A. *Diffusion leaching of clays*. Moscow: Nauka Publ.; 1968. Pp. 54–58. (In Russ.)
10. Grim R. *Mineralogy and practical use of clays*. Moscow: Mir Publ. House; 1967. Pp. 47–53. (In Russ.) (Orig. ver.: Grim R.E. *Applied clay mineralogy*. NY, Toronto, London: McGraw-Hill Book Company, Inc.; 1962)
11. Latyshev V.E., Grutsinov V.A., Petukhov O.F. Sorption of heavy metals by natural inorganic minerals. *Gorniy Vestnik Uzbekistana*. 2002;(4):24–29. (In Russ.) URL: <http://gorniyvestnik.uz/assets/uploads/pdf/2002-oktyabr-dekabr.pdf>
12. Drever J. *The geochemistry of natural waters*. Moscow: Mir Publ. House; 1985. Pp. 97–100. (In Russ.) (Orig. ver.: Drever J.I. *The geochemistry of natural waters*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, Inc.; 1982)
13. Akselrud G.A., Lysyansky V.M. *Extraction: solid-liquid system*. Leningrad: Khimiya Publ.; 1974. Pp. 167–176. (In Russ.)
14. Tovbina Z.M., Strazhko D.N. Diffusion of dissolved substances in silica gels. *Ukrainian Chemical Journal*. 1968;34(9):876–880. (In Russ.)
15. Goldberg V.M., Skvortsov N.P. Permeability and filtration in clays. Moscow: Nedra Publ.; 1986. P. 143. (In Russ.)
16. Tolstov E.A., Tolstov D.E. *Physical and chemical geotechnologies for the development of uranium and gold deposits in Kyzylkum region*. Moscow: Geoinformtsent Publ.; 2002. Pp. 9–28. (In Russ.)
17. Amphlett C.B. *Inorganic ion exchangers*. Amsterdam–London–NY: Elsevier Publ. House; 1964.

Информация об авторах

Олег Федорович Петухов – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры редких и радиоактивных металлов Навоийского государственного горно-технологического университета, г. Навои, Узбекистан

Илхом Убайдуллоевич Халимов – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой редких и радиоактивных металлов Навоийского государственного горно-технологического университета, г. Навои, Узбекистан; ORCID [0000-0002-4552-556X](https://orcid.org/0000-0002-4552-556X), Scopus ID [57222556259](https://orcid.org/57222556259); e-mail halimov_i@bk.ru

Владимир Петрович Истомин – ведущий геолог Навоийского горно-металлургического комбината, г. Навои, Узбекистан

Нурхан Маратович Каримов – ассистент кафедры редких и радиоактивных металлов, Навоийский государственный горно-технологический университет, г. Навои, Узбекистан; ORCID [0000-0001-7552-072X](https://orcid.org/0000-0001-7552-072X)

Information about the authors

Oleg F. Petukhov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, the Department of Rare and Radioactive Metals, Navoi State Mining and Technology University, Navoi, Uzbekistan

Ilkhom U. Khalimov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Rare and Radioactive Metals, Navoi State Mining and Technology University, Navoi, Uzbekistan; ORCID [0000-0002-4552-556X](https://orcid.org/0000-0002-4552-556X), Scopus ID [57222556259](https://orcid.org/57222556259); e-mail halimov_i@bk.ru

Vladimir P. Istomin – Leading Geologist, Navoi Mining and Metallurgical Company, Navoi, Uzbekistan

Nurkhan M. Karimov – Assistant of the Department of Rare and Radioactive Metals, Navoi State Mining and Technology University, Navoi, Uzbekistan; ORCID [0000-0001-7552-072X](https://orcid.org/0000-0001-7552-072X)

Поступила в редакцию	04.10.2022	Received	04.10.2022
Поступила после рецензирования	08.11.2022	Revised	08.11.2022
Принята к публикации	31.10.2022	Accepted	31.10.2022



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-08-86>

УДК 622.817.4



Исследование динамики газовой обстановки подземных выработок после проведения взрывных работ

Д. В. Ольховский , О. С. Паршаков , С. А. Бублик 

Горный институт Уральского отделения РАН, г. Пермь, Российская Федерация

 demexez@gmail.com

Аннотация

Определение источников выделения опасных и ядовитых веществ в рудничную атмосферу, их газового состава, а также обеспечение каждого такого источника загрязнения требуемым количеством свежего воздуха – важные вопросы с точки зрения обеспечения нормальных санитарно-гигиенических и безопасных условий труда горнорабочих. В настоящей работе на примере протяженной тупиковой разведочной выработки и подготовительной разрезной выработки медно-никелевого рудника проводится исследование одного из наиболее опасных источников загрязнения – взрывных работ, к которым в соответствии с Федеральными нормами и правилами (ФНиП) предъявляется ряд требований, в том числе осуществление контроля газовой обстановки в забое.

В работе проведено исследование динамики газовой обстановки в тупиковых горных выработках после проведения в них взрывных работ. Исследования выполнены с учетом экспериментальных данных, полученных в условиях двух тупиковых выработок действующего медно-никелевого рудника. Разработана методика проведения экспериментальных исследований газовой обстановки после взрывных работ в тупиковой выработке. Даны основные технические характеристики инструментальной базы, задействованной при проведении натурных измерений. Выявлены зависимости изменения концентраций ядовитых газов после взрывных работ в устье взрывающейся выработки, на исходящей струе воздуха и у вентилятора местного проветривания. Для оценки достоверности полученных данных произведен расчет объема выделившихся окислов углерода по данным газоанализаторов и химическим формулам разложения взрывчатых веществ при детонации в зависимости от типа и массы взрывчатых веществ. Описана, построена и откалибрована модель переноса газовой обстановки с учетом продольной дисперсии. Для моделирования постепенного выноса ядовитых газов из забоя выработки и задачи граничного условия применяется модель Воронина. На основе экспериментальных данных определены коэффициенты продольной дисперсии, эффективности проветривания и объемная концентрация рассматриваемой газовой примеси в зоне перемешивания в начальный момент времени для протяженной тупиковой выработки.

Построенная газодинамическая модель и полученные в результате анализа коэффициенты продольной дисперсии позволяют выполнять анализ времени проветривания протяженных тупиковых выработок. На основе полученной модели ведется усовершенствование алгоритма расчета скорости распространения в вентиляционной сети рудника продуктов горения при аварийных ситуациях, а также уточнение коэффициента продольной дисперсии для различных условий ведения работ.

Определено время проветривания тупиковой выработки по результатам моделирования газораспределения при удалении забоя выработки на 1500 м.

Ключевые слова

рудничная вентиляция, газораспределение, ядовитые газы, взрывные работы, мониторинг, математическая модель, проветривание протяженной тупиковой выработки, коэффициент продольной дисперсии, время проветривания

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках проекта № 19-77-30008.

Для цитирования

Olkhovskiy D. V., Parshakov O. S., Bublik S. A. Study of gas hazard pattern in underground workings after blasting. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):47–58. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-08-86>



SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research paper

Study of gas hazard pattern in underground workings after blasting

D. V. Olkhovskiy , O. S. Parshakov , S. A. Bublik 

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

 demexez@gmail.com

Abstract

Determining the sources of hazardous and toxic substances released into mine air, their gas composition, as well as providing each such source of pollution with the required amount of fresh air are important issues in terms of ensuring normal healthy and safe working conditions for miners. This paper studies blasting as one of the most dangerous sources of mine air pollution. The study was carried out for a long dead-end exploration working, and a development (preparatory) working of a copper-nickel mine. In accordance with the federal rules and regulations (FNIIP), a number of requirements, including monitoring of gas hazard at a face, is applied to blasting operations.

The study examined the behavior of gas-air mixture in dead-end mine workings after blasting. The findings are based on the experimental data obtained in the conditions of two dead-end workings at an operating copper-nickel mine. A technique for the experimental studies of gas release after blasting in a dead-end working was developed. The main technical characteristics of the instruments involved in the in-situ measurements are given. Time dependences of the concentrations of toxic gases after blasting at the blasted working mouth, at the return ventilation current, and near a booster were established. In order to assess the reliability of the data obtained, the volume of released carbon oxides was calculated based on the data of gas analyzers and chemical reactions of explosives decomposition during detonation, depending on the types and weights of the explosives. A model of gas-air mixture transfer was described, constructed, and calibrated allowing for longitudinal dispersion. The Voronin model was used to simulate the gradual removal of toxic gases from the working face and solving the problem of boundary conditions. Based on experimental data, the coefficients of longitudinal dispersion, ventilation efficiency, and volume concentration of the considered gas admixture in the mixing zone at initial time were determined for a long dead-end mine working.

The constructed gas-dynamic model and longitudinal dispersion coefficients obtained as a result of the analysis enabled the time required for long dead-end mine workings ventilation to be analysed and estimated. Based on the model, the algorithm for calculating the velocity of spreading the combustion products in a mine ventilation network in emergency situations is being improved. The value of longitudinal dispersion coefficient for different operating conditions is also being refined.

Based on the gas distribution simulation within the interval of 1,500 m from a working face, the time required for the ventilation of a dead-end mine working was determined.

Keywords

mine ventilation, gas distribution, toxic gases, blasting, monitoring, mathematical model, ventilation of a long dead-end working, longitudinal dispersion coefficient, ventilation time

Acknowledgments

The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation under the project No. 19-77-30008.

For citation

Olkhovskiy D.V., Parshakov O.S., Bublik S.A. Study of gas hazard pattern in underground workings after blasting. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):47–58. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-08-86>

Введение

Определение источников выделения опасных и ядовитых веществ в рудничную атмосферу, их газового состава, а также обеспечение каждого такого источника загрязнения требуемым количеством свежего воздуха – важные вопросы с точки зрения обеспечения нормальных санитарно-гигиенических и безопасных условий труда горнорабочих [1]. Газовый состав рудничной атмосферы зависит от ряда факторов (техногенных и природных источников загрязнения) [2]:

- способа отбойки горных пород;
- производства взрывных работ;
- применения горных машин и оборудования;
- газоносности горных пород;
- газодинамических характеристик горных пород.

В настоящей работе на примере протяженной тупиковой разведочной выработки и подготовительной разрезной выработки медно-никелевого рудника проводится исследование одного из наиболее опасных источников загрязнения – взрывных работ, к которым

в соответствии с Федеральными нормами и правилами (ФНиП) предъявляется ряд требований, в том числе осуществление контроля загазования забоя¹.

В задачи исследования входили:

- проведение натурных измерений динамики газового состава рудничного воздуха;
- моделирование газодинамических процессов в протяженной тупиковой выработке после выполнения в ней взрывных работ;
- определение коэффициентов продольной дисперсии, эффективности проветривания;
- определение на основе результатов моделирования изменения времени проветривания протяженной тупиковой выработки при ее дальнейшем развитии.

Результаты экспериментальных исследований позволили определить коэффициенты продольной дисперсии, эффективности проветривания и объемную концентрацию газа в зоне перемешивания в начальный момент времени для протяженной тупиковой выработки. В результате установлена скорость снижения концентраций ядовитых газов с учетом фактических параметров проветривания выработки – расхода воздуха, подаваемого в забой, и времени ее проветривания. На основании измерений определено количество газов, выделяющихся после взрыва. Результаты теоретических исследований позволили на основе разработанной и верифицированной газодинамической модели выработки оценить эффективность параметров ее проветривания с учетом перспективного развития горных работ.

Экспериментальные исследования в нарезной выработке

Общая схема проведения экспериментальных измерений заключалась в следующем: до начала проведения взрывных работ в тупиковых выработках в заранее определенных точках устанавливались портативные газоанализаторы в режиме записи показаний, а также проводились замеры расхода воздуха. В большинстве выработок точки замеров располагались в следующих местах (рис. 1):

точка 1 – на вентиляторе местного проветривания;

точка 2 – в устье выработки;

точка 3 – на исходящей струе воздуха, идущего из тупикового забоя.

Расположение газоанализатора в точке 1 позволяет оценить наличие и степень влияния на проветривание забоя рециркуляции ядовитых газов. Газоанализатор в точке 2 позволяет определить время, необходимое на проветривание тупиковой выработки, а также объем выделившихся газов. Газоанализатор в точке 3 позволяет оценить время выноса ядовитых газов и степень разбавления ядовитых газов исходящей струей с учетом дополнительного поступления свежего воздуха.

¹ Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения»: утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 03.12.2020 г. № 494.

Согласно данной схеме испытания проводились в подготовительной нарезной выработке (Разрезной штрек 26-20-1). В качестве инструментальной базы применялись портативные газоанализаторы Dräger X-am 5600 с техническими характеристиками, представленными в табл. 1.

Количество воздуха определялось с помощью крыльчатого анемометра АПР-2 и лазерного дальномера Leica Disto X310. Основные технические характеристики приборов приведены в табл. 2.

При взрыве любого промышленного вещества образуются ядовитые газы в различных количествах [3]. Основными продуктами взрыва промышленных взрывчатых веществ являются: окислы углерода CO и CO₂, диоксид серы SO₂ и оксиды азота NO, NO₂ [4]. Измерение концентрации диоксида серы SO₂ в данной работе не проводилось по причине сильного влияния на показания датчиков газоанализаторов диоксида азота NO₂.

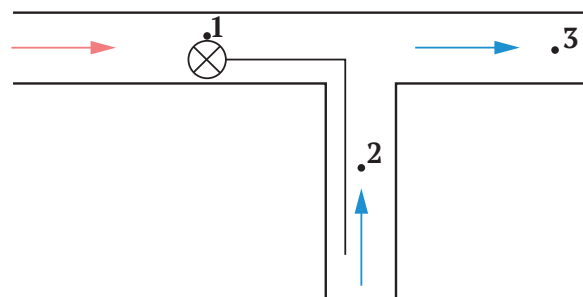


Рис. 1. Места расположения портативных газоанализаторов

Таблица 1
Технические характеристики газоанализаторов Dräger X-am 5600

Измеряемый газ	Диапазон измерений	Разрешение датчиков	Погрешность измерения	Инерционность датчиков
Метан CH ₄	0–100 % НПВ	0,1 % НПВ	± 5 % НКПР	До 15 с
Диоксида углерода CO ₂	0–5 об. %	0,01 об. %	± 10 %	До 15 с
Кислород O ₂	0–25 об. %	0,1 об. %	± 5 %	5–90 с
Оксид углерода CO	0–2000 ppm	1 ppm	± 15 %	5–90 с
Оксид азота NO	0–200 ppm	0,1 ppm	± 10 %	5–90 с
Диоксид азота NO ₂	0–50 ppm	0,1 ppm	± 15 %	5–90 с

Таблица 2
Технические характеристики анемометра и дальномера

Измеряемая величина	Диапазон измерений	Погрешность измерения
АПР-2		
Скорость воздуха	0,2–40 м/с	± (0,1 + 0,05·V) м/с
Leica Disto X310		
Длина	0,05–120 м	± 1,0 мм

В результате обработки данных портативных газоанализаторов для каждой точки замеров получены графики с временной динамикой концентрации ядовитых газов в выработке. На рис. 2–4 представлены графики изменения концентраций для оксида углерода CO и диоксида азота NO₂.

На рис. 5 представлены временные зависимости концентраций диоксида углерода CO₂. Существенного изменения концентраций кислорода O₂ и метана CH₄ зафиксировано не было (на графиках не представлены).

Время проветривания выработки до снижения концентрации ниже ПДК составило 130 мин, что значительно дольше разрешенного ФНиП времени (30 мин)². Из полученных результатов мониторинга концентраций ядовитых газов после взрывных работ можно сделать вывод о том, что вентилятор местного проветривания перед проведением взрывных работ был отключен и запущен только в 22:50, что означает отсутствие проветривания выработки активной стру-

ей воздуха в течение 110 мин. Это можно увидеть по кривой на рис. 3, где в момент включения ВМП концентрация ядовитых газов резко начинает снижаться. На исходящей струе воздуха (см. рис. 4) концентрация ядовитых газов наоборот резко выросла, что говорит о более быстром истечении ядовитых газов из тупиковой выработки и свидетельствует о включении ВМП. После включения ВМП концентрация через 20 мин достигла фоновых значений ядовитых газов, поступающих на проветривание, что говорит о достаточном уровне проветривания при условии постоянно работающего ВМП.

Кроме этого, анализ экспериментальных данных позволяет сделать некоторые выводы. На рис. 2 и 4 можно увидеть рост концентраций ($\approx 21:30$), который свидетельствует о поступлении ядовитых газов после взрывных работ с других выработок, что говорит о последовательном проветривании рабочих зон и ухудшении условий проветривания выработок. Пики диоксида углерода на рис. 5 после 23:20 предположительно вызваны началом работы в выработках техники с двигателями внутреннего сгорания. Концентрация диоксида азота в устье взрывающей выработки превысила предел измерения портативного газоанализатора (50 ppm).

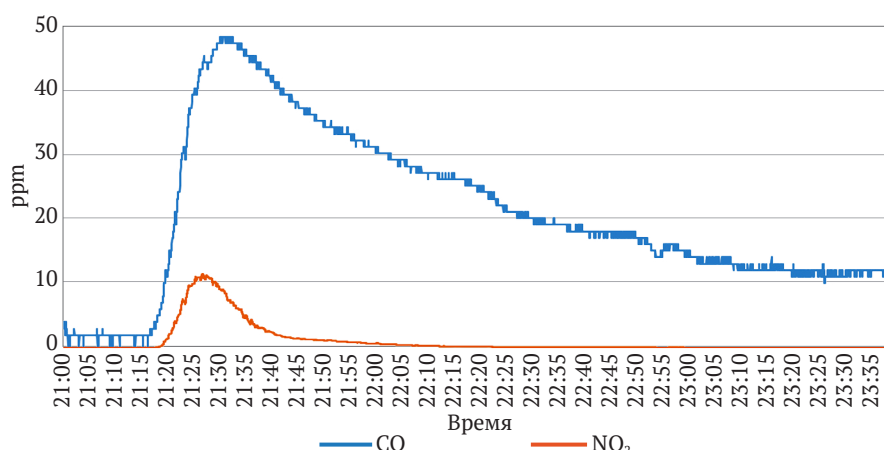


Рис. 2. Временная зависимость концентраций ядовитых газов у вентилятора местного проветривания (точка 1)

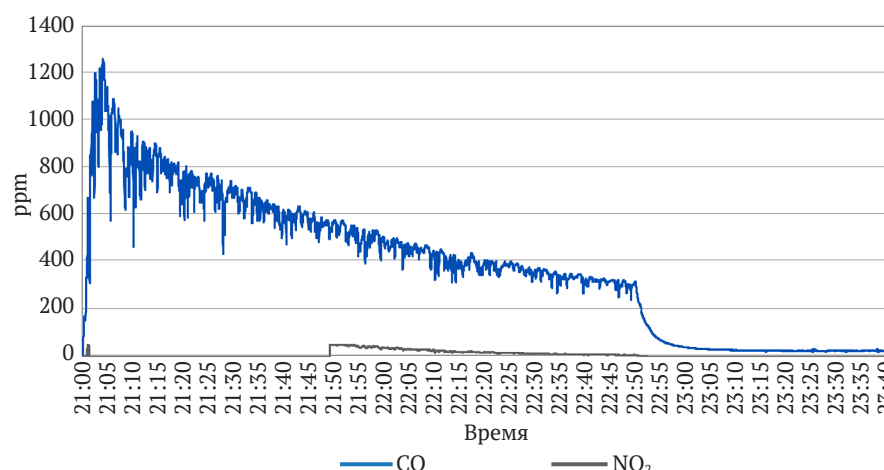


Рис. 3. Временная зависимость концентраций ядовитых газов в устье взрывающей выработки (точка 2)



Для оценки достоверности полученных данных произведен расчет объема выделившегося окислов углерода по данным газоанализаторов и химическим формулам разложения взрывчатых веществ при детонации в зависимости от типа и массы взрывчатых веществ.

Объем выделившегося оксида СО и диоксида углерода CO_2 , м^3 , рассчитывался по данным газоанализаторов путем определения средней концентрации с момента фиксации роста концентрации до момента снижения до фоновых значений:

$$V_{\text{co}} = (\varphi_{\text{ср}} - \varphi_{\text{фон}})Qt, \quad (1)$$

где $\varphi_{\text{ср}}$ – средняя концентрация газа с момента фиксации роста концентрации до момента снижения до фоновых значений, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $\varphi_{\text{фон}}$ – фоновая концентрация газа, $\text{м}^3/\text{м}^3$; Q – расход воздуха в точке, $\text{м}^3/\text{с}$; t – время с момента фиксации роста концентрации до момента снижения до фоновых значений, с.

Результаты расчетов выделившегося объема оксида и диоксида углерода (далее – окислы углерода) представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчетов выделившегося объема окислов углерода после взрывных работ в нарезной выработке

№ точки	Расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$	Объем выделившегося СО, м^3	Объем выделившегося CO_2 , м^3
2	23,2	–	–
3	35,4	4,78	19,65

В точке 2 достоверно определить объем окислов углерода не представляется возможным ввиду включенного ВМП.

Дополнительно произведена оценка объема выделения других ядовитых газов в зависимости от типа и массы применяемых взрывчатых веществ.

Во время проведения взрывных работ в выработке для отбойки применялась смесь, состоящая из взрывчатых веществ Гранулита АС-7 и Аммонита 6 ЖВ. При этом масса Гранулита АС-7 составляла 280 кг, а аммонита 6 ЖВ – 68 кг. Кислородный баланс обоих взрывчатых веществ положительный.

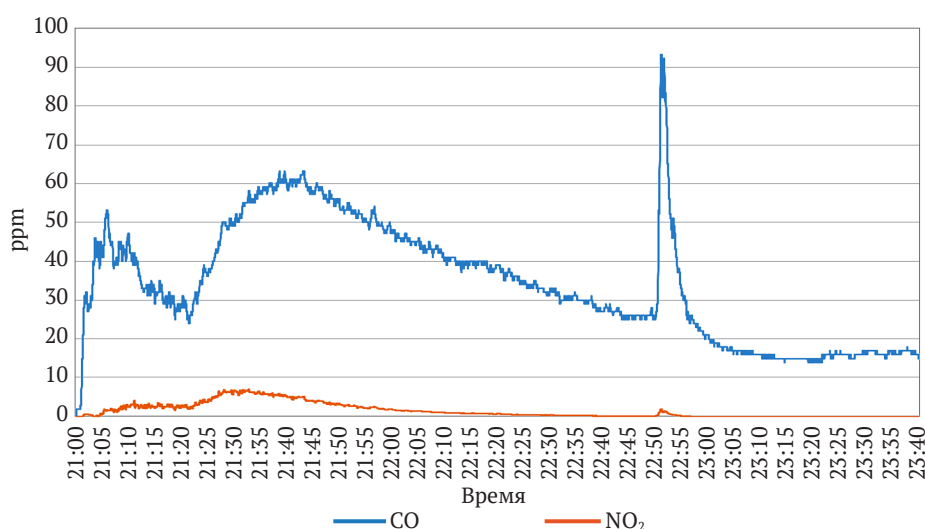


Рис. 4. Временная зависимость концентраций ядовитых газов на исходящей струе воздуха (точка 3)

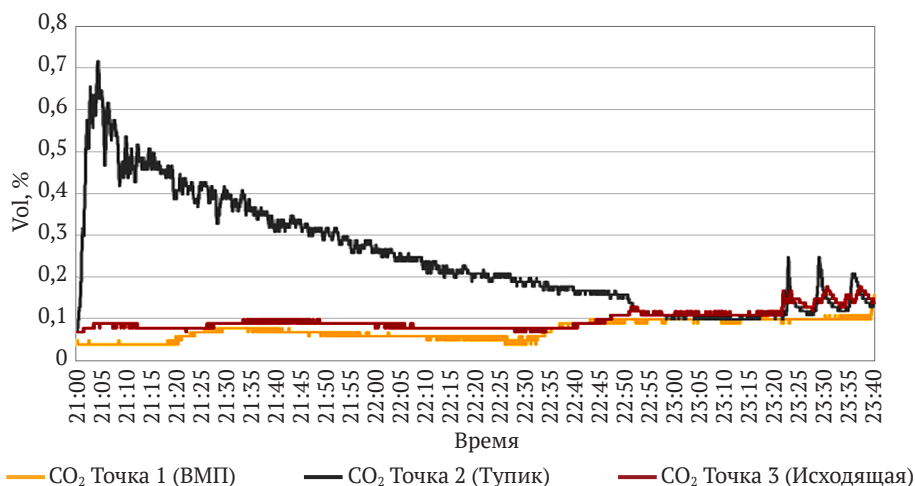
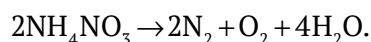


Рис. 5. Временная зависимость концентрации диоксида углерода: у вентилятора местного проветривания (точка 1); в устье взрываемой выработки (точка 2); на исходящей струе воздуха (точка 3)

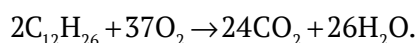


Гранулит АС-7 состоит из аммиачной селитры (~90 %), алюминиевой пудры (~7 %), и минерального масла (~3 %). При детонации аммиачной селитры выделяются азот N_2 , вода H_2O и кислород O_2 , кислородный баланс положительный. Помимо перечисленных компонентов, во время детонации также возникают окислы азота. Окислы азота выделяются в результате неполного восстановления NO_3 аммиачной селитры, а также повторно образуются при высоких температурах, как результат образуются оксид азота NO и диоксид азота NO_2 . Формула разложения аммиачной селитры при детонации выглядит следующим образом [5]:



Для увеличения энергии детонации и компенсации лишнего окислителя к аммиачной селитре добавляют алюминиевую пудру и масло. Алюминиевая пудра при детонации не выделяет ядовитых газов.

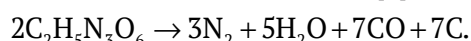
Для расчетов выделения диоксида углерода химическая формула минерального масла принимается $C_{12}H_{26}$ согласно [5]. Тогда химическая реакция горения масла будет выглядеть следующим образом:



В результате горения масла образуется диоксид углерода CO_2 и в случае недостатка кислорода оксид углерода CO . Также в составе масла часто содержится сера, в результате детонации которой образуется сернистый газ SO_2 . Оценить ее количество является проблематичным.

Аммонит 6 ЖВ состоит из аммиачной селитры (~79 %) и тротила (тринитротолуол, ~21 %). В результате детонации тротила образуются азот N_2 , вода H_2O , оксид углерода CO и углерод C .

Формула разложения тринитротолуола при детонации выглядит следующим образом [5]:



Тринитротолуол имеет отрицательный кислородный баланс, что компенсируется положительным балансом аммиачной селитры. Таким образом, основным источником оксида углерода CO является тринитротолуол в Аммоните 6 ЖВ и масло, содержащееся в Гранулите АС-7.

При известной массе взрывчатого вещества можно оценить максимальный объем выделившихся окислов CO_x углерода, m^3 , по формуле:

$$V_{co} = \frac{m_{expl} k}{M_{TNT}} mol_C V_{mol}, \quad (2)$$

где m_{expl} – масса взрывчатого вещества, г; k – массовая доля углеродсодержащего компонента во взрывчатом веществе; M_{TNT} – молярная масса углеродсодержащего компонента, г/моль; mol_C – количество молей углерода (в т. ч. содержащегося в CO и CO_2), выделяющегося при детонации, моль; V_{mol} – объем одного моля газа, 0,0224 m^3 .

В результате получается, что при детонации 68 кг Аммонита 6 ЖВ возможно выделение 9,86 m^3 окислов углерода CO_x . При детонации 280 кг Гранулита АС-7 и содержащегося в нем минерального масла максимально возможный объем окислов углерода составит 13,24 m^3 . Таким образом, при взрыве смеси 280 кг Гранулита АС-7 и 68 кг Аммонита 6 ЖВ может выделиться 23,1 m^3 окислов углерода, что соответствует суммарному объему окислов углерода, зафиксированному портативными газоанализаторами в точке 3 (24,44 m^3), что позволяет говорить о достоверности полученных экспериментальных данных с помощью портативных газоанализаторов.

Экспериментальные исследования в протяженной тупиковой выработке

Корректировки в методике измерений потребовала разведочная протяженная тупиковая выработка РВ-1, длина которой на момент проведения измерений составила более 800 м, ее устье располагается близко к вентиляционному стволу, а свежий воздух подается через вентиляционный трубопровод напрямую с поверхности. Для проведения натурных исследований после взрывных работ датчики устанавливались по длине протяженной тупиковой выработки в трех точках. Точка 1 располагалась максимально близко к взрываемому забою, точка 2 – посередине выработки, а точка 3 – в устье. Схема расположения датчиков представлена на рис. 6.

Схема расположения замерных точек по длине выработки обусловлена наличием значительных утечек воздуха (примерно 50 %) по длине трубопровода, проложенного по выработке. В этом случае интерес вызывают степень разбавления ядовитых газов по длине протяженной выработки и влияние продольной дисперсии газовых примесей. При этом установка датчиков у ВМП и в общей исходящей струе воздуха не принципиальна ввиду отсутствия возможной рециркуляции воздуха и выдачи всего исходящего воздуха по вентиляционному стволу непосредственно на поверхность.

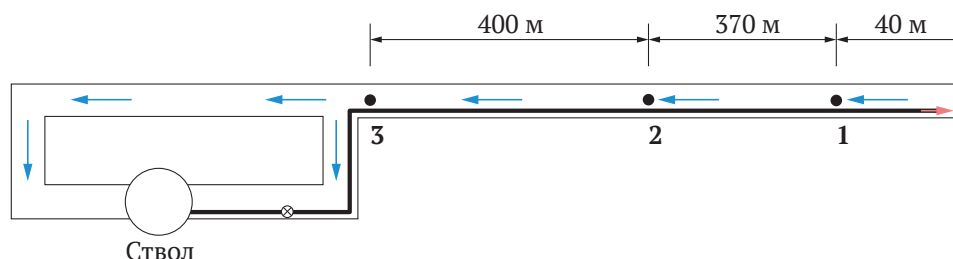


Рис. 6. Схема расположения замерных точек в выработке РВ-1



На рис. 7 представлены экспериментально измеренные временные зависимости концентрации ядовитых газов в устье выработки. Для устья выработки характерны наименьшие концентрации газов ввиду их максимального разбавления.

Концентрации диоксида азота выше значений 50 ppm были получены путем аппроксимации.

Следует отметить, что концентрации диоксида азота NO_2 в других точках превышали пределы измерений приборов, поэтому в дальнейшем для других точек измерений данные приведены только по оксиду углерода CO и диоксиду углерода CO_2 . Графики концентраций оксида углерода CO в точках 1, 2 и 3 и ди-

оксида углерода CO_2 в точках 1 и 3 представлены на рис. 8 и 9 соответственно.

Согласно полученным данным концентрация ядовитых газов по мере движения воздуха по выработке снижается, однако продолжительность превышения предельно допустимой концентрации увеличивается. Это объясняется утечками в вентиляционном трубопроводе и продольной дисперсией [6, 7], что не позволяет применять упрощенные модели [8].

Данные об удалении точек от забоя выработки, времени превышения ПДК в них, расходе воздуха и объеме прошедшего через них оксида углерода CO представлены в табл. 4.

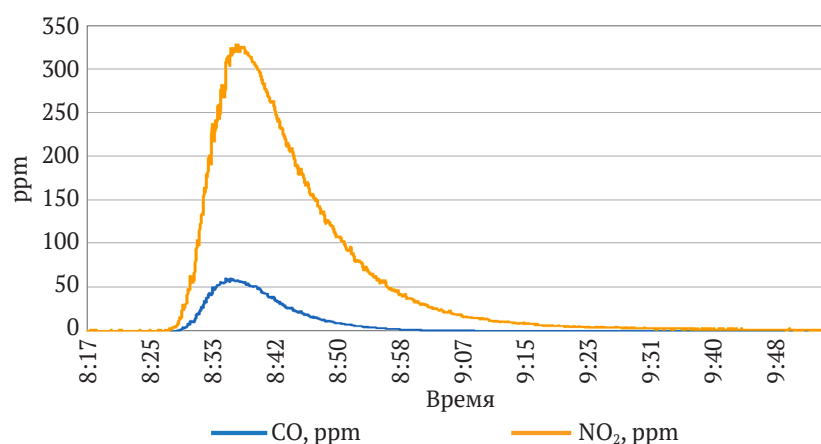


Рис. 7. Временные зависимости концентраций ядовитых газов в точке 3 выработки после взрывных работ

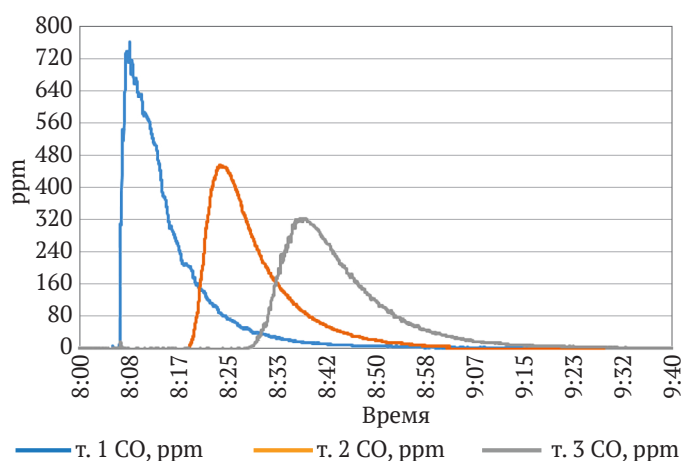


Рис. 8. Временные зависимости концентраций оксида углерода CO в выработке после взрывных работ

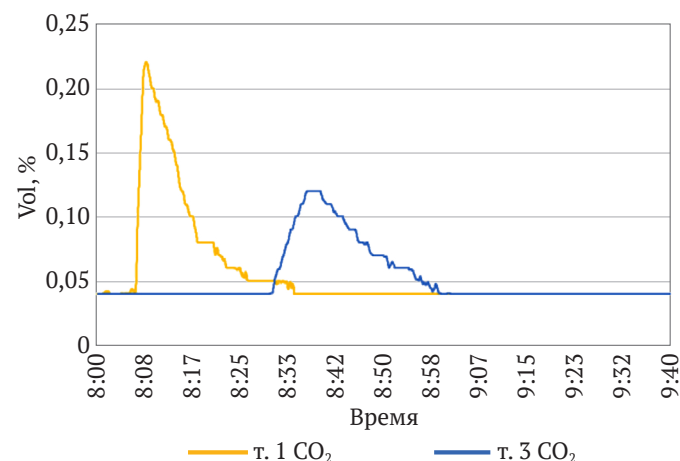


Рис. 9. Временные зависимости концентраций диоксида углерода CO_2 в выработке после взрывных работ

Таблица 4

Результаты исследования газовой обстановки в выработке после взрывных работ

№ точки замера	Расстояние от забоя до точки замера	Время начала превышения ПДК (17 ppm)	Время окончания превышения ПДК (17 ppm)	Требуемая продолжительность проветривания	Расход воздуха в точке замера	Объем выделившегося CO	Объем выделившегося CO_2
Выработка РВ-1							
1	40 м	8:06	8:38	63 мин	10 м ³ /с	4,0 м ³	9,1 м ³
2	410 м	8:20	8:53		–	–	–
3	810 м	8:32	9:09		15,5 м ³ /с	4,8 м ³	10,6 м ³



Для оценки достоверности полученных результатов мониторинга концентрации ядовитых газов в горной выработке после взрывных работ была произведена оценка объема выделившихся ядовитых газов в зависимости от типа и массы применяемых взрывных веществ.

Во время проведения взрывных работ в выработке для отбойки применялась смесь, состоящая из взрывчатых веществ Гранулита АС-7 и Аммонита 6 ЖВ. При этом масса Гранулита АС-7 составляла 200 кг, а аммонита 6 ЖВ – 34 кг. В результате получается, что при детонации 34 кг Аммонита 6 ЖВ возможно выделение $4,92 \text{ м}^3$ окислов углерода CO_x . При детонации 200 кг Гранулита АС-7 и содержащегося в нем минерального масла (6 кг) максимально возможный объем окислов углерода составит $9,46 \text{ м}^3$. Таким образом, при взрыве смеси 200 кг Гранулита АС-7 и 36 кг Аммонита 6 ЖВ может выделиться $14,38 \text{ м}^3$ окислов углерода, что соответствует суммарному объему окислов углерода, зафиксированному портативными газоанализаторами в точках 1 ($13,1 \text{ м}^3$) и 3 ($15,4 \text{ м}^3$), что позволяет говорить о достоверности полученных экспериментальных данных с учетом приборной точности и инерционности определения концентрации газов. Полученный объем выделившегося оксида углерода использовался для математического моделирования газораспределения в вентиляционной сети выработок после проведения взрывных работ.

Время проветривания протяженной выработки до снижения концентрации ниже ПДК составило 63 мин, что значительно дольше разрешенного ФНИП времени (30 мин)³.

Теоретические исследования

Для анализа временной динамики выноса вредных газовых примесей из забоя выработки РВ-1 в зависимости от удаления забоя от устья разработана нестационарная газодинамическая модель.

В модели приняты следующие допущения:

- объемные концентрации газов являются малыми, поэтому создаваемая ими разница плотностей газозооушной смеси в различных участках тупиковой горной выработки не способна привести к образованию значимой величины газовой депрессии и/или конвективной стратификации потоков по сечению выработки;

- в поперечном сечении горной выработки концентрация ядовитых газов однородна;

- все физические процессы определяются только временем и продольной координатой выработки. Данное предположение позволяет геометрически рассматривать выработки как одномерные объекты;

- система координат Ox выбирается таким образом, что продольная ось x направлена по ходу движе-

ния воздуха в тупиковой выработке, а начало координат O находится в забое тупиковой выработки;

- зона неравномерного вихревого движения воздуха вблизи забоя пренебрежимо мала по сравнению с общей длиной выработки;

- модель учитывает процесс перемешивания вредных газовых примесей со свежим воздухом путем задания в модели границы контакта зоны вихревого перемешивания с зоной однонаправленного и установившегося движения воздуха.

Анализируя временные зависимости концентраций CO в выработке (см. рис. 10), можно наблюдать рассеивание концентрации с увеличением расстояния от забоя. Это свидетельствует о наличии в выработках дисперсии. Согласно [8] дисперсия включает в себя как «рассеивание» примеси за счет неоднородного по сечению профиля скорости потока, так и продольную турбулентную диффузию из-за турбулентных пульсаций скорости потока в каждой его точке. Молекулярная диффузия пылегазовоздушной смеси, как правило, считается пренебрежимо малой при рассмотрении турбулентных течений воздуха в горных выработках. Она соотносится с турбулентной диффузией так же, как молекулярная вязкость с турбулентной, т. е. ниже последней на один-три порядка [9, 10]. А основным фактором, приводящим к дисперсии примесей на прямых участках выработки, является неоднородная по сечению скорость воздуха. Важно отметить, что эффект дисперсии потока, вызванный турбулентной диффузией и неоднородностью поля скорости по сечению, справедлив в первую очередь для одномерных моделей горных выработок вентиляционной сети.

Для описания переноса газовой примеси в выработках решалось уравнение конвективно-диффузионного переноса [11]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(v c)}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad (3)$$

где $c = c(t, x)$ – объемная концентрация рассматриваемой газовой примеси, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $v = v(x)$ – скорость воздуха в выработке, $\text{м}/\text{с}$; D – коэффициент продольной дисперсии, $\text{м}^2/\text{с}$ [12, 13]; x – продольная координата, м ; t – время, с . Учет зависимости скорости воздуха v от продольной координаты позволяет в явном виде учесть наличие утечек воздуха в вентиляционном трубопроводе.

В качестве границ расчетной области принимается граница контакта с зоной перемешивания и устье выработки. На данных границах задаются следующие граничные условия:

$$c(t, x_{\text{mixing}}) = c_{\text{mixing}}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t}(t, x_{\text{mouth}}) = 0, \quad (5)$$

где x_{mixing} – граница контакта с зоной перемешивания, м ; x_{mouth} – граница устья выработки, м ; $c_{\text{mixing}} = c_{\text{mixing}}(t)$ – объемная концентрация газа в зоне перемешивания, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Положение границы контакта с зоной перемешивания определяется по следующей формуле [14]:

³ Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»: утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 08.12.2020 г. № 505. 524 с.



$$x_{mouth} = x_p + 4d_{eff}, \quad (6)$$

где x_p – расстояние от забоя до конца вентиляционного трубопровода, м; d_{eff} – приведенный диаметр выработки, м.

Приведенный диаметр рассчитывается по следующей формуле:

$$d_{eff} = 4 \frac{S}{P}, \quad (7)$$

где S – площадь сечения выработки, м²; P – периметр выработки, м.

Для определения объемной концентрации в зоне перемешивания c_{mixing} используется модель Воронина [15]:

$$c_{mixing} = c_0 \exp \left(-k \frac{Q_p}{V_{mixing}} t \right), \quad (8)$$

где c_0 – объемная концентрация рассматриваемой газовой примеси в зоне перемешивания в начальный момент времени, м³/м³; k – коэффициент эффективности проветривания; Q_p – расход воздуха, выходящий из трубопровода, м³/м³; $V_{mixing} = x_{mouth} S$ – объем зоны смешения, м³.

В начальный момент времени в расчетной области задается нулевая концентрация вредной газовой примеси:

$$c(0, x) = 0. \quad (9)$$

В итоге уравнения (2)–(8) составляют математическую газодинамическую модель выноса вредных газовых примесей из выработки при проветривании после выделения из забоя газа. Стоит отметить, что величины D , c_0 и k для каждой выработки и газа необходимо определять путем обратного анализа [16], используя результаты экспериментальных замеров наподобие полученных для СО на рис. 7.

Численное решение задачи о конвективно-диффузионном переносе газовой примеси в выработках искалось с использованием метода конечных разностей с применением подхода расщепления по физическим процессам – конвекции и диффузии [17] (в случае необходимости – действия массового источника вредной примеси).

Следует отметить, что расчет концентрации газов и калибровка модели осуществлялись относительно окиси углерода СО, измеренной в ходе экспериментальных исследований в момент производства взрывных работ в трех точках по длине выработок (см. рис. 10). Из всех трех замерных точек наиболее надежными считаются результаты в точке 3. Это обосновывается тем, что из-за наличия продольной дисперсии весь объем газа проходит через точку 3 без резких изменений концентраций. В этом случае чувствительный элемент датчика успевает точнее зафиксировать проходящую через него концентрацию газа, т. е. снижается влияние фактора инерционности датчика.

Однако для определения концентрации в зоне перемешивания в начальный момент времени c_0 необходимы результаты замеров с точки 1, так как данная

точка находится в области зоны перемешивания, следовательно, максимальное значение концентрации СО в точке 1 будет определять величину c_0 .

Коэффициент эффективности проветривания k и коэффициент продольной дисперсии D определяются путем обратного анализа с использованием результатов замеров в точке 3 [18]. Обратный анализ заключается в следующем:

1. Зная величину c_0 , величину k подбирают таким образом, чтобы сохранялся баланс массы газа между точкой 3 и границей зоны перемешивания.

2. Полностью определив параметры граничного условия на границе зоны перемешивания, проводят моделирование при различных величинах коэффициента продольной дисперсии D и в итоге путем подбора находят такую величину D , при которой модельное рассеивание во времени концентрации газа в точке 3 совпадает с экспериментальными замерами.

Полученные величины параметров c_0 , k , и D для РВ-1 приведены в табл. 5.

Таблица 5

Значение коэффициента продольной дисперсии и параметров в модели перемешивания Воронина

D , м ² /с	c_0	k
Выработка РВ-1		
2,5	765	0,11

Результаты моделирования газораспределения в выработке в точке 3 показаны на рис. 10. Кроме этого, на рисунке представлены результаты экспериментальных измерений – временная зависимость концентрации газа от времени.

Сравнительный анализ результатов моделирования и эксперимента (рис. 10) показывает, что реализованная модель газораспределения при ее калибровке по экспериментальным замерам позволяет получить приемлемое соответствие с временной зависимостью концентрации газов в точке 3. Имеющиеся различия между модельной и замеренной зависимостью объясняются рядом причин: в силу быстрого переноса массы СО через датчик в точке 1 и наличия у датчика инерционного эффекта (см. табл. 1) невозможно корректно зафиксировать временную зависимость изменения концентрации газа, что приводит к небольшому смещению экспериментальной зависимости вправо и менее точной оценки величины c_0 ; отсутствие точных данных по распределению утечек воздуха вдоль выработок; использование постоянного коэффициента продольной дисперсии; использование упрощенной модели перемешивания воздуха в забое. Важно отметить, что путем подбора эффективного модельного расхода воздуха в выработке можно добиться практически идеального совпадения теоретической кривой и экспериментальных точек.

По полученным с помощью модели концентрациям окиси углерода СО установлено, что ПДК в устье разведочной выработки наблюдается через 18 мин после производства взрывных работ. Затем концентрация СО в устье снижается до ПДК только через 52 мин проветривания выработки после взрыва.

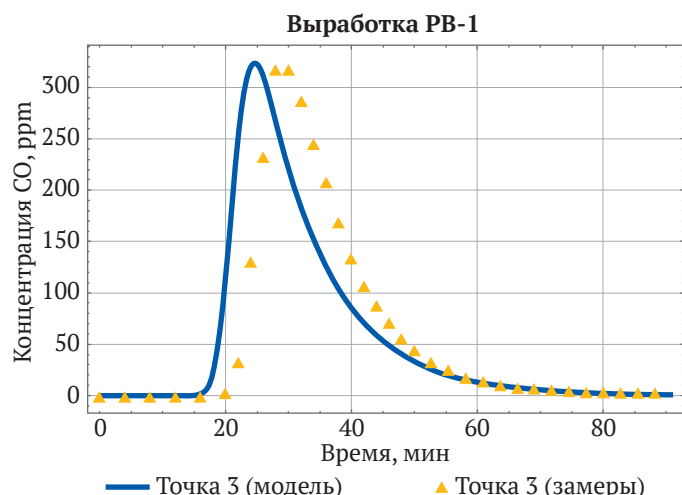


Рис. 10. Сравнительный анализ временных зависимостей концентрации СО в замерной точке 3 выработки

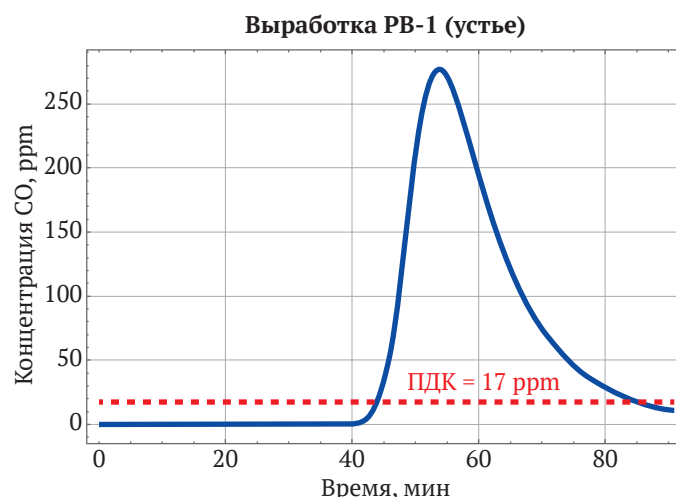


Рис. 11. Временная зависимость концентрации СО в устье выработки при удалении забоя 1500 м от устья

Дополнительно после проведенной калибровки и верификации модели проведено моделирование проветривания выработки при увеличении её длины до 1500 м. Принималось, что расход воздуха в выработке от устья до предыдущего положения забоя соответствует предыдущим начальным параметрам, а во вновь пройденной части выработки брался минимальный расход – 9 м³/с. Полученные результаты показаны на рис. 11.

При увеличении длины выработки до 1500 м получено, что время, за которое концентрация СО достигнет ПДК в устье после производства взрывных работ, увеличивается до 87 мин (на 38 % больше, чем при меньшей длине выработки).

Построенная газодинамическая модель и полученные в результате анализа коэффициенты продольной дисперсии позволяют выполнять анализ времени проветривания протяженных тупиковых выработок. На основе полученной модели ведется усовершенствование алгоритма расчета [8] скорости распространения в вентиляционной сети рудника продуктов горения при аварийных ситуациях, а также уточнение коэффициента продольной дисперсии для различных условий ведения работ.

Выводы

В результате проведения исследования взрывных работ в выработках РШ-26-20-1 и РВ-1 на основе полученных экспериментальных данных определены фактическое время проветривания тупиковой горной выработки и объем выделившихся окислов углерода СО_x. Полученные результаты проанализированы на предмет соответствия общему количеству газа, выделяющемуся после взрывных работ в зависимости от типа и количества применяемого взрывчатого вещества.

На основе полученных графиков изменения концентраций ядовитых газов по длине выработки РВ-1 построена и откалибрована математическая модель динамики газовой смеси с учетом конвективно-диффузионного переноса. На основе экспериментальных данных определены коэффициенты продольной дисперсии, эффективности проветривания и объемная концентрация рассматриваемой газовой примеси в зоне перемешивания в начальный момент времени для выработки РВ-1. В результате моделирования определено время проветривания тупиковой выработки при её дальнейшем развитии.

Список литературы

1. Гришин Е.Л. Газовый режим в современной концепции рудничной вентиляции. *Горное эхо*. 2021;(4):101–104. <https://doi.org/10.7242/echo.2021.4.20>
2. Ушаков К.З., Бурчаков А.С., Пучков Л.А., Медведев И.И. *Аэрология горных предприятий*. М.: Недра; 1987. 420 с.
3. Дубнов Л.В., Бахареви́ч Н.С., Романов А.И. *Промышленные взрывчатые вещества*. 3-е изд. М.: Недра; 1988. 358 с.
4. Ганапольский М.И., Барон В.Л., Белин В.А. и др. *Методы ведения взрывных работ. Специальные взрывные работы*. Учебное пособие. М.: Издательство Московского государственного горного университета; 2007. 563 с.
5. Гушин В.И. *Задачник по взрывным работам*. М.: Недра; 1990. 174 с.
6. Семин М.А., Исаевич А.Г., Трушкова Н.А. и др. К вопросу о расчете распространения вредных примесей в системах горных выработок. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2022;(2):82–93. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20220208>



7. Widiatmojo A., Sasaki K., Widodo N.P., Sugai Y. Numerical simulation to evaluate gas diffusion of turbulent flow in mine ventilation system. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2013;23(3):349–355. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2013.05.004>
8. Левин Л.Ю., Кормишиков Д.С., Семин М.А. Решение задачи оперативного расчета распределения продуктов горения в сети горных выработок. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2013;(12):179–184. URL: https://giab-online.ru/files/Data/2013/12/179-184_Levin_-_6_str.pdf
9. Венгеров И.Р. *Теплофизика шахт и рудников. Математические модели. Т. 1. Анализ парадигмы*. Донецк: Норд-пресс; 2008. 632 с.
10. Vardy A.E., Brown J.M.B. Transient turbulent friction in smooth pipe flows. *Journal of Sound and Vibration*. 2003;259(5):1011–1036. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2002.5160>
11. Zhou A., Wang K. A transient model for airflow stabilization induced by gas accumulations in a mine ventilation network. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2017;47:104–109. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.02.014>
12. Arpa G., Widiatmojo A., Widodo N.P., Sasaki K. Tracer gas measurement and simulation of turbulent diffusion in mine ventilation airways. *Journal of Coal Science and Engineering (China)*. 2008;14(4):523–529. <https://doi.org/10.1007/s12404-008-0401-x>
13. Kim D.Y., Lee S.H., Jeong K.H., Lee C.W. Study on the turbulent diffusion coefficients of contaminants in an underground limestone mine with large cross section using tracer gas. *Geosystem Engineering*. 2013;16(2):183–189. <https://doi.org/10.1080/12269328.2013.806051>
14. Колесов Е.В., Казаков Б.П. Эффективность проветривания тупиковых подготовительных выработок после взрывных работ. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020;(7):15–23. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/7/2715>
15. Воронин В.Н. *Основы рудничной аэрогазодинамики*. М.-Л.: Углетехиздат; 1951. 491 с.
16. Isaevich A., Semin M., Levin L. et al. Study on the dust content in dead-end drifts in the potash mines for various ventilation modes. *Sustainability*. 2022;14(5):3030. <https://doi.org/10.3390/su14053030>
17. Воеводин А.Ф., Гончарова О.Н. Метод расщепления по физическим процессам для расчета задач конвекции. *Математическое моделирование*. 2001;13(5):90–96. URL: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=mm&paperid=717&option_lang=rus
18. Накаряков Е.В., Семин М.А., Гришин Е.Л., Колесов Е.В. Анализ закономерностей накопления и выноса выхлопных газов от машин с ДВС в тупиковых камерообразных горных выработках. *Безопасность труда в промышленности*. 2021;(5):41–47. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2021-5-41-47>

References

1. Grishin E.L. Gas behavior in the modern concept of mine ventilation. *Gornoe Ekho*. 2021;(4):101–104. <https://doi.org/10.7242/echo.2021.4.20>
2. Ushakov K.Z., Burchakov A.S., Puchkov L.A., Medvedev I.I. *Aerology of mining enterprises*. Moscow: Nedra Publ.; 1987. 420 p. (In Russ.)
3. Dubnov L.V., Bakharevich N.S., Romanov A.I. *Industrial explosives*. 3rd ed. Moscow: Nedra Publ.; 1988. 358 p. (In Russ.)
4. Ganapolsky M.I., Baron V.L., Belin V.A., et al. *Methods of blasting operations. Special blasting operations*. Textbook. Moscow: Moscow State Mining University Publ.; 2007. 563 p. (In Russ.)
5. Gushin V.I. *Set of problems on blasting*. Moscow: Nedra Publ.; 1990. 174 p. (In Russ.)
6. Semin M.A., Isaevich A.G., Trushkova N.A. et al. Calculating dispersion of air pollutants in mines. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2022;(2):82–93. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FTPRI20220208>
7. Widiatmojo A., Sasaki K., Widodo N.P., Sugai Y. Numerical simulation to evaluate gas diffusion of turbulent flow in mine ventilation system. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2013;23(3):349–355. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2013.05.004>
8. Levin L.Yu., Kormishchikov D.S., Semin M.A. Rapid determination of combustion gas distribution in mine workings. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2013;(12):179–184. (In Russ.) URL: https://giab-online.ru/files/Data/2013/12/179-184_Levin_-_6_str.pdf
9. Vengerov I.R. *Thermophysics of underground mines and open pits. Mathematical models. Vol. 1. Paradigm analysis*. Donetsk: Nord-Press Publ.; 2008. 632 p.
10. Vardy A.E., Brown J.M.B. Transient turbulent friction in smooth pipe flows. *Journal of Sound and Vibration*. 2003;259(5):1011–1036. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2002.5160>
11. Zhou A., Wang K. A transient model for airflow stabilization induced by gas accumulations in a mine ventilation network. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2017;47:104–109. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.02.014>



12. Arpa G., Widiatmojo A., Widodo N.P., Sasaki K. Tracer gas measurement and simulation of turbulent diffusion in mine ventilation airways. *Journal of Coal Science and Engineering (China)*. 2008;14(4):523–529. <https://doi.org/10.1007/s12404-008-0401-x>
13. Kim D.Y., Lee S.H., Jeong K.H., Lee C.W. Study on the turbulent diffusion coefficients of contaminants in an underground limestone mine with large cross section using tracer gas. *Geosystem Engineering*. 2013;16(2):183–189. <https://doi.org/10.1080/12269328.2013.806051>
14. Kolesov E.V., Kazakov B.P. Efficiency of ventilation of dead-end development headings after blasting operations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020;(7):15–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/7/2715>
15. Voronin V.N. *Fundamentals of Mine Aerogasdynamics*. Moscow-Leningrad: Ugletekhizdat Publ.; 1951. 491 p. (In Russ.)
16. Isaevich A., Semin M., Levin L. et al. Study on the dust content in dead-end drifts in the potash mines for various ventilation modes. *Sustainability*. 2022;14(5):3030. <https://doi.org/10.3390/su14053030>
17. Voevodin A.F., Goncharova O.H. Method of splitting into physical processes for numerical investigation of convection problem. *Matematicheskoe Modelirovanie*. 2001;13(5):90–96. (In Russ.) URL: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=mm&paperid=717&option_lang=rus
18. Nakaryakov E.V., Semin M.A., Grishin E.L., Kolesov E.V. Analysis of the regularities of accumulation and removal of the exhaust gases from the combustion-engined vehicles in the dead-end chamber-like mine workings. *Occupational Safety in Industry*. 2021;(5):41–47. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2021-5-41-47>

Информация об авторах

Дмитрий Владимирович Ольховский – инженер, лаборатория развития горного производства, Горный институт Уральского отделения РАН, г. Пермь, Российская Федерация; Scopus ID [57225125993](#); e-mail demexez@gmail.com

Олег Сергеевич Паршаков – кандидат технических наук, лаборатория развития горного производства, Горный институт Уральского отделения РАН, г. Пермь, Российская Федерация; Scopus ID [57202379375](#); e-mail olegparshakov@gmail.com

Сергей Анатольевич Бублик – инженер, лаборатория математического моделирования геотехнических процессов, Горный институт Уральского отделения РАН, г. Пермь, Российская Федерация; Scopus ID [57223084283](#); e-mail serega-bublik@mail.ru

Information about the authors

Dmitriy V. Olkhovskiy – Engineer, Mining Production Development Laboratory, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; Scopus ID [57225125993](#); e-mail demexez@gmail.com

Oleg S. Parshakov – Cand. Sci. (Eng.), Researcher, Mining Production Development Laboratory, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; Scopus ID [57202379375](#); e-mail olegparshakov@gmail.com

Sergey A. Bublik – Engineer, Laboratory of Mathematical Modeling of Geotechnical Processes, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; Scopus ID [57223084283](#); e-mail serega-bublik@mail.ru

Поступила в редакцию 04.08.2022
Поступила после рецензирования 04.10.2022
Принята к публикации 31.10.2022

Received 04.08.2022
Revised 04.10.2022
Accepted 31.10.2022



ГОРНЫЕ МАШИНЫ, ТРАНСПОРТ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-11-34>

УДК 622.625.6

**Влияние условий эксплуатации шахтных монорельсовых локомотивов на долговечность полимерных ободьев приводных колес**Е. М. Арефьев¹ , К. А. Рябко²  ¹ Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация² Ростовский государственный университет путей сообщения (филиал в г. Воронеж), г. Воронеж, Российская Федерация elcross@mail.ru**Аннотация**

Увеличение темпов добычи угля и снижение ее себестоимости может быть обеспечено путем комплексной механизации и автоматизации системы шахтного вспомогательного транспорта за счет широкого внедрения подвесных монорельсовых дорог. Перспективность использования шахтных монорельсовых дорог обусловлена низким коэффициентом тары состава; снижением площади сечения выработок за счет вынесения вспомогательного транспорта в верхнюю часть выработок; высокой безопасностью эксплуатации; возможностью демонтажа дороги на неиспользуемых участках и последующего монтажа в новых выработках. Использование обрешеченных роликов в приводе шахтных монорельсовых локомотивов позволяет повысить коэффициент сцепления колеса с монорельсом, снизить динамические нагрузки и уровень шума в процессе эксплуатации. Целью исследований является оценка долговечности полимерных ободьев приводных колес шахтных монорельсовых локомотивов с учетом условий их эксплуатации. Получено распределение напряжений по пятну контакта обода колеса с монорельсом, что позволит разработать мероприятия по повышению срока службы приводных колес шахтных монорельсовых локомотивов. Установлено, что влияние деформации монорельсового пути не оказывает существенного влияния на долговечность ободьев приводных колес шахтных монорельсовых локомотивов. Получена математическая модель для определения долговечности полимерных ободьев приводных колес с учетом максимальных динамических усилий, возникающих при контакте приводных колес с монорельсом. Проведена оценка долговечности полимерных ободьев колес шахтных монорельсовых локомотивов в соответствии с критерием Бейли с учетом максимальных значений динамических контактных нагрузок, возникающих при движении монорельсового состава. Установлено, что увеличение массы тележки с 20 до 47 кН приводит к снижению долговечности обода приводного колеса монорельсового локомотива на 32 % (с 8700 до 5900 ч).

Ключевые слова

шахтная монорельсовая дорога, монорельсовый локомотив, долговечность, срок службы, привод, полимерный обод, подвесной монорельс, ходовая тележка, динамические нагрузки

Для цитирования

Arefiev E. M., Ryabko K. A. Effect of operating conditions of mine monorail locomotives on the durability of drive wheel polymeric rims. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):59–67. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-11-34>

MINING MACHINERY, TRANSPORT, AND MECHANICAL ENGINEERING

Research paper

Effect of operating conditions of mine monorail locomotives on the durability of drive wheel polymeric rimsE. M. Arefiev¹ , K. A. Ryabko²  ¹ Saint Petersburg State Institute of Technology, Saint Petersburg, Russian Federation² Rostov State University of Railway Transport (Voronezh Branch), Voronezh, Russian Federation elcross@mail.ru**Abstract**

An increase in the rate of coal mining and a reduction of its prime cost can be ensured by comprehensive mechanization and automation of the system of mine auxiliary transport through the widespread introduction of overhead monorail tracks. The potential use of mine monorail tracks are conditioned by the following factors: low payload ratio of the train; reduction of the mine workings cross-section area due to transfer of



auxiliary transport to the upper part of the workings; high operational safety; as well as the possibility of dismantling the track in the unused sections and subsequently installing it in new mine workings. The use of rubberized rollers in the drives of mine monorail locomotives enables the coefficient of adhesion of the wheel with the monorail to be increased. It also reduces dynamic loads and the noise level during operation. The purpose of this research is to assess the durability of polymeric rims of drive wheels for mine monorail locomotives, taking into account their operating conditions. Stress distribution over the contact area of the wheel rim with the monorail was determined, enabling the development of measures to increase the service life of drive wheels of mine monorail locomotives to be developed. It was established that the effect of the monorail track deformation has no significant impact on the durability of drive wheel rims of mine monorail locomotives. A mathematical model was obtained to determine the durability of drive wheel polymeric rims, taking into account the maximum dynamic forces arising during the contact of drive wheels with the monorail. The durability of wheel polymeric rims of mine monorail locomotives was assessed in accordance with the Bailey criterion with regard to the maximum values of dynamic contact loads arising during the monorail train movement. It was also established that an increase in the carriage mass from 20 to 47 kN leads to 32 % less durability of a monorail locomotive drive wheel rim (from 8700 to 5900 hours).

Keywords

mine monorail track, monorail locomotive, durability, service life, drive, polymeric rim, overhead monorail, undercarriage, dynamic loads

For citation

Arefiev E.M., Ryabko K.A. Effect of operating conditions of mine monorail locomotives on the durability of drive wheel polymeric rims. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):59–67. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-11-34>

Введение

Одним из направлений увеличения добычи угля является повышение производительности труда. В связи с этим большое значение приобретает комплексная механизация и автоматизация системы шахтного вспомогательного транспорта за счет широкого внедрения подвесных монорельсовых дорог.

Перспективность использования шахтных монорельсовых дорог обусловлена рядом существенных достоинств этого вида транспорта: низкий коэффициент тары состава; вынесение вспомогательного транспорта в верхнюю часть выработок, что позволяет существенно снизить площадь их сечения, а значит и капитальные затраты на их сооружение; высокая безопасность эксплуатации как на больших, так и на малых скоростях; простота автоматизации; возможность демонтажа дороги на неиспользуемых участках и последующего монтажа в новых выработках.

Использование обрешиненных роликов в приводе шахтных монорельсовых локомотивов позволяет повысить коэффициент сцепления с монорельсом, снизить динамические нагрузки и уровень шума в процессе эксплуатации. Таким образом, вопрос влияния условий эксплуатации шахтных монорельсовых локомотивов на долговечность полимерных ободьев приводных колес является актуальным.

Обзор исследований и публикаций

Проектированию и модернизации приводов шахтных монорельсовых локомотивов посвящен ряд работ научно-исследовательских и проектных организаций. Методики расчета основных параметров и условий работы приводных колес шахтных подвесных монорельсовых локомотивов, рассматриваемые в научных публикациях, не в полной мере отражают влияние взаимодействия приводных колес с монорельсом на их долговечность. Синтез универсальных

методик по влиянию условий эксплуатации шахтных монорельсовых локомотивов на долговечность полимерных ободьев приводных колес представляет собой весьма сложную научную задачу. Выполненный анализ расчетно-теоретических основ, направленных на разработку приводов подвесных монорельсовых локомотивов, свидетельствует о необходимости оценки влияния их условий эксплуатации на долговечность полимерных ободьев приводных колес.

Результаты исследований процесса качения тяговых колес с целью повышения тягового усилия при движении по уклонам представлены в работе [1]. Авторы обосновывают возможность повышения касательной силы тяги путем повышения коэффициента сцепления между колесами и монорельсом за счет изготовления тяговых колес из фрикционных материалов. Однако в данной работе не рассматриваются вопросы оценки долговечности полимерных ободьев приводных колес.

Конструкция привода шахтных локомотивов, обеспечивающая повышенные тяговые и тормозные характеристики за счет использования дополнительных обрешиненных катков, кинематически связанных с приводными колесами, предлагается в работе [2]. Использование фрикционных материалов для футеровки катков позволяет увеличить тяговое усилие и коэффициент сцепления до 0,35...0,45 и сократить тормозной путь. Приведенные исследования относятся к тягово-тормозным свойствам монорельсовых локомотивов, но не охватывают весьма актуальную задачу исследования влияния на долговечность повышения коэффициента сцепления дополнительных обрешиненных катков с монорельсом.

Результаты исследований процесса взаимодействия приводной тележки с монорельсом, проведенные с использованием оригинальной имитационной модели, представлены в работах [3, 4]. Произведена



оценка дополнительных деформаций монорельсового пути за счет инерционных составляющих, возникающих в процессе движения монорельсового состава, определены максимальные динамические нагрузки, возникающие в системе «тележка–рельс». Основные положения рассмотренной работы не отражают влияния динамических нагрузок на приводные колеса.

Вопросам моделирования нагрузок и обоснованию конструктивных параметров упругих эластичных элементов, обоснованию геометрических параметров резино-полимерных приводных барабанов ленточного конвейера, прогнозированию сложного разрушения резиновых материалов, а также влиянию повышенных скоростей движения монорельсовых локомотивов на динамические параметры системы локомотив–монорельс, посвящены достаточно значимые работы. А именно, в работе [5] выполнено моделирование нагрузок, возникающих в резинокордной упругой муфте. Получена эпюра эквивалентных напряжений эластичного элемента. Данные результаты справедливы для резинокордных элементов, работающих на сдвиг, что не учитывает характер нагружения приводных колес шахтных монорельсовых локомотивов. В работе [6] описаны усилия, возникающие в резиновых футеровках приводных барабанов ленточного конвейера. Выполнена симуляция напряженно-деформированного состояния цифровых твердотельных моделей. В работе [7] приведена комплексная методика определения характеристик разрушения резины. Предложенная методика позволяет проводить количественную оценку прочности резин в зависимости от приложенных механических воздействий, но не в полной мере учитывает особенности нагружения ободьев приводных колес шахтных монорельсовых локомотивов. В работах [8, 9] представлены результаты численного моделирования воздействий локомотива на подвесную монорельсовую дорогу, которые направлены на повышение безопасности движения шахтных монорельсовых локомотивов. Однако полученные модели не учитывают влияния динамических нагрузок на ходовую часть тяговых тележек.

Основные положения рассмотренных работ не определяют в полной мере влияния условий эксплуатации шахтных монорельсовых локомотивов на долговечность полимерных ободьев приводных колес, поэтому требуют дополнений и уточнений.

Работа колесного привода шахтного подвесного монорельсового локомотива характеризуется многими параметрами: образованием силы тяги, созданием необходимого коэффициента сцепления колеса с монорельсом, восприятием знакопеременных динамических воздействий от неровностей пути, влиянием тормозных усилий и состоянием поверхностей взаимодействия монорельса и приводных колес. Все эти параметры достаточно хорошо исследованы для наземных автомобильных и железнодорожных транспортных средств, но не отображают в полной мере обобщающей оценки влияния условий эксплуатации шахтных монорельсовых локомотивов на долговечность полимерных ободьев приводных колес.

Цель исследований

При движении приводных колес шахтного монорельсового локомотива полимерные ободья приводных колес испытывают периодические контактные напряжения, обусловленные контактом элементов обода с монорельсом. Определение долговечности обода в зависимости от условий эксплуатации позволит определить его экономически обоснованные параметры. Таким образом, оценка долговечности полимерных ободьев приводных колес шахтных монорельсовых локомотивов представляет научный и практический интерес.

Методология исследований

Исследования по определению влияния условий эксплуатации шахтных монорельсовых локомотивов на долговечность полимерных ободьев приводных колес проводились с использованием методов дифференциального и интегрального исчисления, математического анализа и графической интерпретации.

Долговечность полимерных и резиновых ободьев приводных колес монорельсовых дорог при динамических контактных нагрузках может быть определена в соответствии с критерием Бейли [10]:

$$N \int_0^{\Theta} \frac{dt}{L(\sigma, T)} = 1, \quad (1)$$

где N – число импульсов до разрушения; $L = L(\sigma, T)$ – долговечность резинотехнических и полимерных изделий при статическом режиме нагружения; σ – закон изменения напряжения; T – абсолютная температура материала обода (температура рудничной атмосферы); $\Theta = l_k / V$ – длительность импульса (время контакта фрагмента обода с монорельсом); V – средняя скорость движения состава; здесь l_k – длина пятна контакта обода с монорельсом (рис. 1), определяется по формуле Герца [11]:

$$l_k = \sqrt{\frac{4F_d r_{np}}{\pi E_{np}}}, \quad (2)$$

где F_d – сила контактного взаимодействия колеса тележки монорельсового локомотива и монорельса; E_{np} – приведенный модуль упругости:

$$E_{np} = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2},$$

где E_1, E_2 – модули упругости обода колеса и монорельса соответственно; r_{np} – приведенный радиус кривизны,

$$\frac{1}{r_{np}} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2},$$

где r_1, r_2 – радиусы кривизны обода колеса и монорельса.

При движении тележки с постоянной скоростью V монорельсовый путь прогибается в вертикальной плоскости на величину z под действием массы тележки m . Этот прогиб обусловлен действиями как статической нагрузки, так и вертикальными силами инерции (рис. 2).

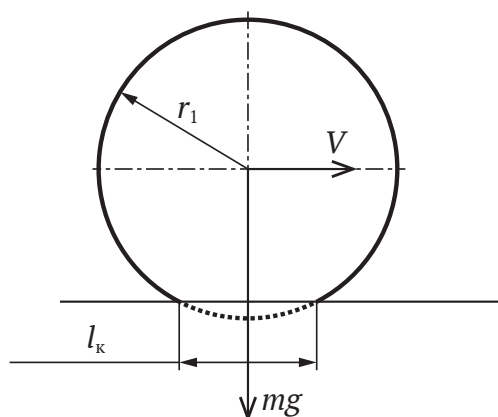


Рис. 1. К вопросу определения длины пятна контакта обода колеса с монорельсом

Масса тележки с грузом значительно больше массы секции монорельсового пути, поэтому массой монорельса можно пренебречь. Силу, с которой тележка действует на монорельс, можно представить зависимостью:

$$F_d = mg - m \frac{d^2 z}{dt^2}.$$

С учетом того что координата $x = Vt$:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{dz}{dx} \frac{dx}{dt} = V \frac{dz}{dx}.$$

Отсюда

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = V^2 \frac{d^2 z}{dx^2}. \quad (3)$$

С учетом уравнения (3) сила, с которой тележка действует на монорельс:

$$F_d = m \left(g - V^2 \frac{d^2 z}{dx^2} \right). \quad (4)$$

Монорельс можно рассматривать как балку (см. рис. 2), работающую на изгиб, тогда прогиб балки можно описать уравнением:

$$z(x) = \frac{F_d}{E_2 J} \frac{x(L-x)^2}{3L},$$

где L – расстояние между подвесами монорельсового пути (длина секции); J – момент инерции поперечного сечения монорельса.

С учетом уравнения (4) получим:

$$z(x) = m \left(g - V^2 \frac{d^2 z}{dx^2} \right) \frac{x^2(L-x)}{3LE_2 J}. \quad (5)$$

Максимальная динамическая нагрузка при контакте колес с монорельсом будет возникать в середине пролета между подвесами монорельсового пути $L = x/2$, тогда с учетом формулы (5) получим:

$$F_{d_{\max}} = mg \left(1 - V^2 \frac{mL}{3EJ} \right). \quad (6)$$

Монорельс для современных шахтных монорельсовых дорог изготавливается из двутавра стального горячекатаного с высотой профиля 160 мм и следующими характеристиками: $E_2 = 20,6 \cdot 10^7$ кН/м² и $J = 8,72 \cdot 10^{-6}$ м⁴.

Согласно исследованиям [3, 12] максимальные динамические усилия, возникающие при контакте монорельса с приводным колесом, в зависимости от массы тележки изменяются от 20 до 47 кН, а максимальный продольный изгиб – от 7 до 15 мм (табл. 1).

Долговечность материала обода при статическом режиме нагружения [13–15]:

$$L(\sigma) = \tau_0 \ln \left(\frac{\Delta p_{\infty}}{\Delta p_{\text{кр}} - \Delta p_{\text{пр}}} \right) \exp \left(\frac{U_0 - \gamma \sigma}{k' T} \right), \quad (7)$$

где τ_0 – период колебаний атомов в молекулах; Δp_{∞} – приращение накопления перенапряжений связей, обусловленных тепловыми флуктуациями; $\Delta p_{\text{кр}}$ – критическая концентрация накоплений перенапряжений связей; U_0 – энергия активации разрыва химических связей материала обода; k' – постоянная Больцмана; γ – структурно-чувствительный параметр [16, 17].

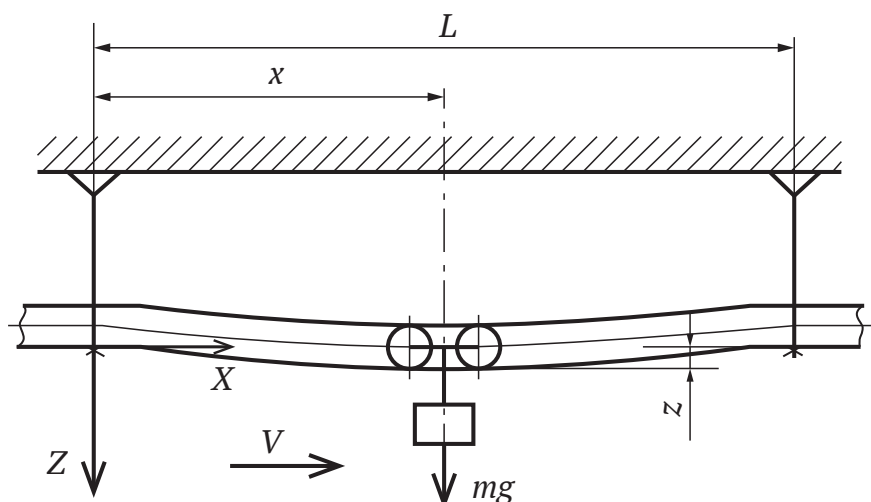


Рис. 2. Схема деформации подвешенного монорельсового пути под движущейся тележкой



Таблица 1

Максимальные динамические усилия, возникающие при контакте монорельса с приводным колесом, и значения максимального продольного изгиба монорельса в зависимости от массы тележки

Масса тележки m , т	Максимальные динамические усилия $F_{д\max}$, кН	Максимальный продольный изгиб монорельса $z_{\max}$, мм
2	20	6,3
2,5	25	7,5
4	42	13
4,5	47	15

Как правило, шахтная монорельсовая локомотивная откатка используется для транспортировки вспомогательных грузов в рамках одного выемочного горизонта, где температура рудничной атмосферы практически постоянна. С учетом этого влиянием изменения температуры на долговечность обода можно пренебречь.

Напряжение в контакте двух цилиндрических поверхностей можно определить по формуле Герца. С учетом максимальных динамических усилий, возникающих при контакте монорельса с приводным колесом, в резиновом или полимерном ободе возникает напряжение, среднее значение которого по пятну контакта:

$$\sigma_{cp} = \sqrt{\frac{E_{пр} E_{д\max}}{\pi(1-\mu^2)r_{пр}B}}, \quad (8)$$

где μ – коэффициент Пуассона материала обода; B – ширина колеса.

Изменение импульсов напряжения во времени хорошо описывается параболой вида:

$$\sigma(t) = A_1 t^2, \quad (9)$$

где A_1 – коэффициент, определяемый формой импульса напряжения.

Коэффициент A_1 можно определить с учетом среднего значения напряжения (8) и длительности цикла Θ контакта фрагмента обода колеса с монорельсом:

$$A_1 = \frac{3\sigma_{cp}}{\Theta^3}.$$

Предположим, что монорельс прогибается по дуге окружности. Тогда радиус дуги при нахождении тележки в середине пролета можно определить следующей зависимостью:

$$r_2 = \frac{L^2}{8z_{\max}} + \frac{z_{\max}}{2}.$$

При этом в местах подвески монорельса к секциям крепи (см. рис. 2) участки монорельса можно считать горизонтальными, $r_2 \rightarrow \infty$.

Результаты расчетов показывают, что количество циклов до разрушения при нахождении тележки в местах подвески монорельса ($r_2 \rightarrow \infty$) и в середине пролета

$$(r_2 = \frac{L^2}{8z_{\max}} + \frac{z_{\max}}{2})$$

отличается не более чем на 1 %. Данное заключение получено на основании расчетов, выполненных по уравнению (1), с учетом долговечности резинотехнических и полимерных изделий при статическом режиме нагружения L .

Это позволяет сделать вывод о том, что при расчетах на долговечность ободьев приводных колес шахтных монорельсовых локомотивов влияние прогиба монорельса можно не учитывать.

С учетом уравнений (1), (7) и (9) можем определить долговечность обода T_o , ч:

$$T_o = \frac{1,74 \cdot 10^{-3}}{V \int_0^{\Theta} \frac{dt}{\tau_0 \ln\left(\frac{\Delta p_{\infty}}{\Delta p_{кр}}\right) \exp\left(\frac{U_0 - \gamma \sigma(t)}{k'T}\right)}}. \quad (10)$$

По результатам моделирования рабочего процесса взаимодействия тележки с подвесным монорельсом [3, 18, 19] получен диапазон значений максимальных динамических усилий, возникающих при контакте монорельса с приводным колесом, который составил 20...47 кН на тележку. При этом на одно колесо тележки, соответственно, приходится нагрузка $F_{д\max} = 10 \cdot 10^3 \dots 2,35 \cdot 10^5$ Н. Для этого диапазона контактных усилий обод может воспринять от $1,1 \cdot 10^7$ до $6,7 \cdot 10^6$ взаимодействий.

С использованием уравнения (10) получена графическая зависимость долговечности обода колеса от нагрузки (рис. 3), которая представляет собой гиперболическую зависимость для следующих условий: $F_{д\max} = 10 \dots 23$ кН; $T = 305,15$ К; $V = 3$ м/с; $r_1 = 0,08$ м; $B = 0,04$ м.

Анализ полученных зависимостей показывает, что при увеличении массы тележки с 20 до 47 кН долговечность полимерных ободьев шахтных монорельсовых локомотивов снижается на 32 % (с 8700 до 5900 ч).

Формирование импульсов напряжения определяется сложным характером взаимодействия обода колеса с монорельсом, а также скоростью состава и текущим расстоянием от места подвески монорельса к секциям крепи до тележки [3, 20, 21], что усложняет получение аналитической зависимости, описывающей величину импульсов напряжения. В то же время форма импульсов достаточно хорошо описывается параболоидом вида:

$$\sigma(x', y') = A_2(x')^2 + B_2(y')^2,$$

где A_1, B_1 – коэффициенты, определяемые формой импульса напряжения. Коэффициент $B_1 = l_k$, учитывая соотношение длины и ширины пятна контакта обода с монорельсом, $A_2 = 1/2 B_2$; x', y' – относительные размеры пятна контакта обода колеса с монорельсом.

На основании расчетных зависимостей получено распределение напряжений по пятну контакта обода колеса с монорельсом, которое имеет вид эллиптического параболоида (рис. 4). Полученная графическая

интерпретация напряжений свидетельствует, что максимальные напряжения сконцентрированы в вершине параболоида.

Поскольку долговечность материала обратно пропорциональна напряжениям, то наибольшему износу будет подвержена поверхность обода вдоль линии, проходящей через середины его образующих.

Практическое применение

На основании представленных выше зависимостей получен алгоритм определения параметров приводных колес монорельсовых локомотивов (радиуса колеса и материала обода) для обеспечения требуемой долговечности $T_{тр}$ их ободьев (рис. 5).

В алгоритме учитываются параметры монорельсового пути и локомотива, что позволяет определить максимальные контактные динамические усилия в полимерном ободу приводных колес. С помощью приведенной методики можно определить параметры формы изменения импульса напряжения во времени, а также рассчитать долговечность обода с учетом параметров рудничной атмосферы и его материала.

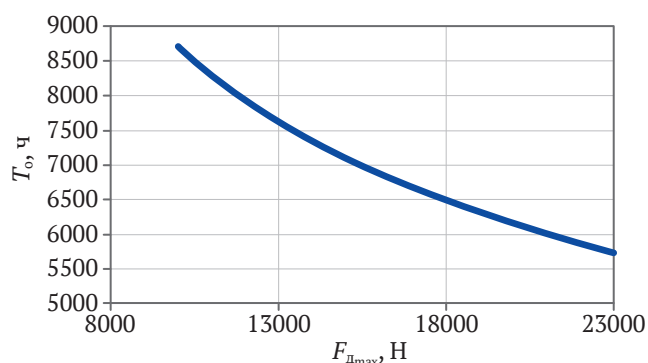


Рис. 3. Зависимость долговечности ободьев приводных колес монорельсового локомотива от силы, приходящейся на одно колесо

Полученные результаты могут быть использованы как в процессе разработки технических заданий и проектирования приводных колес шахтных монорельсовых локомотивов, так и в исследованиях, направленных на совершенствование конструкции приводов подвижного состава подвесной монорельсовой дороги. Также приведенные алгоритм и методика расчета могут быть полезны инженерно-техническим работникам горных предприятий, занимающихся вопросами долговечности и повышения эксплуатационных характеристик ходовых частей шахтных монорельсовых локомотивов.

Выводы и направление дальнейших исследований

Получена математическая модель для определения долговечности полимерных ободьев приводных колес с учетом максимальных динамических усилий, возникающих при контакте приводных колес с монорельсом. Установлено, что влияние деформации монорельсового пути не оказывает существенного влияния на долговечность ободьев приводных колес шахтных монорельсовых локомотивов.

Разработан алгоритм определения параметров приводных колес монорельсовых локомотивов для обеспечения требуемой долговечности $T_{тр}$ их ободьев.

Произведен расчет долговечности полимерных ободьев колес шахтных монорельсовых локомотивов с учетом динамических нагрузок, возникающих при движении монорельсового состава. Получено распределение напряжений по пятну контакта обода колеса с монорельсом, что позволит разработать мероприятия по повышению срока службы колес шахтных монорельсовых локомотивов. Увеличение массы тележки с 20 до 47 кН приводит к снижению долговечности обода приводного колеса монорельсового локомотива на 32 % (с 8700 до 5900 ч). Дальнейшие исследования будут направлены на разработку комплексной модели для оценки долговечности привода шахтных монорельсовых локомотивов.

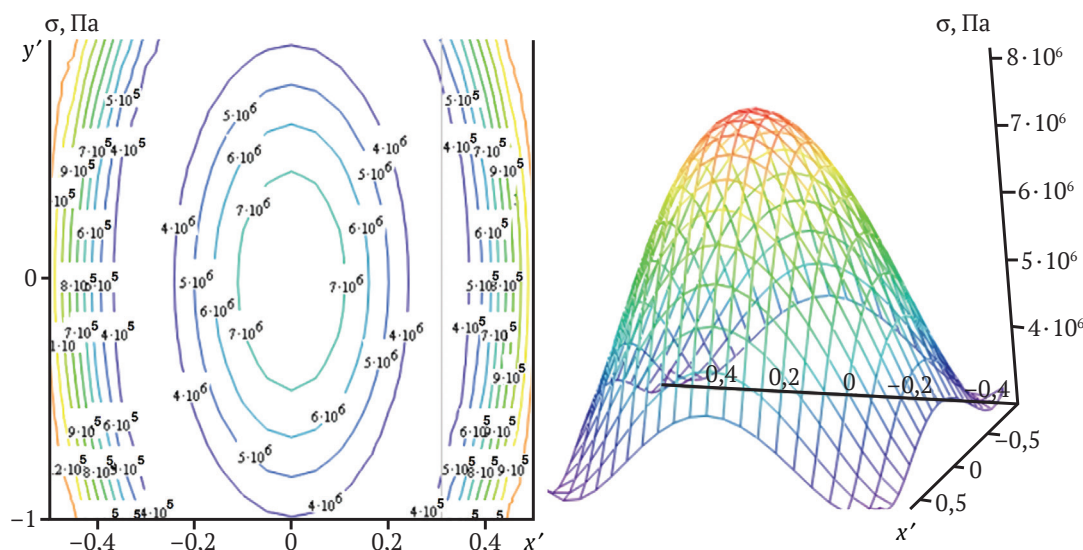


Рис. 4. Распределение напряжений по пятну контакта обода колеса с монорельсом: y' , x' – относительные размеры пятна контакта

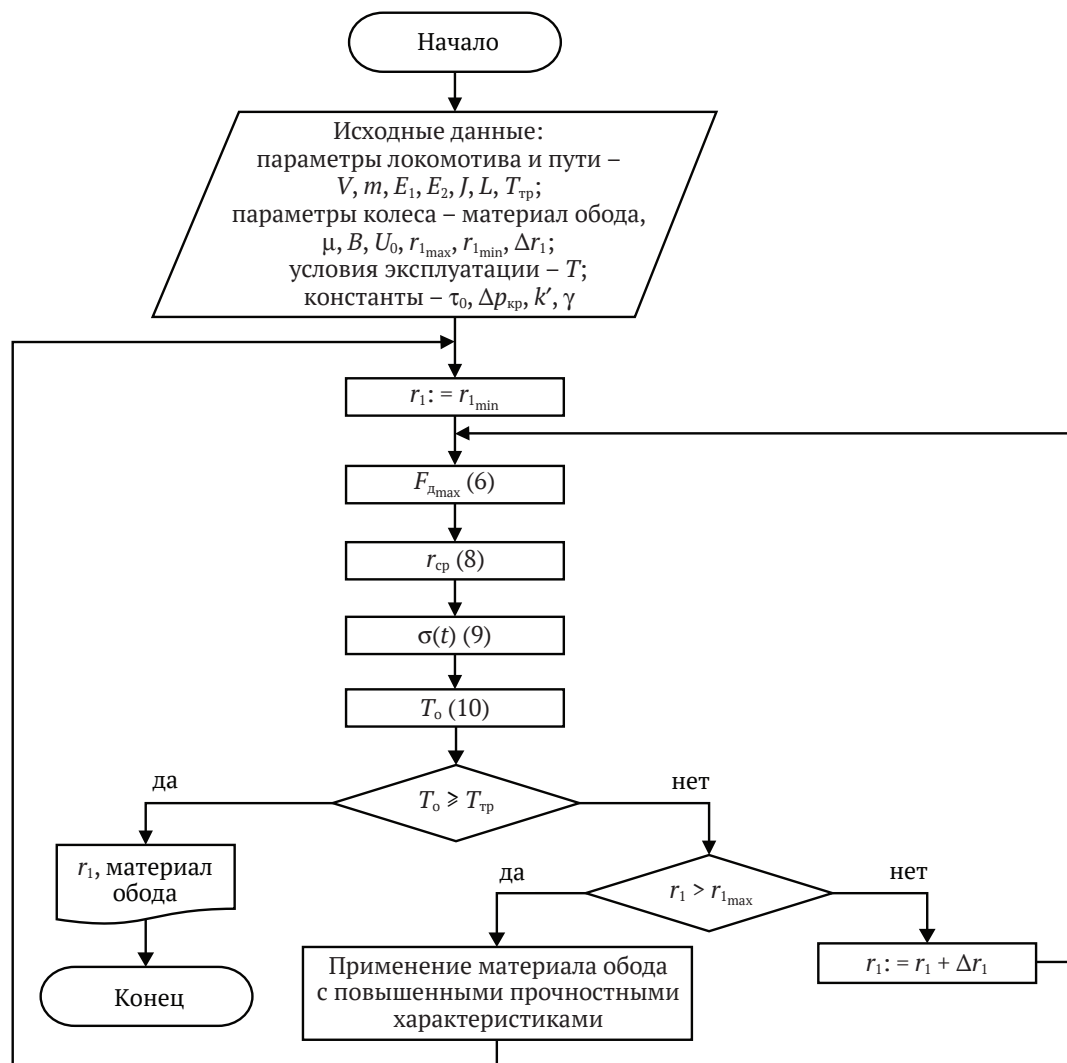


Рис. 5. Алгоритм определения параметров приводных колес монорельсовых локомотивов для обеспечения требуемой долговечности $T_{тр}$ их ободьев

Список литературы

1. Кольга А.Д., Аглиуллин А.С. Железнодорожный транспорт горных предприятий: пути повышения эффективности. *Горное оборудование и электромеханика*. 2016;(5):23–28.
2. Александров С.Н., Бережинский В.И., Будишевский В.А., Мельников С.А. Создание шахтных локомотивов для доставки грузов по путям с невыдержанным и завышенным профилем. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009;(16):215–229.
3. Гутаревич В.О. Динамическая нагруженность монорельсовых тележек и подвешного пути. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2015;(4):85–88. <https://doi.org/10.17213/0321-2653-2015-4-85-88>
4. Гутаревич В.О., Кондрахин В.П. Снижение динамических нагрузок от действия подвесных монорельсовых дорог на крепь горных выработок. *Вестник Донецкого национального технического университета*. 2016;(6):7–11.
5. Мележик Р.С., Власенко Д.А. Моделирование нагрузки и обоснование конструктивных параметров упругой пальцевой муфты с эластичным элементом дискового типа. *Горные науки и технологии*. 2021;6(2):128–135. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-128-135>
6. Зиборова Е.Ю., Мнацаканян В.У. Обоснование геометрических параметров футеровочных пластин приводного барабана ленточного конвейера. *Горные науки и технологии*. 2022;7(2):170–179. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-2-170-179>
7. Stoček R., Stěnička M., Zádřapa P. Future trends in predicting the complex fracture behaviour of rubber materials. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 2021;33(2):291–305. <https://doi.org/10.1007/s00161-020-00887-z>



8. Szewerda K., Tokarczyk J., Wiecezorek A. Impact of increased travel speed of a transportation set on the dynamic parameters of a mine suspended monorail. *Energies*. 2021;14(6):1528. <https://doi.org/10.3390/en14061528>
9. Herbus K., Szewerda K., Swider J. Virtual prototyping of the suspended monorail in the aspect of increasing the permissible travel speed in hard coal mines. *Eksploatacja i Niezawodność*. 2020;4:610–619. <https://doi.org/10.17531/ein.2020.4.4>
10. Кондрахин В.П., Арефьев Е.М., Хиценко Н.В. Оценка влияния виброочистки на срок службы конвейерной ленты. *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*. 2012;(57):292–295.
11. Александров В.М., Чебаков М.И. *Введение в механику контактных взаимодействий*. Ростов-на-Дону: ООО «ЦВВР»; 2007. 114 с.
12. Рябко К.А., Гутаревич В.О. Обоснование технико-экономических показателей шахтных монорельсовых локомотивов. *Горные науки и технологии*. 2021;6(2):136–143. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-136-143>
13. Водолаская Н.В., Шевченко Д.А. Проблема повышения долговечности деталей машин, эксплуатируемых в агрессивных средах. В кн.: *Машиностроение Украины глазами ученых: прогрессивные идеи – наука – производство*. Сумы: СумГУ; 2010. С. 25–27.
14. Литвинова И.А., Веселов И.В., Гамлицкий Ю.А. Совершенствование рецептуры резины для массивных шин путем добавок нетрадиционных наполнителей. *Вестник ВГУИТ*. 2019;81(4):196–204. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-4-196-204>
15. Каблов В.Ф., Гамлицкий Ю.А., Тышкевич В.Н. *Механика армированных пластиков и резинокордных композитов*. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет; 2014. 348 с.
16. Kartsovnik V.I. Prediction of the creep of elastomers taking into account the forces of entropic elasticity of macromolecules (prediction of creep of elastomers). *Journal of Macromolecular Science, Part B*. 2018;57(6):447–464. <https://doi.org/10.1080/00222348.2018.1470836>
17. Luo R.K. Effective stress criterion for rubber multiaxial fatigue under both proportional and non-proportional loadings. *Engineering Failure Analysis*. 2021;121:105–172. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105172>
18. Swider J., Szewerda K., Herbus K., Jura J. Testing the impact of braking algorithm parameters on acceleration and braking distance for a suspended monorail with regard to acceptable travel speed in hard coal mines. *Energies*. 2021;14:7275. <https://doi.org/10.3390/en14217275>
19. Szewerda K., Krenicky T. Use of the MBS method in mining industry R&D projects. *Mining Machines*. 2022;40(2):110–120. <https://doi.org/10.32056/KOMAG2022.2.6>
20. Гутаревич В.О., Рябко К.А., Рябко Е.В. Гашение боковых колебаний подвижного состава шахтной подвесной монорельсовой дороги. В: *Сборник тезисов докладов VI международной научно-технической конференции «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства»*. Алчевск: ДГТУ; 2021. С. 172–174.
21. Szewerda K. Supporting development of suspended underground monorails using virtual prototyping techniques. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Innovative Mining Technologies (IMTech 2019 Scientific and Technical Conference)*. 25–27 March 2019, Szczyrk, Poland. 2019;545:012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/545/1/012018>

References

1. Kol'ga A.D., Agliullin A.S. Railway transport of mining enterprises: ways of efficiency improvement. *Gornoe Oborudovanie i Elektromekhanika*. 2016;(5):23–28. (In Russ.)
2. Aleksandrov S.N., Bereginiski V.I., Budishevskiy V.A., Melnikov S.A. Creation of mine locomotives for delivery of cargoes by the ways with the inconsistent and overrated profile. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2009;(16):215–229. (In Russ.)
3. Gutarevych V.O. Dynamic loading of monorail bogies and suspended railway. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences*. 2015;(4):85–88. (In Russ.) <https://doi.org/10.17213/0321-2653-2015-4-85-88>
4. Gutarevych V.O., Kondrakhin V.P. Reduction of dynamic loads from suspended monorail tracks on mine working support. *Vestnik Donetsk National Technical University*. 2016;(6):7–11. (In Russ.)
5. Melezhik R.S., Vlasenko D.A. Load simulation and substantiation of design values of a pin flexible coupling with a flexible disk-type element. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(2):128–135. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-128-135>
6. Ziborova E.Yu., Mnatsakanyan V.U. Justification of geometrical parameters of lining plates for a belt conveyor drive drum. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(2):170–179. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-2-170-179>
7. Stoček R., Stěnička M., Zádřapa P. Future trends in predicting the complex fracture behaviour of rubber materials. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 2021;33(2):291–305. <https://doi.org/10.1007/s00161-020-00887-z>



8. Szewerda K., Tokarczyk J., Wieczorek A. Impact of increased travel speed of a transportation set on the dynamic parameters of a mine suspended monorail. *Energies*. 2021;14(6):1528. <https://doi.org/10.3390/en14061528>
9. Herbus K., Szewerda K., Swider J. Virtual prototyping of the suspended monorail in the aspect of increasing the permissible travel speed in hard coal mines. *Eksploatacja i Niezawodność*. 2020;4:610–619. <https://doi.org/10.17531/ein.2020.4.4>
10. Kondrakhin V., Arefyev E., Khitsenko N. Assessment of impact made by vibration cleaning on the conveyor-belt service life. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2012;(57):292–295. (In Russ.)
11. Aleksandrov V.M., Chebakov M.I. *Introduction to the mechanics of contact interactions*. Rostov-on-Don: TsVVR LLC; 2007. 114 p. (In Russ.)
12. Ryabko K.A., Gutarevich V.O. Substantiation of performance indicators of mine monorail locomotives. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(2):136–143. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-136-143>
13. Vodolazskaya N.V., Shevchenko D.A. *The problem of increasing the durability of machine parts operating in aggressive environments. Mechanical engineering of Ukraine through the eyes of scientists: progressive ideas – science – production*. Sumy: SumGU; 2010. Pp. 25–27. (In Russ.)
14. Litvinova I.A., Veselov I.V., Gamlitskiy Y.A. Improvement of rubber recipe for massive tires by addition of non-traditional fillers. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2019;81(4):196–204. (In Russ.) <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-4-196-204>
15. Kablov V.F., Gamlitskiy Yu.A., Tyshkevich V.N. *Mechanics of reinforced plastics and rubber-cord composites*. Volgograd: Volgograd State Technical University; 2014. 348 p. (In Russ.)
16. Kartsovnik V.I. Prediction of the creep of elastomers taking into account the forces of entropic elasticity of macromolecules (prediction of creep of elastomers). *Journal of Macromolecular Science, Part B*. 2018;57(6):447–464. <https://doi.org/10.1080/00222348.2018.1470836>
17. Luo R.K. Effective stress criterion for rubber multiaxial fatigue under both proportional and non-proportional loadings. *Engineering Failure Analysis*. 2021;121:105–172. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105172>
18. Swider J., Szewerda K., Herbus K., Jura J. Testing the impact of braking algorithm parameters on acceleration and braking distance for a suspended monorail with regard to acceptable travel speed in hard coal mines. *Energies*. 2021;14:7275. <https://doi.org/10.3390/en14217275>
19. Szewerda K., Krenicky T. Use of the MBS method in mining industry R&D projects. *Mining Machines*. 2022;40(2):110–120. <https://doi.org/10.32056/KOMAG2022.2.6>
20. Gutarevich V.O., Ryabko K.A., Ryabko E.V. Damping of lateral oscillations of the rolling stock of a mine suspended monorail road. In: *Collection of abstracts of reports of the VI international scientific and technical conference “Ways to improve technological processes and equipment of industrial production”*. Alchevsk: DSTU; 2021. Pp. 172–174. (In Russ.)
21. Szewerda K. Supporting development of suspended underground monorails using virtual prototyping techniques. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Innovative Mining Technologies (IMTech 2019 Scientific and Technical Conference)*. 25–27 March, 2019. Szczyrk, Poland. 2019;545:012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/545/1/012018>

Информация об авторах

Евгений Михайлович Арефьев – кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-5055-2370](https://orcid.org/0000-0001-5055-2370), Researcher ID [B-2261-2016](https://orcid.org/B-2261-2016); e-mail elcross@mail.ru

Константин Александрович Рябко – кандидат технических наук, доцент, Ростовский государственный университет путей сообщения (филиал в г. Воронеж), г. Воронеж, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-4391-506X](https://orcid.org/0000-0003-4391-506X), Scopus ID [57203884218](https://orcid.org/57203884218); e-mail railroader@yandex.ru

Information about the authors

Evgeny M. Arefiev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Saint Petersburg State Institute of Technology, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID [0000-0001-5055-2370](https://orcid.org/0000-0001-5055-2370), Researcher ID [B-2261-2016](https://orcid.org/B-2261-2016); e-mail elcross@mail.ru

Konstantin Al. Ryabko – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Rostov State University of Railway Transport (Voronezh Branch), Voronezh, Russian Federation; ORCID [0000-0003-4391-506X](https://orcid.org/0000-0003-4391-506X), Scopus ID [57203884218](https://orcid.org/57203884218); e-mail railroader@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.11.2022
Поступила после рецензирования 10.02.2023
Принята к публикации 11.02.2023

Received 20.11.2022
Revised 10.02.2023
Accepted 11.02.2023



ГОРНЫЕ МАШИНЫ, ТРАНСПОРТ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-09-12>

УДК 622.684

**Закономерности изменения энергоемкости
транспортирования горной массы транспортом глубоких карьеров**А. Г. Журавлев , И. А. Глебов , В. В. Черных *Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук (ИГД УрО РАН),
г. Екатеринбург, Российская Федерация*✉ chernyh@igduran.ru**Аннотация**

Значительная часть месторождений полезных ископаемых, разрабатываемых открытым способом, вскрывается автомобильными транспортными съездами на всю глубину без использования комбинированного транспорта. В большинстве случаев это связано с высокой скоростью снижения уровня горных работ и многоэтапной разработкой. Методы исследований энергоемкости транспортирования горной массы из рабочей зоны карьера на поверхность рассматриваются в несколько иерархических уровней. Для исследования 3D-моделей карьеров с различными углами откоса использовано программное обеспечение Mineframe с целью забазировать методику аналитического расчета объема карьера, что позволило обеспечить точность при широком охвате диапазона горнотехнических условий. При увеличении диаметра дна карьера зона стабилизации высоты подъема смещается к большим конечным глубинам, увеличение угла откоса бортов карьера влечет за собой смещение средневзвешенной высоты в глубину, с ростом конечной глубины карьера комбинированные виды транспорта становятся более экономичными в сравнении с автомобильным за счет увеличения суммарного объема горной массы. В зависимости от цели сравнения предложено использовать различные виды энергоемкости, для укрупненной оценки рациональности пары «схемы вскрытия – вид транспорта» для карьеров возможно использовать отношение потенциальных энергоемкостей перемещения горной массы рассматриваемого варианта вскрытия карьера и его базовой версии без транспортных берм, установлены закономерности изменения отношения потенциальных энергоемкостей от глубины карьера, определены значения полной энергоемкости транспортирования горной массы из карьера до поверхности комбинированными видами транспорта.

Ключевые слова

энергоемкость, транспортная система карьера, глубокий карьер, схема вскрытия, транспортная берма, карьерные автосамосвалы, угол откоса бортов

Благодарности

Исследования выполнены в рамках Государственного задания Минобрнауки РФ №075-00412-22 ПР.

Для цитирования

Zhuravlev A. G., Glebov I. A., Chernykh V. V. Behaviour pattern of rock mass haulage energy intensity in deep pits. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):68–77. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-09-12>

MINING MACHINERY, TRANSPORT, AND MECHANICAL ENGINEERING

Research paper

Behaviour pattern of rock mass haulage energy intensity in deep pitsA. G. Zhuravlev , I. A. Glebov , V. V. Chernykh *Institute of Mining Engineering of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yekaterinburg, Russian Federation*✉ chernyh@igduran.ru**Abstract**

A significant portion of mineral deposits developed by open-pit mining is opened to the full depth by road transport ramps without the use of combined transport. In most cases, this is dictated by the high rate of a pit deepening and multi-stage development. In this study, the energy intensity of rock mass (RoM) haulage from the working zone of a pit to the surface is considered at several hierarchical levels. Mineframe software was used to study 3D-models of open pits with different slope angles in order to test the method of analytical calculation of a pit volume that allowed ensuring accuracy under a wide range of mining conditions. The findings of the research are as follows: with an increase in the pit bottom diameter, the zone of stabilization of rock mass lifting (haulage) height shifts to greater target depths. An increase in

the pit slope angles entails shifting the weighted average height to deeper elevations. By increasing the pit target depth, combined modes of transport become more economical in comparison with dump trucks due to an increase in the total volume of rock mass. Depending on the comparison purpose, it was proposed to use different types of energy intensity. For a broad estimation of the rationality of the pair “scheme of opening – mode of transport” for open pits, the ratio of potential energy intensities of rock mass haulage of a considered option of a pit opening and its basic option without transport berms was used. The ratio of potential energy intensities as a function of a pit depth was determined. The values of total energy intensity of rock mass haulage from a pit to the surface were also established.

Keywords

energy intensity, open pit haulage system, deep pit, opening scheme, transport berm, pit dump trucks, slope angle

Acknowledgments

The research was performed within the framework of the State Assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 075-00412-22 PR.

For citation

Zhuravlev A. G., Glebov I. A., Chernykh V. V. Behaviour pattern of rock mass haulage energy intensity in deep pits. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):68–77. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-09-12>

Введение

Значительная часть месторождений полезных ископаемых, разрабатываемых открытым способом, вскрывается автомобильными транспортными съездами на всю глубину без использования комбинированного транспорта. Как правило, это продиктовано высокой скоростью снижения уровня горных работ, многоэтапной разработкой (до 5–6 этапов с разноской бортов на каждом этапе на всю высоту), что не позволяет внедрять более экономичные, но капиталоемкие виды транспорта. В то же время эффективная разработка этих месторождений с максимально полным освоением запасов является актуальной задачей [1, 2].

Объем горной массы в контурах карьера существенно зависит от его глубины и размеров в плане, причем с увеличением глубины имеет место параболическое возрастание объема (рис. 1). Вместе с тем, как известно, распределение этих объемов по

выемочным слоям неравномерно: с глубиной объем каждого нижележащего горизонта уменьшается, при этом дальность транспортирования возрастает [3]. Итоговые цифры грузотранспортной работы по мере разработки месторождения глубоким карьером округлой формы описываются возрастающе-убывающей кривой. Так, на рис. 1, б приведен график, построенный без учета выравнивания объемов добычи по годам. Видно, что пиковое значение и интенсивность изменения тоннокилометровой работы существенно зависят от углов откоса бортов карьера.

Способом управления формой бортов карьера в конечном контуре с целью достижения значительных углов откоса является оптимизация параметров транспортных коммуникаций:

– использование узких транспортных берм, в том числе за счет однополосных автодорог с разделением груженого и порожнего потоков транспортных средств;

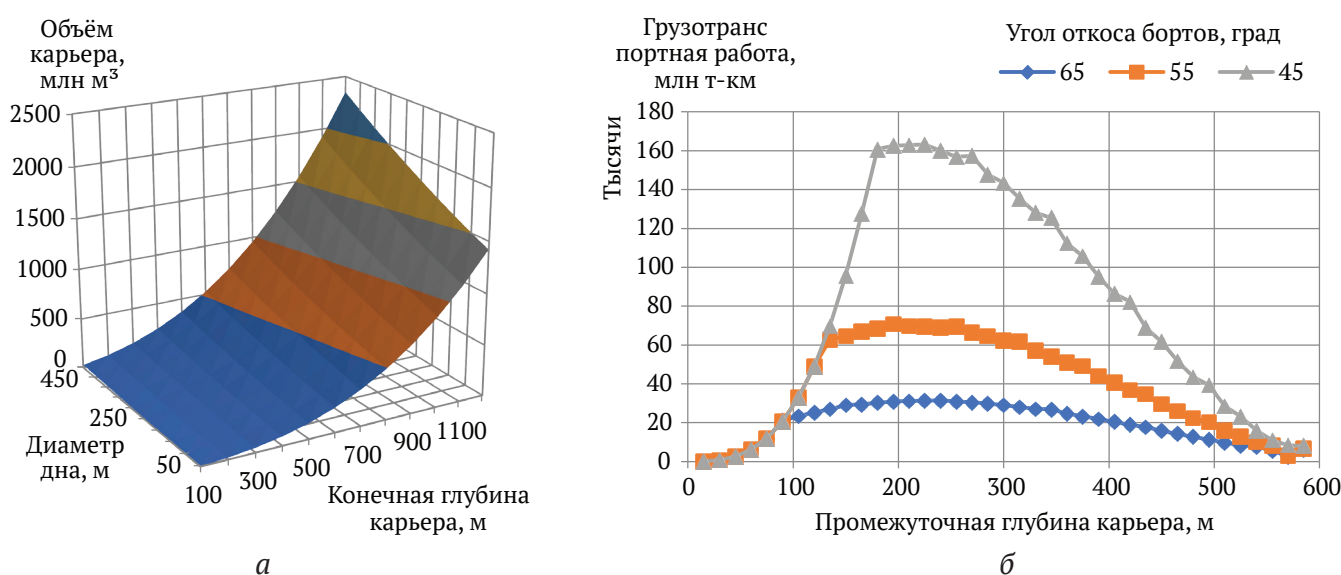


Рис. 1. Зависимость объема горной массы и грузотранспортной работы в контурах карьера округлой формы от размеров дна, конечной глубины и угла откоса бортов:

а – зависимость объема горной массы в контурах карьера;
б – изменение грузотранспортной работы по глубине карьера при конечной отметке – 585 м



– использование повышенных уклонов автодорог;
– применение соответствующих видов транспорта, располагаемых на уступах без транспортных берм (крутонаклонный конвейер, скиповой подъемник, грузовая подвесная канатная дорога и т.п.) и др.

Для сравнения разных схем вскрытия месторождений полезных ископаемых при открытой их разработке с разными видами транспорта необходимо определить некоторый критерий. Таким критерием может служить энергоемкость транспортирования всего объема горной массы карьера.

Подход, использующий энергоемкость в качестве показателя или критерия для оценки процессов открытых горных работ или горных машин, применяется в целом ряде работ [4–7], что говорит как об универсальности такого метода, так и об актуальности рассматриваемой задачи. В целом же тема энергоэффективности не теряет своей актуальности последние 20 лет. Так, в статье «Substantiating systems of open-pit mining equipment in the context of specific cost» [8] описывается энергоэффективность оборудования на угольных разрезах. В материале «Energy consumption in open-pit mining operations relying on reduced energy consumption for haulage using in-pit crusher systems» [9] исследуется энергоэффективность при транспортировке с использованием внутрикарьерных дробильных систем. «Smart energy management: a comparative study of energy consumption forecasting algorithms for an experimental open-pit mine» [10] – статья, в которой ~~раскрывается~~ ~~вопрос~~ решается проблема интеллектуально-

го управления энергоэффективности. В материале «Structure of energy consumption and improving open-pit dump truck efficiency» [11] можно прочитать об увеличении энергоэффективности за счет снижения энергопотребления. В статье «An integrated model of an open-pit coal mine: improving energy efficiency decisions» [12] описана интегрированная модель угольного разреза. Материал «Bulk material transportation system in open pit mines with improved energy efficiency» [13] описывает повышение энергоэффективности транспортировки сыпучих материалов. Целесообразно объединить обобщенный подход к оценке транспортных систем в целом и энергоэффективности отдельных транспортных средств.

Задачи данного исследования:

1) структурировать по иерархическим уровням энергоемкость перемещения горной массы, применимую для сравнения эффективности видов транспорта и схем вскрытия;

2) установить закономерности изменения относительной энергоемкости перемещения горной массы из карьера на поверхность от параметров карьера;

3) определить энергоемкость перемещения горной массы разными видами транспорта при вскрытии рабочей зоны автомобильным транспортом.

Методы исследований

Энергоемкость транспортирования горной массы из рабочей зоны карьера на поверхность в рамках данного исследования рассматривается в несколько иерархических уровней (табл. 1).

Таблица 1

Иерархические уровни исследования энергоемкости транспортирования

Уровень рассмотрения энергоемкости	Выражение для оценки	Значимость
1 Энергоемкость перемещения в единицах потенциальной энергии (только консервативные силы) с учетом объемов разности бортов под размещение транспортных коммуникаций	$\frac{\Delta E_p}{\Delta E_{p0}}$	Влияние разности бортов карьера для размещения транспортных коммуникаций с учетом их параметров на суммарную энергоемкость (как правило, оказывает основное влияние на суммарную энергоемкость)
2 Энергоемкость перемещения в единицах физической работы внешних (по отношению к транспортным средствам) консервативных сил и внешних диссипативных сил	$\frac{A_{(T1)}}{A_{(T2)}} = \frac{\Delta E_{p(T1)} + A_{d(T1)}}{\Delta E_{p(T2)} + A_{d(T2)}}$	При сравнении видов транспорта: наряду с влиянием параметров транспортных коммуникаций учитывается энергоэффективность двигателя конкретного вида/модификации транспорта
3 Энергоемкость перемещения с учетом показателей энергоносителя	$\frac{Q}{E_{p0}} = \frac{(\Delta E_p + A_d)q}{\Delta E_{p0}}$	1. Для конкретного вида транспорта: поиск оптимальной формы бортов карьера в промежуточных и конечном положениях, определение рациональных параметров вскрываемых выработок (уклона и ширины транспортных берм и т.п.)
	$\frac{Q_{(T1)}}{Q_{(T2)}} = \frac{(\Delta E_{p(T1)} + A_{d(T1)})q_{T1}}{(\Delta E_{p(T2)} + A_{d(T2)})q_{T2}}$	2. При сравнении видов транспорта: выбор энергоэффективного вида транспорта с учетом показателей энергоносителя (теплота сгорания топлива, КПД генерации и передачи электроэнергии и т.п.) и КПД энергосиловой установки транспортных средств

Примечания: ΔE_p , ΔE_{p0} – энергоемкость подъема горной массы (разница потенциальных энергий на поверхности карьера и в точке залегания) соответственно для карьера с транспортными коммуникациями (ΔE_p) и базовой выработки (ΔE_{p0}); A_d – работа на преодоление диссипативных сил при перемещении горной массы; $T1$, $T2$ – соответственно вид/модификация транспорта 1 и 2; Q – полные энергозатраты на перемещение горной массы; q – удельная энергоемкость выработки и подвода к двигателю транспортного средства единицы энергии энергосиловой установкой (например, низшая теплотворная способность топлива с учетом КПД двигателя внутреннего сгорания и трансмиссии).

Поскольку исследование нацелено на выявление общих закономерностей, для упрощения расчет объема горной массы в контурах карьера выполняем как для перевернутого усеченного конуса, наклон образующих которого соответствует среднему углу откоса бортов карьера.

В определенной мере при поиске рациональной схемы вскрытия и соответствующего вида транспорта предельно оптимизированной по форме можно считать выработку в виде карьера, не имеющего транспортных берм. На его бортах размещаются только бермы очистки, а углы откоса бортов подобраны в соответствии с устойчивыми углами. Будем условно называть такую выработку «базовой». Исследован ряд 3D-моделей карьеров с углами откоса 35, 45, 55 и 65°, на конечных контурах которых вписывались транспортные бермы. Моделирование осуществлялось в программном пакете Mineframe [14] для некоторого количества вариантов карьеров с целью забазировать методику аналитического расчета объема карьера [15], что позволило обеспечить точность при широком охвате диапазона горнотехнических условий.

Берма очистки принята шириной 15 м. Ширина транспортных берм принималась различной в соответствии с рациональным типоразмером автосамосвалов для конкретного размера карьера (учитывались пространственные размеры в плане и глубина), обуславливающего производственную мощность. Диапазон варьирования составил:

- для малых карьеров ширина берм 24,5 м рассчитана под автосамосвалы грузоподъемностью 60–90 т;
- для крупных карьеров ширина берм 34 м рассчитана под автосамосвалы грузоподъемностью 130–160 т.

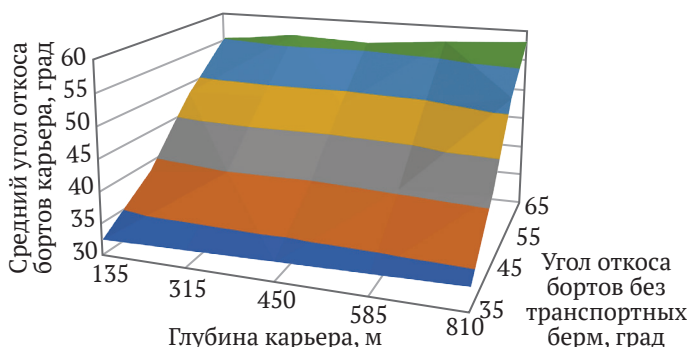


Рис. 2. Изменение угла откоса бортов округлого карьера при размещении на них транспортных берм под спиральные автомобильные съезды

На рис. 2 представлены результаты, из которых видно, что размещение берм спиральных съездов приводит к уменьшению углов откоса бортов на 2–3° при малых базовых углах и на 5–7° при значительных базовых углах. В результате обработки данных установлены зависимости угла откоса от глубины карьера и базового угла откоса борта (табл. 2), которые использованы в дальнейших расчетах.

Для охвата совокупности карьеров по устойчивости бортов приняты следующие углы откоса базовых выработок: 35°, 45°, 55°, 65°.

Определим теоретическую энергоёмкость как энергию, затрачиваемую на подъем всей горной массы в контурах карьера, описываемую изменением потенциальной энергии каждого элементарного объема между положениями «на поверхности» и «в массиве». При этом расчет будем вести послойно, поскольку перемещение в горизонтальной плоскости не приводит, с учетом допущений, к изменению энергоёмкости (рис. 3).

Соответственно, энергоёмкость перемещения горной массы из контуров карьера:

$$\Delta E_p = \sum V_{li} \rho h_{pi} g = \int_0^{H_k} g \rho h_{pi} S_l dh_{pi}, \quad (1)$$

где V_{li} – объем i -го слоя (горизонта) в контурах карьера, м³; h_{pi} – высота от дна i -го слоя до поверхности карьера (высота подъема горной массы), м; g – ускорение свободного падения (9,81), м/с²; ρ – плотность горной массы в целике, т/м³.

При переходе к интегралу высота слоя уменьшается до бесконечно малой величины, поэтому площади дна и верха усеченного конуса, который представляет из себя каждый слой, можно считать равными. Соответствующая площадь, м², определяется как:

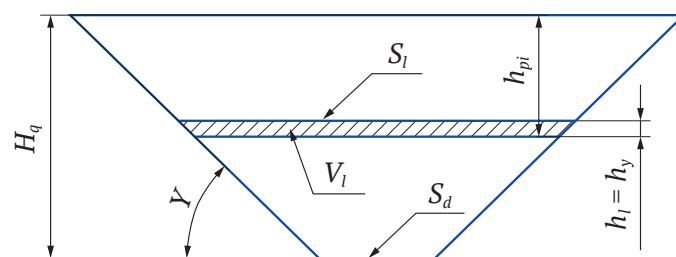


Рис. 3. Схема определения объемов выемочных слоев в контурах карьера:

S_l – площадь слоя, м²; S_d – площадь дна, м²; V_l – объем слоя, м³; h_l – высота слоя, м; h_y – высота уступа, м; h_{pi} – высота от верхней отметки карьера до нижней отметки слоя, м; Y – угол наклона борта, град; H_q – высота карьера

Таблица 2

Зависимости угла откоса от глубины карьера (H_q)

Параметры	Базовый угол откоса бортов			
	35°	45°	55°	65°
Зависимость угла откоса от глубины карьера γ	$0,0018H_q + 32,168$	$0,0035H_q + 38,325$	$0,0052H_q + 46,898$	$0,004H_q + 54,771$
Достоверность R^2	0,9967	0,884	0,7647	0,8848



$$S_l = S_d + 2\sqrt{\pi s_d} H_k \operatorname{ctg} \gamma - 2\sqrt{\pi s_d} h_{pi} \operatorname{ctg} \gamma + \pi H_k^2 \operatorname{ctg}^2 \gamma - 2\pi H_k h_{pi} \operatorname{ctg}^2 \gamma + \pi h_{pi}^2 \operatorname{ctg}^2 \gamma, \quad (2)$$

где S_d – площадь дна карьера, м²; γ – средний угол откоса бортов карьера, град; H_k – конечная глубина карьера, м.

Соответственно, формулу определения E_p можно записать так:

$$\Delta E_p = \int_0^{H_k} \rho g (S_d + 2\sqrt{\pi s_d} H_k \operatorname{ctg} \gamma - 2\sqrt{\pi s_d} h_{pi} \operatorname{ctg} \gamma + \pi H_k^2 \operatorname{ctg}^2 \gamma - 2\pi H_k h_{pi} \operatorname{ctg}^2 \gamma + \pi h_{pi}^2 \operatorname{ctg}^2 \gamma) dh_{pi}. \quad (3)$$

После всех преобразований и интегрирования формула приобретает следующий вид:

$$\Delta E_p = \rho g \left(\frac{\pi \operatorname{ctg}^2 \gamma}{12} H_k^4 + \frac{\sqrt{\pi s_d} \operatorname{ctg} \gamma}{3} H_k^3 + \frac{S_d}{2} H_k^2 \right). \quad (4)$$

Результаты исследований

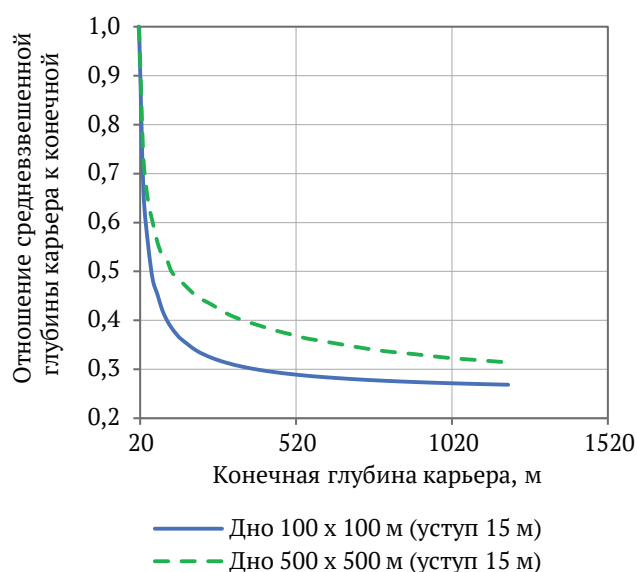
Как указывалось выше, энергоемкость перемещения горной массы определяется двумя главными факторами: распределением объемов в контурах карьера и увеличением энергозатрат на транспортирование с глубиной. Поэтому для объяснения закономерностей изменения энергоемкости при изменении параметров карьеров важно выявить их влияние на расположение «центра масс» суммарного объема горной породы в контурах карьера. Из рис. 4, а видно, что при диаметре дна 100 м с увеличением конечной глубины карьера более 500–600 м средневзвешенная высота подъема стабилизируется на уровне 26–28 % от конечной глубины, а при глубинах менее 200 м резко воз-

растает, сравниваясь с полной глубиной карьера. При увеличении диаметра дна карьера зона стабилизации высоты подъема смещается к большим конечным глубинам. Увеличение угла откоса бортов карьера влечет за собой смещение средневзвешенной высоты в глубину (рис. 4, б).

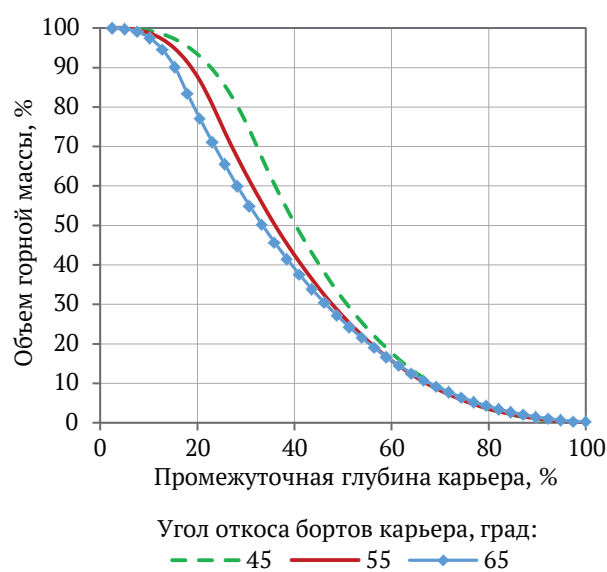
Расчеты показали, что энергоемкость перемещения горной массы, базирующаяся на разности потенциальной энергии (см. п. 1 табл. 1), характеризует горно-геологические условия и схему вскрытия в целом. Из рис. 5 видно, что ее увеличение с глубиной карьера в целом схоже с возрастанием объема карьерного пространства, но, как показал анализ, более интенсивно за счет возрастающих энергозатрат с глубиной. Повышение углов откоса закономерно ведет к снижению объемов породы и, соответственно, суммарных затрат энергии, а увеличение диаметра дна – к их возрастанию.

Удобным способом сравнительной оценки альтернативных схем вскрытия является относительная энергоемкость, равная отношению энергоемкости перемещения всего объема пород для карьера с рассматриваемой схемой вскрытия ΔE_p к энергоемкости для карьера без вскрывающих выработок ΔE_{p0} . Она позволяет оценить вклад вскрывающих выработок в увеличение объемов и распределение их по глубине. Рассмотрим результаты расчетов подробнее.

Из рис. 6 видно, что зависимости относительной энергоемкости от конечной глубины карьера имеют максимумы, соответствующие наибольшему отрицательному влиянию размещения транспортных берм на разнос бортов карьера. Такая закономерность является «естественной», вытекающей из геометрии, поэтому именно эти группы карьеров должны под-



а



б

Рис. 4. Закономерности изменения положения «центра масс» объема горной породы в контурах карьера в зависимости от его параметров:

а – отношение средневзвешенной (по объему пород) глубины карьера по объему вынимаемой горной массы к конечной глубине карьера; б – обратный кумулятивный график изменения объема горной массы в контурах карьера с глубиной

вергаться обязательной оптимизации. Уменьшение относительной энергоёмкости с дальнейшим ростом глубины объясняется уменьшением доли разнота бортов в геометрическом объеме карьерного пространства и меньшим снижением углов откоса бортов за счет распределения транспортных берм на увеличивающемся периметре контура карьера. По тем же причинам удельная энергоёмкость падает с ростом размеров дна карьера.

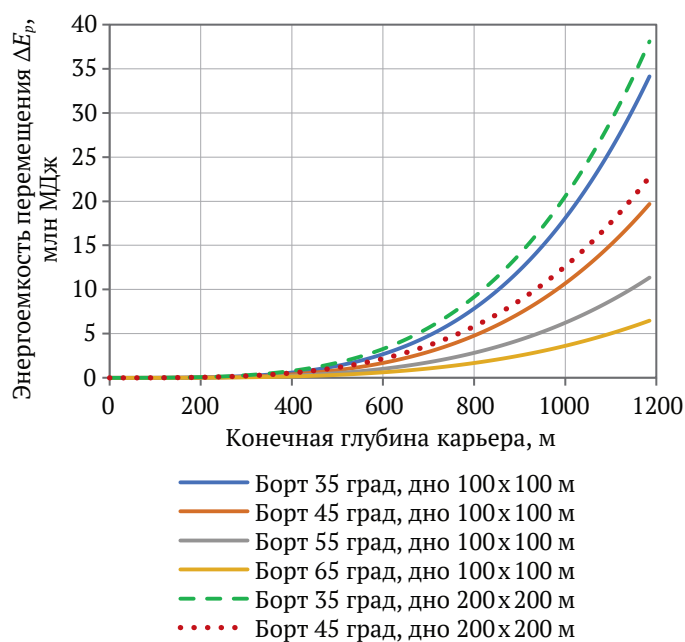


Рис. 5. Теоретическая энергоёмкость перемещения горной массы ΔE_p в контурах карьера на поверхность

Из рис. 7 видно, что с ростом углов откоса базового карьера (без транспортных берм), которые принимались в исследовании как предельный устойчивый угол откоса бортов, относительная энергоёмкость возрастает при всех глубинах, но характер этого роста меняется (см. рис. 7, б): при малых глубинах интенсивность роста уменьшается, при глубинах 400–500 м график практически прямолинеен, а далее изгибается, приближаясь к параболической форме.

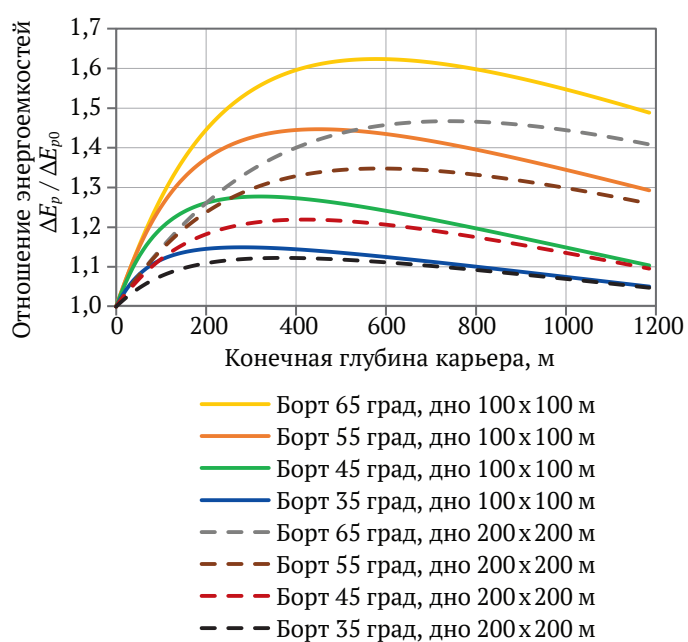
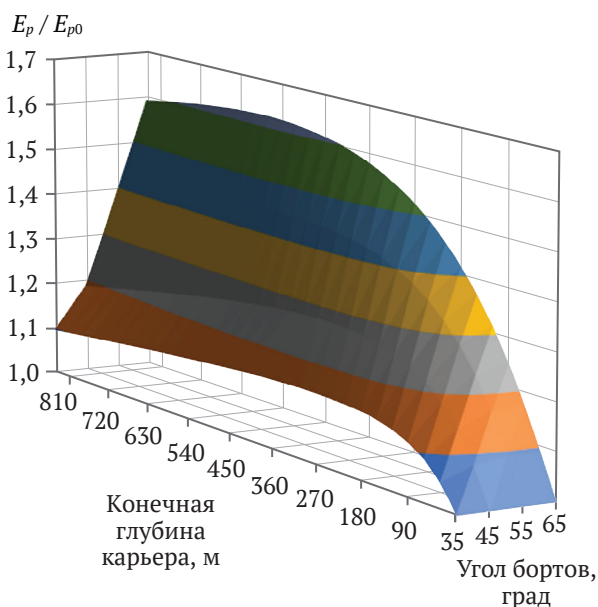
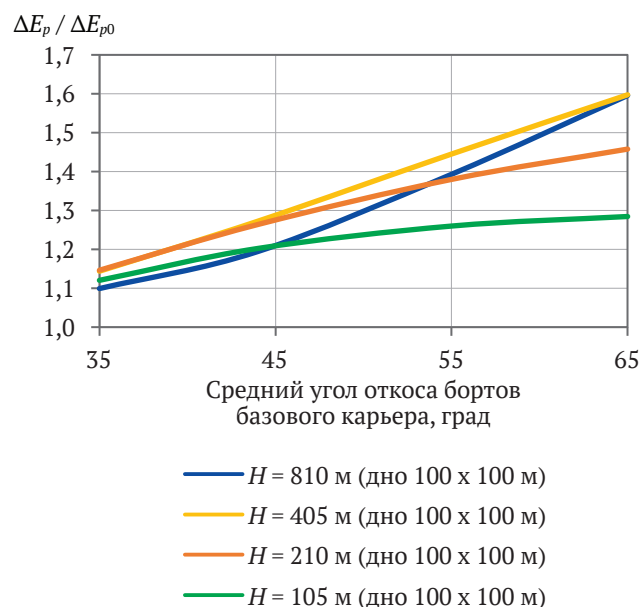


Рис. 6. Изменение относительной теоретической энергоёмкости перемещения горной массы из карьера с глубиной при разных параметрах карьера



а



б

Рис. 7. Отношение энергоёмкостей $\Delta E_p / \Delta E_{p0}$ в зависимости от среднего угла наклона бортов базового карьера (без учета транспортных берм):

а – сводный трехмерный график; б – графики для конкретных глубин

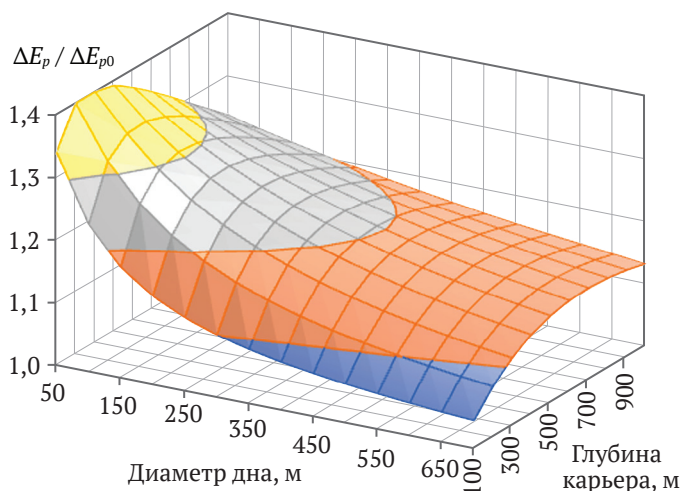


Рис. 8. Отношение энергоемкостей $\Delta E_p / \Delta E_{p0}$ в зависимости от глубины карьера и диаметра его дна для варианта базового карьера со средним углом откоса бортов 45°

Существенное влияние на относительную энергоемкость оказывает диаметр дна карьера. При значительном диаметре дна относительная энергоемкость в целом ниже, чем при малом диаметре (рис. 8). Более того, если при малых размерах дна максимум энергоемкости наблюдается при глубине карьера 100–500 м, то при обширном дне смещается в область глубин 500–900 м. Следовательно, наибольшее негативное влияние от разноса бортов карьера для размещения на них транспортных коммуникаций наблюдается для карьеров с относительно малыми размерами дна – 50–100 м в диаметре при глубинах 100–500 м.

Описанные выше закономерности относятся к теоретической энергоемкости. На практике заметное влияние на нее оказывает применяемый вид транспорта, характеризуемый конкретным энергопотреблением. Для приведения разных видов транспорта с разными энергоносителями (дизельное топливо,

электроэнергия) к сопоставимому виду энергоемкости необходимо использовать (табл. 3):

- расчетную работу консервативных и диссипативных сил на движителе транспортного средства;
- энергию первичного топлива по его теплотворной способности, приведенную к месту ее генерации (дизельный двигатель автономных машин либо электростанция).

По второму варианту в работе [6] предложен и описан способ приведения энергоемкости транспорта к количеству расходуемого условного топлива в г у.т./т·м), удобный для практических расчетов в натуральных показателях. Однако, учитывая, что в рамках данного исследования удобнее работать с единицами энергии, в том числе для перехода к безразмерным относительным единицам, в табл. 3 приведены результаты расчета, в основе которых: тяговый расчет, расчет КПД трансмиссии, усредненный справочный КПД двигателей, низшая теплотворная способность топлива, расчет потерь в линиях электропередач. Для электрифицированных видов транспорта (железнодорожный и конвейерный) принята схема с генерацией электроэнергии на газотурбинной миниТЭС, расположенной в непосредственной близости от карьера.

Отметим, что данные показатели являются усредненными и зависят от конкретных горнотехнических условий (средневзвешенный уклон трассы, дальность транспортирования, конфигурация транспортных коммуникаций и др.).

Возможности рассматриваемого подхода проверены на примере сравнения комбинированных видов транспорта: автомобильно-железнодорожного и автомобильно-конвейерного. Учитывался угол откоса бортов карьера с учетом размещения транспортных коммуникаций, а также удельная энергоемкость транспортирования в зависимости от высоты подъема (глубины карьера). Для удобства результаты расчетов приведены в виде отношения энергоемкостей (рис. 9): чем меньше это отношение, тем более экономичен транспорт, располагающийся в числителе дроби.

Таблица 3

Удельная энергоемкость выработки и подвода к движителю транспортного средства единицы энергии энергосиловой установкой

Вид транспорта	Удельная энергоемкость по видам транспорта ¹	
	МДж/МДж (работа сил на колесах транспортного средства)	МДж/МДж (с учетом теплоты сгорания, КПД ЭСУ и передачи от ЛЭП к транспортному средству)
Отнесение к показателю энергоемкости по табл. 1	$A / \Delta E_p$	$Q / \Delta E_p$
Автомобильный	3,28	9,89
Железнодорожный / Автомобильно-железнодорожный ²	2,01 / 2,52–2,64	6,89 / 8,09–8,39
Конвейерный / Автомобильно-конвейерный ²	1,88 / 2,44–2,16 ³	5,98 / 7,37–6,53 ³

¹ В числителе исходный расход энергоносителя переведен в условное топливо.

² В диапазоне глубин карьера 200–1000 м, высота рабочей зоны автотранспорта принята: при ЖД 80–400 м, при конвейерном 80–150 м.

³ С учетом крупного дробления; ЭСУ – энергосиловая установка; ЛЭП – линия электропередач.

Видно, что при заданных параметрах автомобильно-конвейерный транспорт имеет меньшую энергоемкость во всем диапазоне глубин в сравнении с автомобильно-железнодорожным и автомобильным. Это достигается благодаря оптимизации формы бортов и повышению угла их откоса в сравнении с ЖД транспортом, а также меньшей удельной энергоемкостью, в особенности в сравнении с автомобильным транспортом. Эта разница может быть увеличена за счет оптимизации схемы размещения конвейерных линий на бортах карьера [16, 17]. С ростом конечной глубины карьера, равно как и с увеличением размеров дна, комбинированные виды транспорта становятся более экономичными в сравнении с автомобильным за счет увеличения суммарного объема горной массы.

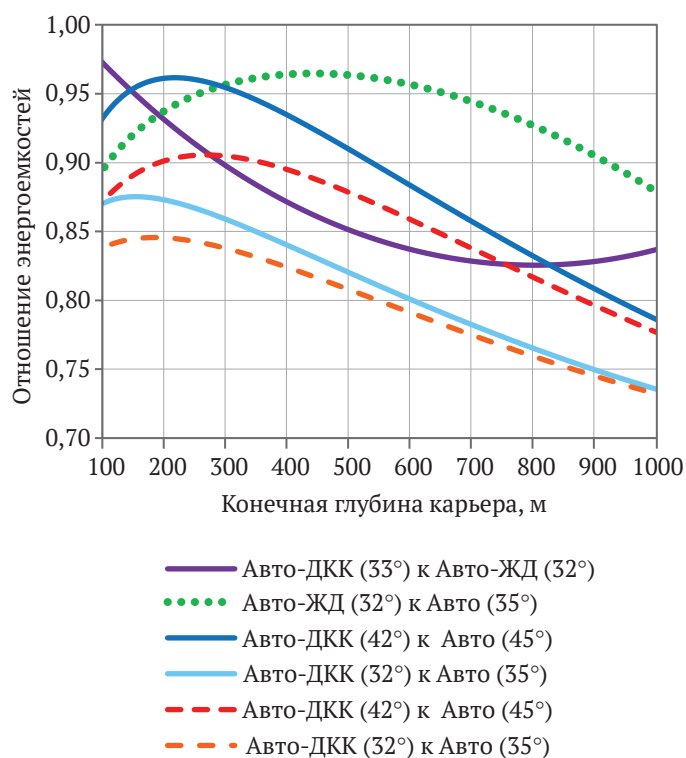


Рис. 9. Отношение полных энергоемкостей Q транспортирования горной массы на поверхность карьера с учетом теплоты сгорания исходного топлива по видам транспорта: Авто-ЖД – автомобильно-железнодорожный транспорт; Авто-ДКК – автомобильно-конвейерный транспорт. В скобках указан средний угол откоса бортов карьера

Выводы

1. Предложенный подход базируется на универсальном интегральном показателе, позволяющем сравнивать по энергоэффективности в единицах натуральных величин варианты схем вскрытия и видов карьерного транспорта. При этом комплексно учитывается уменьшение с глубиной объемов вынимаемых пород и возрастание энергозатрат на ее транспортирование к поверхности.

В зависимости от цели сравнения предложено использовать относительную теоретическую энергоемкость, работу консервативных и диссипативных сил на движителе транспортного средства или полную энергоемкость с учетом эффективности преобразования и передачи энергии топлива.

2. Для укрупненной оценки рациональности пары «схемы вскрытия – вид транспорта» для карьеров возможно использовать отношение потенциальных энергоемкостей $\Delta E_p / \Delta E_{p0}$ перемещения горной массы рассматриваемого варианта вскрытия карьера и его базовой версии без транспортных берм. Чем ближе данный показатель к «1», тем оптимальнее принятая конструкция бортов карьера.

3. Установлены закономерности изменения отношения потенциальных энергоемкостей $\Delta E_p / \Delta E_{p0}$ от глубины карьера, углов откоса бортов и размеров дна, указывающие на то, что наибольшему негативному влиянию от разноса бортов, связанного с размещением на них вскрывающих выработок, подвержены карьеры с размерами дна 50–100 м в диаметре глубиной до 500 м.

4. Показано, что на суммарную энергоемкость перемещения горной массы для глубоких карьеров и карьеров со значительными размерами дна (200 м в диаметре и более) в наибольшей мере влияет энергоэффективность транспортных средств, а для карьеров глубиной до 500 м и с ограниченными размерами дна (до 100–150 м в диаметре) – оптимизация формы карьера в сторону его уменьшения (при сохранении заданного объема извлекаемой руды).

5. Определены значения полной энергоемкости транспортирования горной массы из карьера до поверхности комбинированными видами транспорта. Показано, что благодаря более высокой энергоэффективности железнодорожного и конвейерного транспорта в комбинации с автомобильным они более экономичны в сравнении с только автомобильным, а автомобильно-конвейерный более экономичен, чем автомобильно-железнодорожный, за счет кратчайшего расстояния транспортирования.

Список литературы

1. Яковлев В.Л., Корнилов С.В., Соколов И.В. *Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья*. Под ред. Яковлева В.Л. Екатеринбург: УрО РАН; 2018. 360 с. URL: <https://igdur.ru/files/eshop/elibrary/2019-inno-bazis.pdf>
2. Зырянов И.В., Акишев А.Н., Бондаренко И.Ф. *Совершенствование добычи и переработки алмазо-содержащих руд*. Под ред. Чантурия В.А. Якутск: Издательский дом СВФУ; 2020. 720 с.
3. Журавлев А.Г., Буднев А.Б. Влияние типоразмера автосамосвала на разнос бортов карьера. *Проблемы недропользования*. 2018;(2):20–29. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2018.02.020>



4. Анистратов Ю.И. Энергетическая теория расчета технологии открытых горных работ. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 1996;(3):20–29.
5. Коваленко В.А., Тангаев И.А. Энергетический принцип контроля и оптимизации технологических процессов на карьерах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2008;(2–1):293–301.
6. Лель Ю.И., Ворошилов Г.А., Стенин Ю.В., Николаев Н.А. Методика энергетической оценки транспортных систем карьеров в условиях рыночной экономики. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2005;(21):129–137.
7. Kurlenya M.V., Tanaino A.S. Energy analysis of open-pit coal mining. *Journal of Mining Science*. 1997;33(5):453–462. <https://doi.org/10.1007/BF02765621>
8. Symonenko V.I., Haddad J.S., Cherniaiev O.V. et al. Substantiating systems of open-pit mining equipment in the context of specific cost. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*. 2019;100(2):301–305. <https://doi.org/10.1007/s40033-019-00185-2>
9. Purhamadani E., Bagherpour R., Tudeszki H. Energy consumption in open-pit mining operations relying on reduced energy consumption for haulage using in-pit crusher systems. *Journal of Cleaner Production*. 2021;291:125228. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125228>
10. El Maghraoui A., Ledmaoui Y., Laayati O. et al. Smart energy management: a comparative study of energy consumption forecasting algorithms for an experimental open-pit mine. *Energies*. 2022;15(13):4569. <https://doi.org/10.3390/en15134569>
11. Koptev V.Y., Kopteva A.V. Structure of energy consumption and improving open-pit dump truck efficiency. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017;87(2):022010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/87/2/022010>
12. Patterson S.R., Kozan E., Hyland P. An integrated model of an open-pit coal mine: improving energy efficiency decisions. *International Journal of Production Research*. 2016;54(14):4213–4227. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1117150>
13. Ristić L., Bebić M., Štatkić S. et al. Bulk material transportation system in open pit mines with improved energy efficiency. In: *Proceedings of the 15th WSEAS International Conference on Systems*. Corfu Island, Greece. 14–16 July 2011. Pp. 327–332.
14. Лукичѳв С.В., Наговицын О.В. Цифровое моделирование при решении задач открытой и подземной горной технологии. *Горный журнал*. 2019;(6):51–55. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.06.06>
15. Буднев А.Б., Журавлев А.Г. Оценка погрешностей некоторых аналитических методов расчета объема карьера. *Проблемы недропользования*. 2017;(4):61–70. <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2017.04.061>
16. Берсенов В.А., Кармаев Г.Д., Семенкин А.В., Сумина И.Г. Схемы циклично-поточной технологии при различном залегании месторождений полезных ископаемых (обзор применяемых и предлагаемых схем ЦПТ). *Проблемы недропользования*. 2018;(4):13–21. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2018.04.013>
17. Журавлев А.Г., Семенкин А.В., Черепанов В.А. и др. Задачи развития перспективных циклично-поточных технологий для глубоких карьеров. *Горная промышленность*. 2022;(1S):53–62. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1S-53-62>

References

1. Yakovlev V.L., Kornilkov S.V., Sokolov I.V. *Innovative basis of the strategy for integrated development of mineral resources*. Yekaterinburg: UrO RAS Publ.; 2018. 360 p. (In Russ.) URL: <https://igduran.ru/files/eshop/elibrary/2019-inno-bazis.pdf>
2. Zyryanov I.V., Akishev A.N., Bondarenko I.F. *Improvement of mining and processing of diamond-bearing ores*. Yakutsk: SVFU Publ. House; 2020. 720 p. (In Russ.)
3. Zhuravlev A., Budnev A. Influence of the dump truck type and size on the diversity of the quarry sides. *Problems of Subsoil Use*. 2018;(2):20–29. (In Russ.) <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2018.02.020>
4. Anistratov Yu.I. Energy theory for calculating the technology of open-pit mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 1996;(3):20–29 (In Russ.)
5. Kovalenko V.A., Tangaev I.A. Energy principle of control and optimization of work processes in open pits. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2008;(2–1):293–301. (In Russ.)
6. Lel Yu.I., Voroshilov G.A., Stenin Yu.V., Nikolaev N.A. Methodology of energy assessment of pit transport systems under market conditions. *Proceedings of the Ural State Mining University*. 2005;(21):129–137. (In Russ.)
7. Kurlenya M.V., Tanaino A.S. Energy analysis of open-pit coal mining. *Journal of Mining Science*. 1997;33(5):453–462. <https://doi.org/10.1007/BF02765621>
8. Symonenko V.I., Haddad J.S., Cherniaiev O.V. et al. Substantiating systems of open-pit mining equipment in the context of specific cost. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*. 2019;100(2):301–305. <https://doi.org/10.1007/s40033-019-00185-2>
9. Purhamadani E., Bagherpour R., Tudeszki H. Energy consumption in open-pit mining operations relying on reduced energy consumption for haulage using in-pit crusher systems. *Journal of Cleaner Production*. 2021;291:125228. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125228>



10. El Maghraoui A., Ledmaoui Y., Laayati O. et al. Smart energy management: a comparative study of energy consumption forecasting algorithms for an experimental open-pit mine. *Energies*. 2022;15(13):4569. <https://doi.org/10.3390/en15134569>
11. Koptev V.Y., Kopteva A.V. Structure of energy consumption and improving open-pit dump truck efficiency. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017;87(2):022010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/87/2/022010>
12. Patterson S.R., Kozan E., Hyland P. An integrated model of an open-pit coal mine: improving energy efficiency decisions. *International Journal of Production Research*. 2016;54(14):4213–4227. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1117150>
13. Ristić L., Bebić M., Štatić S. et al. Bulk material transportation system in open pit mines with improved energy efficiency. In: *Proceedings of the 15th WSEAS International Conference on Systems*. Corfu Island, Greece. 14–16 July 2011. Pp. 327–332.
14. Lukichev S.V., Nagovitsyn O.V. Digital simulation in solving problems of surface and underground mining technologies. *Gornyi Zhurnal*. 2019;(6):51–55. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.06.06>
15. Budnev A.B., Zhuravlev A.G. The estimate of errors of some analytical methods of pit volume calculation. *Problems of Subsoil Use*. 2017;(4):61–70. (In Russ.) <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2017.04.061>
16. Bersenev V.A., Karmayev G.D., Semenkin A.V., Sumina I.G. Schemes of cyclic-flow technology by various bedding of mineral deposits (reviewing of existing and proposed schemes of CFT). *Problems of Subsoil Use*. 2018;(4):13–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2018.04.013>
17. Zhuravlev A.G., Semenkin A.V., Cherepanov V.A. et al. The purpose of developing advanced in-pit crushing and conveying technology for deep open pits. *Russian Mining Industry*. 2022;(1S):53–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1S-53-62>

Информация об авторах

Артём Геннадиевич Журавлев – кандидат технических наук, заведующий лабораторией транспортных систем карьеров и геотехники, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук (ИГД УрО РАН), г. Екатеринбург, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-7643-3994](https://orcid.org/0000-0001-7643-3994), Scopus ID [57211343137](https://orcid.org/57211343137); e-mail juravlev@igduran.ru

Игорь Андреевич Глебов – младший научный сотрудник, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук (ИГД УрО РАН), г. Екатеринбург, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-4436-3594](https://orcid.org/0000-0003-4436-3594), Scopus ID [57216874834](https://orcid.org/57216874834); e-mail i.glebov@igduran.ru

Владимир Владимирович Черных – младший научный сотрудник, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук (ИГД УрО РАН), г. Екатеринбург, Российская Федерация; Scopus ID [57760083700](https://orcid.org/57760083700); e-mail chernyh@igduran.ru

Information about the authors

Artem G. Zhuravlev – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Quarry Transport Systems and Geotechnics, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation; ORCID [0000-0001-7643-3994](https://orcid.org/0000-0001-7643-3994), Scopus ID [57211343137](https://orcid.org/57211343137); e-mail juravlev@igduran.ru

Igor A. Glebov – Junior Researcher, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation; ORCID [0000-0003-4436-3594](https://orcid.org/0000-0003-4436-3594), Scopus ID [57216874834](https://orcid.org/57216874834); e-mail i.glebov@igduran.ru

Vladimir V. Chernykh – Junior Researcher, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation; Scopus ID [57760083700](https://orcid.org/57760083700); e-mail chernyh@igduran.ru

Поступила в редакцию 27.09.2022
Поступила после рецензирования 19.01.2023
Принята к публикации 20.01.2022

Received 27.09.2022
Revised 19.01.2023
Accepted 20.01.2022



ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-72>

УДК 622:621.311

**Обоснование схемы замещения шахтной подземной электрической сети для анализа режимов утечки тока через изоляцию**А. В. Пичуев  , В. Л. Петров  

Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация

 allexstone@mail.ru**Аннотация**

Характеристики безопасности и надежности шахтных электротехнических комплексов и систем во многом обеспечивают успешность горных предприятий. Сложные технологические условия, особенно при ведении подземных горных работ, многообразие индивидуальных факторов определяют совокупность требований, которые предъявляются к подземным электрическим сетям горных предприятий. Все это определяет необходимость совершенствования систем защиты персонала на основе исследования характеристик сетей, моделирования режимов работы, в том числе аварийных. Основная цель исследований – обоснование схемы замещения шахтной подземной электрической сети путем синтеза ее структуры для последующего анализа режимов утечки тока через изоляцию. На основе методов математического моделирования дано обоснование параметров схемы замещения шахтной подземной электрической сети с учетом условий возникновения и развития аварийных и травмоопасных ситуаций. Определены количественные показатели и диапазоны изменения параметров элементов схемы замещения электрической сети. Для математического моделирования переходных процессов рекомендовано использование электромагнитных постоянных времени затухания колебаний в контурах, образованных параметрами фазных сопротивлений изоляции, а также абсорбционных составляющих токов утечки, и приведены соответствующие расчетные соотношения. В качестве примера приведена схема замещения шахтной подземной электрической сети с активно-индуктивным фильтром присоединения устройства защитного отключения, позволяющая выполнить анализ утечки тока при однополюсном прикосновении человека к токоведущей фазе, с учетом процесса низкочастотной поляризации в фазной изоляции. Предложенный методический подход к моделированию и анализу режимов утечки тока через изоляцию позволяет осуществить синтез схемы замещения подземной электрической сети для анализа несимметрии фазных напряжений, токов срабатывания устройств защитного отключения, процессов низкочастотной поляризации в изоляции, воздействия тока утечки на человека.

Ключевые слова

шахтная подземная электрическая сеть, режимы утечки тока, защитное отключение, параметры изоляции, источники ЭДС, электробезопасность

Для цитирования

Pichuev A. V., Petrov V. L. Equivalent circuit for mine power distribution systems for the analysis of insulation leakage current. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):78–86. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-72>

POWER ENGINEERING, AUTOMATION, AND ENERGY PERFORMANCE

Research paper

Equivalent circuit for mine power distribution systems for the analysis of insulation leakage currentA. V. Pichuev  , V. L. Petrov  

University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

 allexstone@mail.ru**Abstract**

Successful mining businesses rely heavily on the safety and reliability of their mine power distribution systems. Mine power distribution systems are designed to withstand an aggressive environment with a range of hazards. The harsh operating conditions require improvement to personnel protection systems through the study and simulation of the electric network's normal and emergency operations. The purpose of this study is to assess insulation leakage current using an equivalent circuit of a mine power distribution system. The simulation identified the key properties of the equivalent circuit which can model potential hazardous situations. We also



selected the quantitative metrics and the equivalent circuit property ranges. In order to simulate the transients, we recommended using the time constants for the oscillation damping in circuits, the insulation phase resistance properties, and the absorption currents. This paper presents the equations to estimate these values. As an example, we considered the equivalent circuit of a mine power distribution system with an R-L filter in the residual current device line. The equivalent circuit helps analyze the current leakage when a person touches a live phase conductor accounting for low-frequency polarization in the phase insulation. The proposed approach to the simulation and analysis of the insulation current makes it possible to generate an equivalent circuit of the mine power distribution system to analyze phase voltage asymmetry, trip currents of residual current devices, low-frequency polarization of the insulation, and the leakage current effects on the human body.

Keywords

mine power distribution system, leakage current, residual current device, insulation properties, EMF sources, electrical safety

For citation

Pichuev A. V., Petrov V. L. Equivalent circuit for mine power distribution systems for the analysis of insulation leakage current. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):78–86. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-72>

Термины и определения

Ток утечки – электрический ток, протекающий в землю через открытые, сторонние проводящие части и защитные проводники при нормальных условиях.

Режим утечки тока – режим, который определяется уровнем напряжения отдельных фаз электрической сети относительно земли при различных значениях активного сопротивления и емкости изоляции.

Ток абсорбции – ток, протекающий через изоляционный материал, величина которого зависит от релаксационного вида поляризации и перераспределения свободных зарядов в объеме диэлектрика.

Ток сквозной проводимости – ток, который обусловлен направленным движением заряженных частиц (ионов) при приложении напряжения к изоляционному материалу и сопровождается нейтрализацией зарядов на оболочке или токоведущей жиле проводника электрического тока.

Введение

Характеристики безопасности и надежности шахтных электротехнических комплексов и систем во многом обеспечивают успешность горных предприятий. Сложные технологические условия [1, 2], особенно при ведении подземных горных работ [1, 3, 4], определяют совокупность требований, которые предъявляются к подземным электрическим сетям горных предприятий [1, 5, 6]. Все это определяет необходимость совершенствования систем защиты персонала на основе исследования характеристик сетей, моделирования режимов работы, в том числе аварийных.

В процессе эксплуатации шахтных подземных электрических сетей происходит снижение уровня сопротивления изоляции сети относительно земли. При этом активное сопротивление изоляции каждой из фаз может изменяться как равномерно (режим симметричной утечки тока через изоляцию), так и неравномерно (режимы однофазной и двухфазной утечки тока) [1–3, 5]. В результате возникновения несимметричных утечек происходит существенное изменение фазных напряжений (возрастание в неповрежденных фазах до линейных величин), что не только приводит

к возникновению аварийных режимов в работе электрооборудования, но и представляет серьезную опасность в случае прикосновения человека к фазе сети.

Математическое моделирование режимов утечки позволяет с достаточной степенью точности аналитически описать любые, в том числе и такие сложные, как переходные процессы в электроустановках.

Важным этапом в аналитическом исследовании является обоснование структуры и параметров математической модели, определение целей и задач моделирования, условий и порядка проведения эксперимента, выбор метода обработки результатов исследований.

Основой математической модели для анализа режимов утечки тока, определения уровней напряжения и параметров изоляции электрической сети относительно земли является вывод и составление на основе синтезированной схемы замещения системы уравнений для оценки степени их воздействия на режимы утечки тока.

Анализ научных исследований режимов утечки тока через изоляцию показал, что существует множество различных методов и средств решения поставленных задач в зависимости от конкретных условий, параметров и режимов работы электроустановок.

Многие авторы при решении задач, связанных с вопросами контроля режимов утечки, в своих исследованиях использовали различные варианты схем замещения изоляции электрической сети относительно земли [2, 6, 7]. Изоляция кабельной сети характеризуется *активным сопротивлением*, определяемым качеством изоляционного материала по всей длине линии, и *сосредоточенным сопротивлением*, являющимся результатом механических повреждений, старения, увлажнения и т.д., *емкость изоляции* относительно земли определяется в основном протяженностью электрически связанных линий и сечением кабелей. При этом следует отметить тот факт, что в процессе работы шахтной подземной электрической сети величины сопротивлений и емкости изоляции изменяются с зависимости от последовательности подачи (снятия) питания на отдельные электроустановки, осуществляемой в соответствии

с протоколом запуска (останова). Например, подача электроэнергии на магистральный кабель участковой сети и последующее подключение к магистрали отходящих от распределительного пункта до электроустановок кабельных линий.

При моделировании режимов утечки тока возникают проблемы, обусловленные тем, что переходные процессы по мере усложнения расчетной схемы замещения электрической сети достаточно сложно описать математически. Учет широкого спектра параметров устройств защитного отключения, фазной изоляции сети, цепи утечки тока, компенсаторов емкостного тока, устройств защитного шунтирования и т.д., приводящих к возникновению электромагнитных переходных процессов в RC -колебательных контурах, математическая интерпретация которых до настоящего времени в полной мере не решена, существенно усложняет применение классических методов моделирования. Одним из решений данной проблемы является имитационное моделирование исследуемых режимов утечки, для которого и возникает необходимость разработки соответствующей схемы замещения и подбора ее параметров.

Цели и задачи

Целью данной статьи является обоснование схемы замещения шахтной подземной электрической сети путем синтеза ее структуры для последующего анализа режимов утечки тока через изоляцию в зависимости от решаемой исследователем научной задачи.

К основным задачам, решение которых предложено в статье, относятся:

- обоснование структуры схемы замещения шахтной подземной электрической сети и определение параметров элементов схемы;
- определение расчетных соотношений для электромагнитных постоянных времени затухания колебаний в контурах, образованных параметрами изоляции и дополнительными сопротивлениями цепи утечки тока;

– синтез схемы замещения для решения конкретной научной задачи в области контроля изоляции и защитного отключения.

Структура и параметры модели

Для моделирования режимов была принята схема замещения цепей утечки тока, характерная для шахтной подземной электрической сети напряжением до 1140 В (рис. 1).

Рассмотрим основные элементы схемы замещения для анализа режимов утечки тока через изоляцию и человека, в случае его прикосновения к токоведущей фазе.

Источником ЭДС (рис. 1, а) является вторичная обмотка силового трансформатора передвижной участковой электрической подстанции напряжением 6000/660 (1140) В.

Устройство защитного отключения (УЗО) представлено в виде схемы замещения активно-индуктивного (рис. 1, б) или, как вариант, активно-вентильного (рис. 1, в) фильтров подключения к электрической сети (УЗО типа УАКИ, АЗАК, АЗШ, САЗУ, АСЗС, АЗУР) [7, 8]. УЗО задается параметрами активно-вентильного фильтра: фазные сопротивления цепей подключения к сети $R_{Fa} = R_{Fb} = R_{Fc} = 15$ кОм, сопротивления $R_{PN} = 1$ кОм и индуктивности $L_{PN} = 8$ Г цепи измерителя, подключаемые между искусственной нулевой точкой фильтра присоединения и землей. Для УЗО с активно-индуктивной схемой присоединения принимаются следующие параметры фильтра: фазные активные сопротивления $R_{Fa} = R_{Fb} = R_{Fc} = 0,3$ кОм, фазные индуктивности $L_{Fa} = L_{Fb} = L_{Fc} = 75$ Г, сопротивление и индуктивность цепи измерителя соответственно $R_0 = 3,9$ кОм, $L_0 = 8$ Г [5].

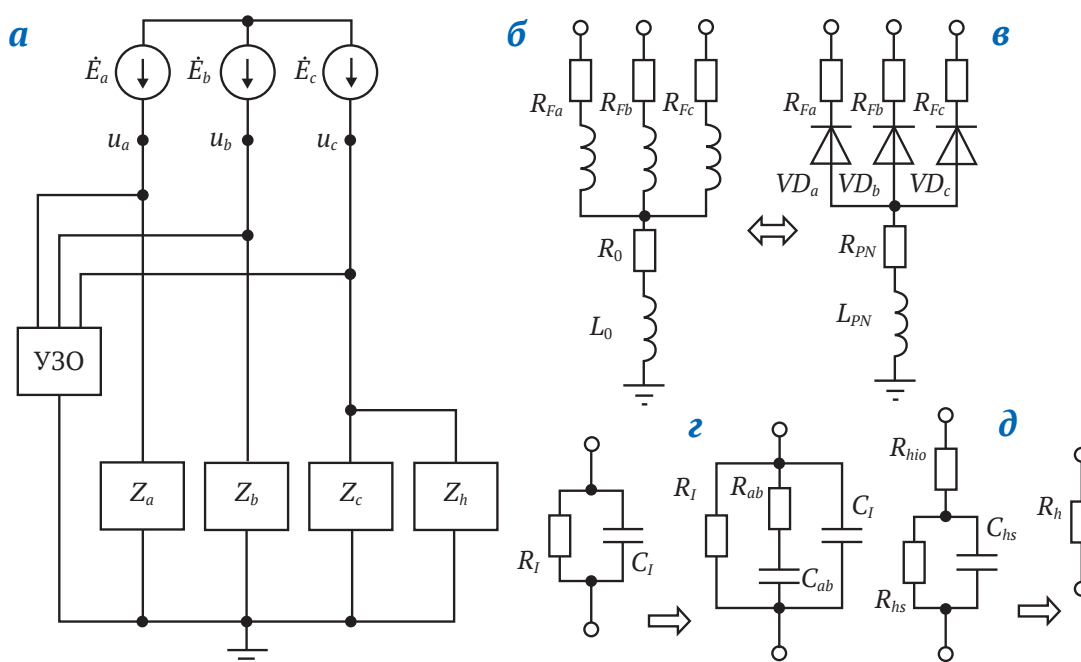


Рис. 1. Схема замещения цепей утечки тока в шахтной подземной электрической сети

Составляющие полных сопротивлений изоляции фаз сети (Z_a, Z_b, Z_c) принимаются в следующих диапазонах: активная – $R_I = 10,5\text{--}300$ кОм/фазу, емкостная – $C_I = 0,1\text{--}1,5$ мкФ/фазу (рис. 1, г). Сопротивление и емкость абсорбции принимаются соответственно в диапазонах $R_{ab} = 0,01\text{--}10$ МОм/фазу, $C_{ab} = 0,01\text{--}0,5$ мкФ/фазу. Составляющие сопротивления цепи утечки тока через схему замещения тела человека (Z_h): сопротивление внутренних органов $R_{hio} = 0,7\text{--}1$ кОм, сопротивление кожных покровов $R_{hs} = 0,5\text{--}3,5$ кОм, емкость кожных покровов $C_{hs} = 0,3\text{--}1$ мкФ (рис. 1, д). При напряжении более 380 В допустимо упрощение $Z_h \approx R_h = R_{hio} = 1$ кОм, т. к. уже при напряжении более 40 В утрачиваются защитные свойства кожных покровов и сопротивление цепи утечки определяется активным сопротивлением внутренних органов [9–11].

Анализ результатов исследований показал, что учет параметров УЗО в схеме замещения электрических цепей утечки значительно усложняет как схему замещения, так и математическую модель [12–14]. Важным фактором является то, что введение в схему замещения узла искусственного смещения нейтрали и дополнительной цепи утечки через измеритель УЗО приводит к заметному (на 15–20 %) возрастанию тока утечки через изоляцию (особенно при активно-вентильном фильтре подключения к сети) [5, 7, 15].

Количественные показатели токов утечки в симметричных режимах на напряжениях 380 и 660 В достаточно известны для схем замещения нулевой последовательности [4, 6, 12].

При всём многообразии схемных решений наиболее распространенными являются схемы замещения нулевой последовательности, для которых параметры изоляции эквивалентируются по формулам:

$$R_I = \frac{R_a R_b R_c}{R_a R_b + R_b R_c + R_c R_a}; \quad C_I = C_a + C_b + C_c, \quad (1)$$

где $R_a, R_b, R_c, C_a, C_b, C_c$ – соответственно фазные активные сопротивления и емкости.

Для таких схем параметры изоляции изменяются в пределах: $R_I = 3,5\text{--}300$ кОм/фазу, $C_I = 0,03\text{--}1$ мкФ/фазу.

Схемы замещения фазной изоляции линейными сосредоточенными емкостями и активными сопротивлениями позволяют более точно описать процессы, происходящие в электрической сети в несимметричных режимах утечки тока.

Для таких схем при анализе токов утечки сопротивления и емкости фаз сети относительно земли задаются в пределах $R_I = 31,5\text{--}300$ кОм и $C_I = 0,3\text{--}3$ мкФ.

С учетом того факта, что исследуемые режимы утечки тока относятся к переходным процессам за время срабатывания УЗО, при моделировании фазную изоляцию целесообразно представить в виде постоянных времени затухания электромагнитных колебаний в RC-контуре:

$$T_{Ia} = \frac{X_{Ia}}{R_{Ia}}, \quad T_{Ib} = \frac{X_{Ib}}{R_{Ib}}, \quad T_{Ic} = \frac{X_{Ic}}{R_{Ic}}, \quad (2)$$

где R_{Ia}, R_{Ib}, R_{Ic} – активные сопротивления изоляции; X_{Ia}, X_{Ib}, X_{Ic} – емкостные сопротивления изоляции

($X_I = 1/(\omega_0 C_I)$); T_{Ia}, T_{Ib}, T_{Ic} – постоянные времени затухания.

Анализ показывает, что амплитуда и скорость затухания электромагнитных колебаний в значительной степени зависят от сочетания активного и емкостного сопротивлений фаз электрической сети. Наибольшие показатели приходятся на сопротивления изоляции до 60 кОм/фазу при емкостях менее 0,3 мкФ/фазу. В диапазоне активного сопротивления $R_I = 60\text{--}300$ кОм/фазу и емкостях более 0,5 мкФ/фазу значения постоянных T_I менее 0,1 рад/с и стремятся к нулю.

Этот факт обусловлен тем, что при больших емкостях активная составляющая не оказывает заметного влияния на характер успокоения колебаний частоты в контурах фазной изоляции, утечка тока носит чисто емкостный характер и защитные свойства изоляции резко снижаются. По сути, утечка тока в фазе не приводит к мгновенному снижению ее фазного напряжения за счет достаточно высокого зарядного потенциала емкости изоляции сети относительно земли. При этом опасность поражения электрическим током резко возрастает [16–18].

При моделировании процесса утечки тока через схему замещения тела человека (рис. 2) в случае учета его параметров в виде активных сопротивлений внутренних органов R_{hio} и кожных покровов R_{hs} , а также емкости кожи C_{hs} ($X_{hs} = 1/(\omega_0 C_{hs})$) выполним следующие преобразования.

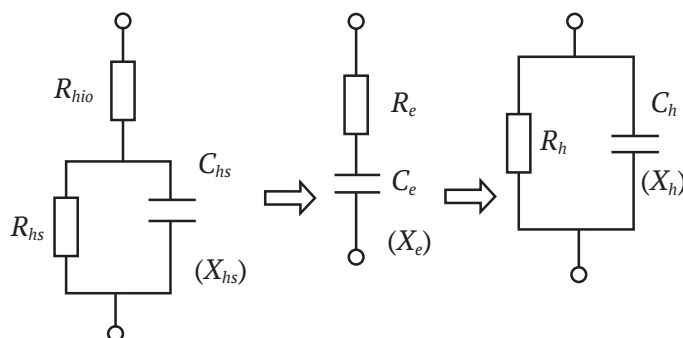


Рис. 2. Преобразование схемы замещения тела человека

Эквивалентные сопротивления для схемы замещения параметров тела человека определяются из выражений:

$$R_e = R_{hio} + \frac{R_{hs} X_{hs}^2}{X_{hs}^2 + R_{hs}^2}; \quad X_e = R_{hio} + \frac{X_{hs} R_{hs}^2}{R_{hs}^2 + X_{hs}^2}. \quad (3)$$

С учетом обратного преобразования цепочки $R_e C_e$ составляющие полного сопротивления тела человека:

$$R_h = \frac{X_e^2 + R_e^2}{R_e}; \quad X_h = \frac{X_e^2 + R_e^2}{X_e}. \quad (4)$$

Тогда активное и емкостное сопротивления фазы сети, в которой произошло однополюсное прикосновение к токоведущей части электрической сети, определяется по формулам:

$$R_{Ih} = \frac{R_I R_h}{R_I + R_h}; \quad X_{Ih} = \frac{X_I X_h}{X_I + X_h}. \quad (5)$$

Электромагнитная постоянная времени затухания колебаний в контуре фазной изоляции с учетом параметров тела человека:

$$T_{th} = \frac{X_{th}}{R_{th}}. \quad (6)$$

В случае пробоя кожных покровов сопротивление тела человека будет определяться только сопротивлением его внутренних органов $R_{hio} \approx 1$ кОм, поэтому параметры цепи утечки определяются по формулам:

$$R_{th} = \frac{R_I}{1+R_I} \approx 1; \quad X_{th} = X_I; \quad T_{th} = \frac{X_I(1+R_I)}{R_I}; \quad (7)$$

Анализ показывает, что в данном случае значение постоянной T_I (2,5–35 рад/с) на порядок превышает аналогичные значения постоянной T_{th} (0,1–3 рад/с). Наибольшее приращение значений T_{th} происходит при величинах сопротивления изоляции менее 31,5 кОм/фазу и емкости изоляции менее 0,3 мкФ/фазу. При увеличении сопротивления изоляции $R_I > 31,5$ кОм/фазу электромагнитные постоянные T_{th} практически не изменяются, их уровень определяется только величиной емкости фазной изоляции C_I .

Этот факт объясняется тем, что в случае прикосновения человека к фазе сети сопротивление цепи утечки через его активную составляющую резко снижается до значений, близких к 1 кОм и практически не зависит от значения R_I . По сути, происходит шунтирование активного сопротивления изоляции. При этом величина тока утечки I_y и электромагнитная постоянная T_{th} зависят только от величины емкости изоляции фазы сети относительно земли.

Для учета процесса низкочастотных поляризаций модель фазной изоляции может быть дополнена RC-цепочкой, состоящей из емкости C_{ab} и активного сопротивления R_{ab} абсорбционному току i_{ab} (рис. 1, 2) [5, 7, 18].

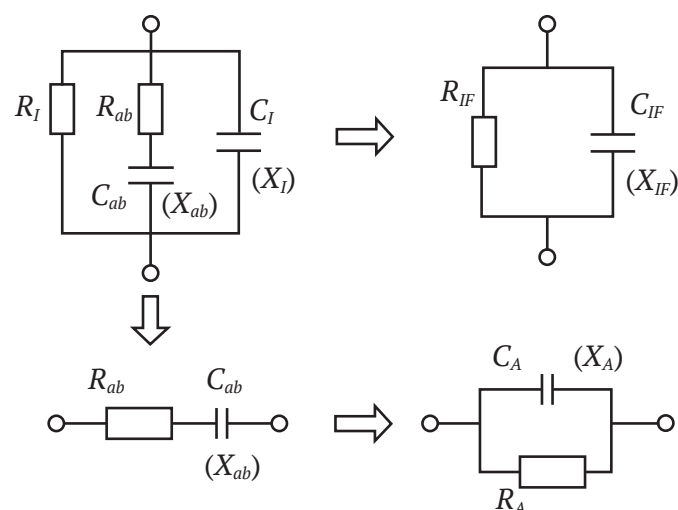


Рис. 3. Этапы преобразования схемы замещения фазной изоляции шахтной подземной электрической сети с учетом активного и емкостного сопротивлений току абсорбции

При математическом анализе электромагнитного переходного процесса в изоляции непосредственный учет дифференциального звена (R_{ab} , X_{ab}) приводит к усложнению математической модели, т.к. последовательная активно-емкостная цепь является так называемым «источником помех» в заданном колебательном контуре. В этом случае необходимо выполнить определенные преобразования схемы замещения фазной изоляции шахтной подземной электрической сети с учетом активного и емкостного сопротивлений току абсорбции (рис. 3).

Следующая зависимость позволяет определить электромагнитную постоянную времени затухания колебаний в контуре активного и емкостного сопротивления изоляции электрической сети:

$$T_{IF} = \frac{X_{IF}}{R_{IF}} = \frac{X_I(R_I R_{ab} + Z_{ab}^2)}{R_I(X_I X_{ab} + Z_{ab}^2)} = T_I \frac{R_I R_{ab} + Z_{ab}^2}{X_I X_{ab} + Z_{ab}^2}, \quad (8)$$

где R_{ab} , X_{ab} , Z_{ab} – активное, емкостное и полное сопротивление току абсорбции в фазе сети; R_{IF} , X_{IF} – составляющие эквивалентного фазного сопротивления изоляции сети относительно земли, определяемые по формулам:

$$R_{IF} = \frac{R_I R_A}{R_I + R_A} = \frac{R_I Z_{ab}^2}{R_I R_{ab} + Z_{ab}^2}; \quad (9)$$

$$X_{IF} = \frac{X_I X_A}{X_I + X_A} = \frac{X_I Z_{ab}^2}{X_I X_{ab} + Z_{ab}^2}.$$

Здесь R_I , X_I – активное и емкостное фазные сопротивления изоляции сети относительно земли, соответствующие их проводимостям сквозного тока; R_A , X_A – активное и емкостное сопротивления току абсорбции, определяемые по формулам:

$$R_A = \frac{R_{ab}^2 + X_{ab}^2}{R_{ab}}; \quad X_A = \frac{R_{ab}^2 + X_{ab}^2}{X_{ab}}. \quad (10)$$

При значениях емкости C_{ab} , соизмеримой с емкостью изоляции C_I , электромагнитная постоянная T_{IF} достигает максимального значения [14].

Использование приведенных выше зависимостей позволяет синтезировать схему замещения шахтной подземной электрической сети для широкого спектра решаемых задач.

В качестве примера на рис. 4 приведена разработанная в среде *Simulink* имитационная модель шахтной электрической сети с активно-индуктивным фильтром присоединения устройства защитного отключения.

Имитационная модель обеспечивает выполнение следующих функций:

- моделирование режимов утечки тока через фазную изоляцию электрической сети с учетом параметров активно-индуктивного фильтра присоединения устройства защитного отключения;
- анализ влияния низкочастотной поляризации на уровень электробезопасности в переходных и установившихся режимах утечки тока через фазную изоляцию шахтной подземной электрической сети;

– анализ переходных и установившихся режимов утечки через фазную изоляцию для оценки потенциальной опасности поражения человека электрическим током в случае прикосновения к токоведущей части электроустановки;

– анализ изменения токов и напряжений в ветвях фильтра присоединения и цепи измерителя устройства защитного отключения в зависимости от режима утечки тока через изоляцию шахтных подземных электрических сетей.

В качестве примера на рис. 5 и 6 приведены осциллограммы токов утечки и фазных напряжений

сети относительно земли при однофазной утечке тока через человека (однополюсное прикосновение к фазе А, $R_h = 1 \text{ кОм}$), симметричных параметрах изоляции $R_i = 300 \text{ кОм}$, $C_i = 0,03 \text{ мкФ}$, $R_{ab} = 1 \text{ МОм}$, $C_{ab} = 0,01 \text{ мкФ}$ и напряжении $U_L = 1140 \text{ В}$.

Представленные осциллограммы позволяют определить в контролируемых узлах схемы замещения количественные показатели мгновенных и действующих значений токов и напряжений, углы фазовых сдвигов, амплитуду ударного тока и длительность переходного процесса при возникновении режима однофазной утечки тока через человека.

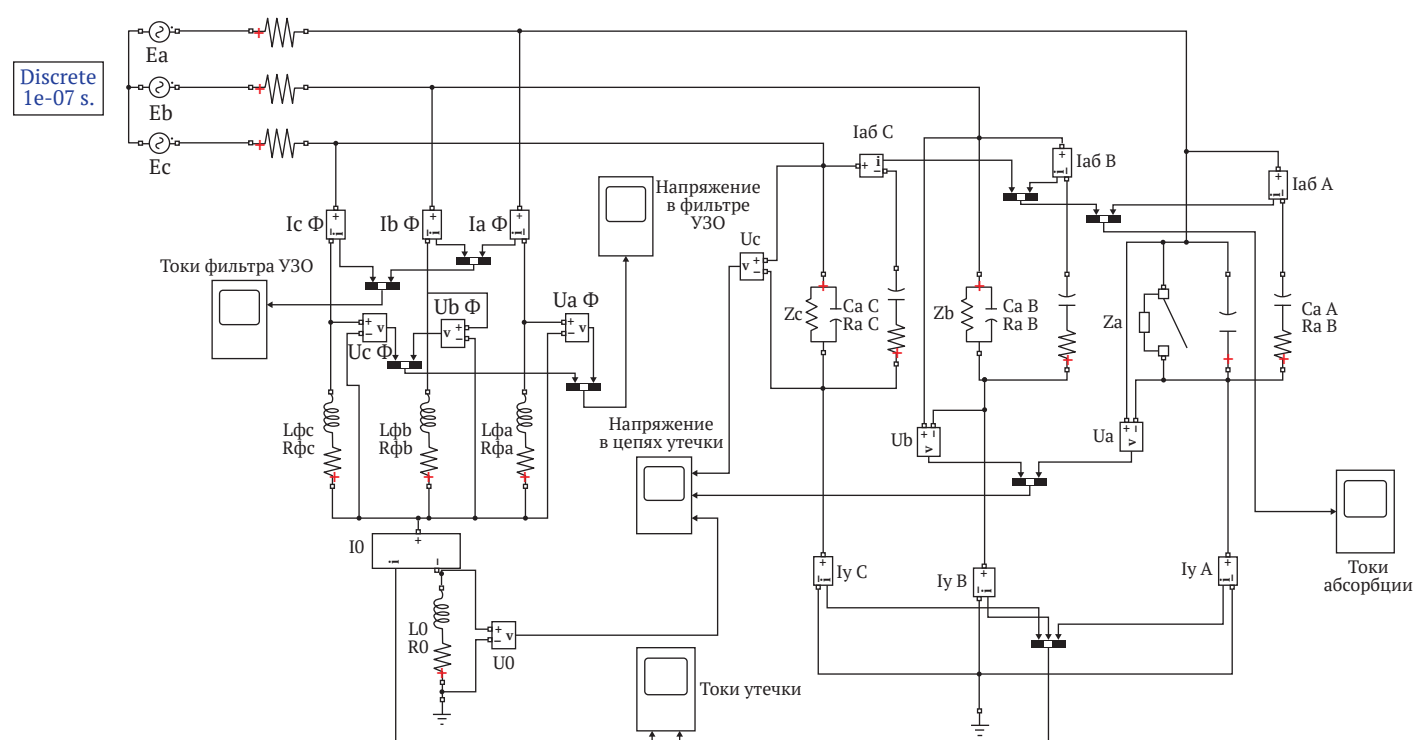


Рис. 4. Имитационная модель шахтной подземной электрической сети с активно-индуктивным фильтром присоединения устройства защитного отключения

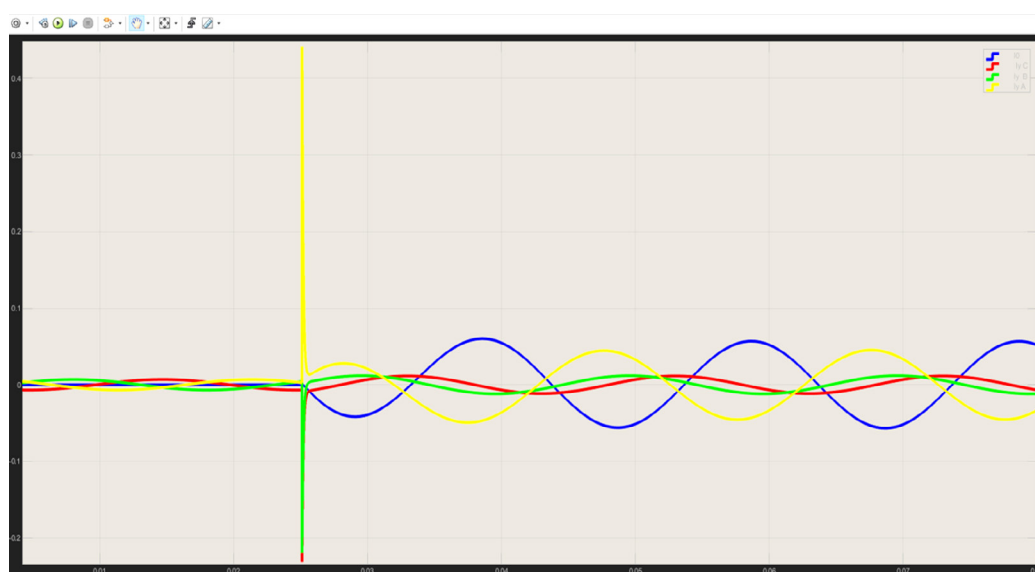


Рис. 5. Осциллограмма токов утечки через изоляцию, тело человека и цепь измерителя УЗО с активно-индуктивным фильтром присоединения к сети

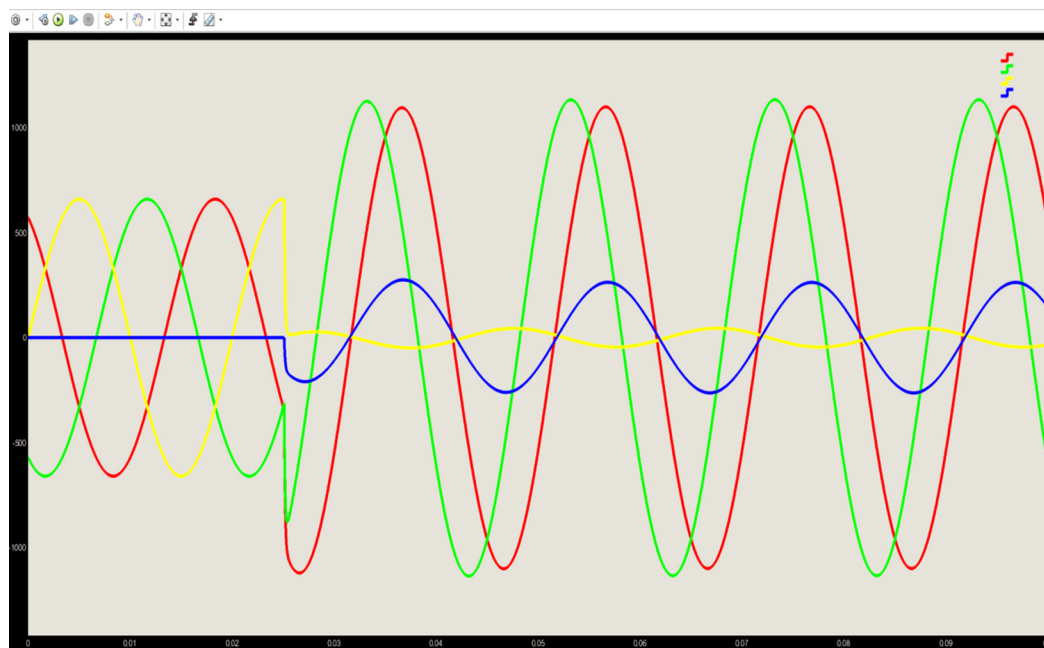


Рис. 6. Осциллограмма фазных напряжений и напряжения нулевой последовательности до и после момента прикосновения человека к токоведущей фазе А

Сравнительный анализ результатов моделирования показал не только высокую сходимость (более 0,95) с аналогичными результатами исследований [5, 7, 13], но и возможность существенно расширить диапазон решения целого ряда задач в области контроля изоляции, определения эффективности устройств защитного отключения и обеспечения электробезопасности шахтных подземных электрических сетей.

Выводы

Предложенная схема замещения шахтной подземной электрической сети может быть использована для анализа токов через изоляцию и фазных напряжений при изменении сопротивления изоляции в симметричных, однофазных и двухфазных режимах утечки, в том числе в случае прикосновения человека к токоведущей части электроустановки.

Параметры схемы замещения источника ЭДС, устройства защитного отключения и цепей утечки

через изоляцию позволяют проводить исследования в широком диапазоне их изменения, в том числе в зоне критических значений. Это позволяет дать более точную количественную и качественную оценку эффективности работы устройств защитного отключения, оценить допустимые уровни сопротивления изоляции и токов через человека, оценить степень влияния низкочастотной поляризации на уровень сопротивления изоляции и дать рекомендации по определению качества изоляционного материала, обоснованию использования средств защитного шунтирования поврежденных фаз, а также применения средств гашения остаточного напряжения в отключаемой сети.

Применение схемы замещения шахтной подземной электрической сети и ее параметров на основе предложенного методического подхода позволяет выполнить решение широкого спектра задач в области контроля изоляции и защитного отключения с учетом специфики горного производства.

Список литературы

1. Гладилин Л.В., Щуцкий В.И., Бацезев Ю. Г. и др. *Электробезопасность в горнодобывающей промышленности*. М.: Недра; 1977. 327 с.
2. Щуцкий В.И., Сидоров А.И., Ситчихин Ю.В. и др. *Электробезопасность на открытых горных работах*. М.: Недра; 1996.
3. Пичуев А.В., Петров В.И., Суворов И.Ф. *Влияние нестационарных режимов на электробезопасность при эксплуатации электрооборудования горных предприятий*. М.: Горная книга; 2011. 326 с.
4. Ключев Р.В., Босиков И.И., Гаврина О.А., Ляшенко В.И. Оценка эксплуатационной надежности электроснабжения развивающихся участков добычи руд на высокогорном руднике. *Горные науки и технологии*. 2021;6(3):211–220. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-3-211-220>
5. Ким К.Е. *Исследование нестационарных режимов шахтных электрических сетей напряжением до 1000 В и их влияние на условия электробезопасности*. [Дисс. канд. техн. наук] М.: МГИ; 1975.
6. Колосюк В.П. *Защитное отключение рудничных электроустановок*. М.: Недра; 1980. 334 с.



7. Сидоров А.И., Петуров В.И., Пичуев А.В. и др. Обеспечение электробезопасности в системах электроснабжения. *Успехи современного естествознания*. 2010;(2):114. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=7752>

8. Петуров В.И. Способ измерения параметров изоляции фаз в сетях с изолированной нейтралью. *Электробезопасность*. 1998;(1):9–12.

9. Kano Murga J. Electricity. The danger of its use and protection of people from electric shock. MF. Per. GPNTB, “Instalador”. 1976;(106):75–78.

10. Pouvel I. Problems de protection dans les reseaux miniers. *Revue de l'industrie minerale*. 1983;25(7). (In French)

11. Kupfer J., Bastek R., Eggert S. Grenzwerte zur Vermeidung von unfallen durch elektrischen strom min tödlichem Ausgang. *Zeitschrift für die Gesamte Hygiene*. 1981;27(1):9–12.

12. Суворов И.Ф. Комплексные системы обеспечения условий электробезопасности при эксплуатации электроустановок до 1000 В. Чита: ЧитГУ; 2005. 328 с.

13. Хусаинов Ш.Н., Сидоров А.И., Хусаинова Н.А. Улучшенный метод определения проводимостей изоляции участка сети, содержащего линию с отпайкой, по результатам измерения режимных параметров. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2002;(7):24–29.

14. Пичуев А.В. Параметрические зависимости сопротивления изоляции рудничных участков электрических сетей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011;(4):398–400.

15. Цапенко Е.Ф. Резонансные перенапряжения в шахтных сетях вследствие применения аппаратов защиты типа УАКИ, АЗАК, АЗШ, АЗУР. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2000;(3):106–109.

16. Цапенко Е.Ф. Состояние защиты от токов утечки на землю в шахтных сетях напряжением до 1200 В. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2003;(6):155–156.

17. Пичуев А.В. Режимы несимметричной утечки тока через изоляцию рудничной участковой электрической сети. *Электробезопасность*. 2011;(2):28–33.

18. Abderrezak H., Mizane A. Hybrid model for insulation active component control in an isolated neutral electrical network. In: *Proceedings of the 2012 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. Istanbul, Turkey, July 3–6, 2012. Pp. 1961–1970. URL: <https://ieomsociety.org/ieom2012/pdfs/466.pdf>

References

1. Gladilin L.V., Shchutsky V.I., Batsezhev Yu.G. et al. *Electrical safety in the mining industry*. Moscow: Nedra; 1977. 327 p. (In Russ.)

2. Shchutsky V.I., Sidorov A.I., Sitchikhin Yu.V. et al. *Electrical safety in open-pit mining*. Moscow: Nedra; 1996. (In Russ.)

3. Pichuev A.V., Peturov V.I., Suvorov I.F. *Effects of non-stationary modes on electrical safety of mining electrical equipment*. Moscow: Gornaya kniga; 2011. 326 p. (In Russ.)

4. Klyuev R.V., Bosikov I.I., Gavrina O.A., Lyashenko V.I. Assessment of operational reliability of power supply to developing ore mining areas at a high-altitude mine. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(3):211–220. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-3-211-220>

5. Kim K.E. *Non-stationary modes in mine electrical networks up to 1,000 V and their impact on electrical safety*. [Ph.D. Thesis] Moscow: Moscow Mining University; 1975. (In Russ.)

6. Kolosyuk V.P. *Emergency tripping in mine electrical installations*. Moscow: Nedra; 1980. 334 p. (In Russ.)

7. Sidorov A.I., Peturov V.I., Pichuev A.V. et al. Electrical safety of power supply systems. *Advances in Current Natural Sciences*. 2010;(2):114. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=7752> (In Russ.)

8. Peturov V.I. Method for measuring phase insulation properties in insulated neutral systems. *Elektrobezopasnost*. 1998;(1):9–12. (In Russ.)

9. Kano Murga J. *Electricity. The danger of its use and protection of people from electric shock*. MF. Per. GPNTB, “Instalador”. 1976;(106):75–78.

10. Pouvel I. Problems de protection dans les reseaux miniers. *Revue de l'industrie minerale*. 1983;25(7). (In French)

11. Kupfer J., Bastek R., Eggert S. Grenzwerte zur Vermeidung von unfallen durch elektrischen strom min tödlichem Ausgang. *Zeitschrift für die Gesamte Hygiene*. 1981;27(1):9–12. (In German)

12. Suvorov I.F. *Integrated electrical safety systems for electrical installations up to 1000 V*. Chita: Chita State University; 2005. 328 p. (In Russ.)

13. Khusainov Sh.N., Sidorov A.I., Khusainova N.A. Improved method for insulation conductivity estimation of a grid segment with a branch line from the electric parameter measurements. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2002;(7):24–29. (In Russ.)

14. Pichuev A.V. Parametric relationships for the insulation resistance of mine electrical networks. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2011;(4):398–400. (In Russ.)



15. Tsapenko E.F. Resonant overvoltages in mine networks caused by the use of UAKI, AZAK, AZSh, AZUR RCP Devices. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2000;(3):106–109. (In Russ.)
16. Tsapenko E.F. Leakage current protection monitoring in mine networks up to 1,200 V. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2003;(6):155–156. (In Russ.)
17. Pichuev A.V. Unsymmetrical current leakage through the insulation in mine electrical networks. *Elektrobezopasnost*. 2011;(2):28–33. (In Russ.)
18. Abderrezak H., Mizane A. Hybrid model for insulation active component control in an isolated neutral electrical network. In: *Proceedings of the 2012 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. Istanbul, Turkey, July 3–6, 2012. Pp. 1961–1970. URL: <https://ieomsociety.org/ieom2012/pdfs/466.pdf>

Информация об авторах

Александр Вадимович Пичуев – кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики и энергоэффективности горной промышленности, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-7457-5702](https://orcid.org/0000-0001-7457-5702), Scopus ID [57209798580](https://scopus.org/57209798580); e-mail allexstone@mail.ru

Вадим Леонидович Петров – доктор технических наук, проректор, профессор кафедры энергетики и энергоэффективности промышленных предприятий, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-6474-5349](https://orcid.org/0000-0002-6474-5349), Scopus ID [8919065900](https://scopus.org/8919065900); e-mail petrovv@misis.ru

Information about the authors

Alexandr V. Pichuev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Energy and Energy Efficiency of Mining Industry, University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0001-7457-5702](https://orcid.org/0000-0001-7457-5702), Scopus ID [57209798580](https://scopus.org/57209798580); e-mail allexstone@mail.ru

Vadim L. Petrov – Dr. Sci. (Eng.), Vice-Rector, Professor of the Department of Energy and Energy Efficiency of Industrial Enterprises, University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-6474-5349](https://orcid.org/0000-0002-6474-5349), Scopus ID [8919065900](https://scopus.org/8919065900); e-mail petrovv@misis.ru

Поступила в редакцию	07.01.2023	Received	07.01.2023
Поступила после рецензирования	25.01.2023	Revised	25.01.2023
Принята к публикации	26.01.2023	Accepted	26.01.2023



ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ В ГОРНОПРОМЫШЛЕННОМ СЕКТОРЕ ЭКОНОМИКИ

Обзорная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-08-16>

УДК 622.276:004.67



Оценка уровня цифровизации и цифровой трансформации нефтегазовой отрасли РФ

В.В. Юрак^{1,2}  , И.Г. Полянская¹  , А.Н. Малышев^{1,2}  ¹ Институт экономики УрО РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация² Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация vera_yurak@mail.ru

Аннотация

Цифровизация и цифровая трансформация компаний из мировых тенденций превратились в насущную необходимость. Организации благодаря цифровизации и цифровой трансформации могут с меньшими потерями преодолевать кризисные времена, времена локдаунов и наиболее эффективно отвечать на любые негативные изменения внешней среды. Оценка уровня цифровизации и цифровой трансформации позволяет определить: насколько быстро протекают процессы внедрения цифровых технологий и оптимизации процессов цифровыми решениями как в компаниях, так и в отрасли в целом. В статье проведен анализ с систематизацией зарубежных и отечественных методов, методологических подходов, методик по оценке уровня цифровизации и цифровой трансформации; выявлены их положительные и отрицательные стороны. На базе сравнительного анализа предложен усовершенствованный авторский методический инструментарий по оценке уровня цифровизации и цифровой трансформации, нивелирующий недостатки существующего методического опыта. Апробация авторского методического инструментария была выполнена на примере нефтегазовой отрасли; анализу подлежали следующие компании – лидеры отрасли: ПАО «ЛУКОЙЛ», ПАО НК «Роснефть», ПАО «Газпром», а также ПАО «Татнефть». Результаты продемонстрировали недостаточную динамику процессов цифровизации и цифровой трансформации отечественной нефтегазовой отрасли. Было выявлено, что лидеры отрасли в период с 2016 по 2020 г. в РФ по уровню цифровизации и цифровой трансформации располагаются в следующем порядке от наиболее продвинутых к наименее продвинутым: ПАО «Газпром» на первом месте; на втором ПАО «НК «Роснефть»; на третьем ПАО «Лукойл»; на четвертом ПАО «Татнефть».

Ключевые слова

нефтегазовая отрасль, цифровизация, цифровая трансформация, оценка, методологические подходы, методический инструментарий, сравнительный подход, ранжирование, стратегическое развитие, сравнительный анализ, Российская Федерация

Для цитирования

Yurak V.V., Polyanskaya I.G., Malyshev A.N. The assessment of the level of digitalization and digital transformation of oil and gas industry of the Russian Federation. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):87–110. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-08-16>

EXPERIENCE OF MINING PROJECT IMPLEMENTATION

Review paper

The assessment of the level of digitalization and digital transformation of oil and gas industry of the Russian Federation

V. V. Yurak^{1,2}  , I. G. Polyanskaya¹  , A. N. Malyshev^{1,2}  ¹ Institute of Economics of Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russian Federation² Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation vera_yurak@mail.ru

Abstract

Digitalization and digital transformation of companies have turned from global trends to an urgent need. Thanks to digitalization and digital transformation, organizations can overcome the times of crisis, the times of lockdowns with less losses and respond more effectively to any adverse changes in the external environment. The assessment of the level of digitalization and digital transformation allows to determine



how fast the processes of introducing digital technologies and optimizing processes with digital solutions proceed, both in companies and across the industry as a whole. The article provides an analysis with the systematization of foreign and domestic methods, methodological approaches, methods for assessing the digitalization level and digital transformation, as well as reveals their positive and negative aspects. Based on a comparative analysis, an improved author-developed methodological toolkit is proposed for assessing the level of digitalization and digital transformation, alleviating the disadvantages of the existing methodological experience. The approbation of the author-developed methodological toolkit was performed using the oil and gas industry as an example; the following companies, being the industry leaders, were analysed: PJSC “Lukoil”, PJSC “NK “Rosneft”, PJSC “Gazprom”, and PJSC “Tatneft”. According to the results, the digitalization and digital transformation processes of the domestic oil and gas industry are insufficiently dynamic. It was found that in the period from 2016 to 2020, the Russian Federation industry leaders were in the following order from the most advanced to the least advanced in terms of the digitalization level and digital transformation: PJSC “Gazprom” topped the list; PJSC “NK “Rosneft” was second; PJSC “Lukoil” was the third largest company, and PJSC “Tatneft” held the fourth position.

Keywords

oil and gas industry, digitalization, digital transformation, assessment, methodological approaches, methodological toolkit, comparative approach, ranking, strategic development, comparative analysis, Russian Federation

For citation

Yurak V.V., Polyanskaya I.G., Malyshev A.N. The assessment of the level of digitalization and digital transformation of oil and gas industry of the Russian Federation. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):87–110. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-08-16>

Введение

Об актуальности цифровизации и ее трансформации в нефтегазовой отрасли свидетельствует как общемировая ситуация, связанная с изменением цен на нефть и санкционной политикой в отношении России, так и необходимость разработки трудноизвлекаемых запасов нефти в условиях истощения эксплуатируемых месторождений и арктических проектов с использованием цифровых моделей [1–3]. Значимость разработки трудноизвлекаемых запасов в России связана «...с увеличением их доли в структуре запасов углеводородов (сейчас она превышает 65 % от общего объема) и прогнозами о падении добычи нефти к 2035 г. на 44 %, до 310 млн т. В 2017 г. добыча нефти в России из трудноизвлекаемых запасов составляла 39 млн т, а к 2035 г. этот показатель, по прогнозу Минэнерго РФ, составит 80 млн т/год» [4]. В создавшихся условиях именно цифровые решения¹ [5] становятся приоритетными направлениями в повышении эффективности деятельности компаний² [6]. Сегодня практически

все ведущие нефтегазовые компании в мире³ [7–9] основывают стратегию своего развития на использовании цифровой трансформации в качестве главного направления [7–9]. Отрасль внедряет технологические процессы, так как цифровая трансформация является весомым конкурентным преимуществом, она способствует повышению рентабельности нефтегазовых компаний и увеличивает их устойчивость на рынке.

³ Siemens. Making the digital leap with Topsiders 4.0. URL: <https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:a0f97b62-5070-46a3-984f-1ed4144e398d/topsiders-whitepaper.pdf> (Дата обращения: 12.06.2022)

BP. BP Sustainability report 2018. Responding to the dual challenge. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/sustainability/group-reports/bp-sustainability-report-2018.pdf> (Дата обращения: 12.06.2022)

Equinor. Equinor Sustainability report 2018. URL: <https://www.equinor.com/en/news/2019-03-15-annual-sustainability-reports-2018.html> (Дата обращения: 12.06.2022)

Chevron. Chevron Sustainability report 2018. Climate change resilience framework. URL: <https://www.chevron.com/-/media/shared-media/documents/climate-change-resilience.pdf> (Дата обращения: 12.06.2022)

Eni. Eni Sustainability report 2018. URL: <https://www.eni.com/assets/documents/EniFor-2018-eng.pdf> (Дата обращения: 12.08.2022)

ExxonMobil. ExxonMobil Sustainability report 2018. Highlights. URL: <https://corporate.exxonmobil.com/Community-engagement/Sustainability-Report> (Дата обращения: 12.06.2022)

Shell. Shell Energy transition report 2018. URL: https://www.shell.com/energy-and-innovation/the-energy-future/shell-energy-transition-report/_jcr_content/par/toptasks.stream/1524757699226/3f2ad7f01e2181c302cdc453c5642c77acb48ca3/web-shell-energy-transition-report.pdf (Дата обращения: 12.06.2022)

Sinopec. Sinopec Sustainability report 2018. URL: http://www.sinopec.com/listco/en/investor_centre/reports/2018/ (Дата обращения: 12.06.2022)

¹ ИНТЕРЭНЕРГО. О цифровой трансформации «Газпром нефти» и технологических трендах нефтяной отрасли. URL: <https://ieport.ru/stat/325802-o-cifrovoj-transformacii-gazprom-nefti-i-technologicheskix-trendax-neftyanoj-otrasli.html> (Дата обращения: 12.06.2022)

Нефтегаз-ЭКСПО. Нефтяные организации. URL: <https://www.neftegaz-expo.ru/ru/ui/17160/> (Дата обращения: 12.06.2022)

² Агентство нефтегазовой информации. ЛУКОЙЛ внедряет цифровые модели месторождений. URL: <https://www.angi.ru/news/2878022-ЛУКОЙЛ-внедряет-цифровые-модели-месторождений/> (Дата обращения: 12.06.2022)

Neftegaz.RU. Стратегия «Роснефть-2022». URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/menedzhment/142430-strategiya-rosneft-2022/> (Дата обращения: 12.06.2022)



Полная цифровизация деятельности компаний и законченная цифровая трансформация могут позволить им стать как минимум на 20 % эффективнее, чем есть сейчас [7].

Наряду с положительными тенденциями развития цифровизации в ведущих компаниях нефтегазовой отрасли в России остаются нерешенными проблемы, тормозящие ее трансформацию и формирование цифровых платформ. Наибольшая проблема видится в зависимости отрасли от зарубежных технологий, оборудования, программного обеспечения и инвестиций, усугубляющейся в условиях санкций и других ограничений. Уровень импортозамещения остается недостаточным. Если говорить об арктических шельфовых проектах, то они практически не осваиваются после выхода из совместных проектов американских компаний ExxonMobil и британской BP, владеющих необходимыми технологиями. Компания Shell также остановила свою деятельность. Компания Total передала долю в месторождениях баженовской свиты «Лукойлу», долю в «Штокмане» – «Газпрому» [10]. «Многие западные нефтесервисные компании также уменьшили размер своего бизнеса в России» [1]. Положение усугубляется пандемией COVID-19, сдерживающей рост финансовых результатов деятельности компаний, влияющих на объемы инвестиций в НИОКР и различного рода инновации.

Другой серьезной проблемой отрасли является – подготовка квалифицированных кадров [11, 12]. Эта проблема свойственна всему минерально-сырьевому комплексу [13, 14]. Требуются специалисты «с цифровыми компетенциями, такими как аналитика и работа с большими данными (big data), робототехника, эксплуатация беспилотных летательных аппаратов, программирование, 3D-моделирование» [2], а также компетенциями новых возникающих профессий в отрасли, связанными с цифровизацией [15].

Проблемными остаются вопросы, связанные с экономической безопасностью и коммерческой тайной при обмене техническими данными. По мнению экспертов, финансирование, заложенное в программе «Цифровая экономика» на информационную безопасность, оставляет желать много лучшего. В связи с чем российские компании, в отличие от зарубежных, нередко опасаются делиться информацией. В свою очередь, это может тормозить процесс прогнозирования нейронных сетей [16].

Успеху трансформации цифровизации в отрасли в значительной степени препятствует отсутствие в компаниях оптимального уровня управления всей совокупностью процессов из единого центра управления.

Вырисовывается также проблема институционального обеспечения или правового регулирования деятельности цифровых платформ, охватывающих, наряду с головной, совокупность различных организаций. Проблема возникает «из-за отсутствия четкого юридического определения цифровой платформы в юрисдикции большинства стран, в том числе и в России» [17]. В российском законодательстве Фе-

деральным проектом «Нормативное регулирование цифровой среды», разработанном в развитие Указа Президента РФ от 7 мая 2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года», предусматривается разработка перечня нормативных актов по снятию препятствий в развитии цифровой экономики. Урегулирование касается смежных административно-производственных и хозяйственных вопросов предприятий сопредельных отраслей, входящих в состав цифровой платформы, связанных в том числе с правовым статусом, защитой прав, обязанностей, безопасностью.

Наряду с обозначенными проблемами требует дальнейшего развития и вопрос разработки методического обеспечения оценки уровня цифровизации и цифровой трансформации, а также экономической оценки внедрения достигнутых уровней в отраслевом разрезе, которые были бы применимы для каждого отраслевого предприятия (компании), а также цифровой трансформации. Наличие такого методического обеспечения позволит вовремя диагностировать «узкие места» и эффективно управлять цифровизацией и цифровой трансформацией.

Отсюда *цель* текущего исследования заключается в совершенствовании системы управления цифровизацией и цифровой трансформацией нефтегазовой отрасли посредством разработки авторских методических рекомендаций, нивелирующих недостатки существующих методик.

Цель определила необходимость выполнения следующих задач:

1. Анализ теоретических основ цифровизации и цифровой трансформации.
2. Оценка текущего состояния цифровой трансформации нефтегазовой отрасли.
3. Изучение, анализ и систематизация общих, отраслевых и производственных (для отдельных предприятий и компаний) зарубежных и отечественных методов, методических подходов, рекомендаций и методик к оценке цифровизации, цифровой трансформации.
4. Разработка усовершенствованной авторской методики оценки уровня цифровизации и цифровой трансформации нефтегазовой отрасли, нивелирующей недостатки существующих методик.

Методы исследования

Методическую базу исследования составили стандартные общенаучные методы, а также метод контент-анализа при изучении и систематизации общих, отраслевых и производственных (для отдельных предприятий и компаний) зарубежных и отечественных методов, методических подходов, рекомендаций и методик по оценке уровня цифровизации и цифровой трансформации. Также были использованы методы математической статистики и форсайт-метод при формировании авторской методики оценки уровня цифровизации и цифровой трансформации нефтегазовой отрасли, нивелирующей недостатки существующих методик.

Результаты и обсуждение

Анализ теоретических основ цифровизации и цифровой трансформации

Цифровая трансформация характеризуется проникновением прогрессивных технологий, внедряемых в процессе цифровизации, во всю совокупность осуществляемых бизнес-процессов компаний. Наряду с этим «под цифровой трансформацией все чаще принято понимать управляемую адаптацию компаний в контексте прогрессирующей цифровизации для обеспечения устойчивого создания ценностей» [18]. В России осуществление этих процессов предполагается в условиях цифровой экономики, которая Указом Президента РФ от 07.05.2018 г. № 204 определена одной из национальных целей развития Российской Федерации на период до 2024 года и выделена в числе приоритетных национальных проектов. Одна из задач, поставленных для достижения цели, сформулирована как преобразование приоритетных отраслей экономики, в том числе промышленности, транспортной и энергетической инфраструктуры «посредством внедрения цифровых технологий и платформенных решений»⁴. Очевидно, что к недропользованию это имеет непосредственное отношение. Основные направления развития цифровой экономики были утверждены ранее в соответствующей программе распоряжением Правительства РФ от 28.07.2017 г. № 1632⁵.

Соотношение основных терминов представлено на рис. 1. Термин «цифровая экономика» в 1995 г. ввел канадский учёный Дон Тапскотт, описав цифровую форму представления объектов, влияние информационных технологий на бизнес, систему государственного управления и т.д. [19]. Далее термин «цифровая экономика» трактовался другими авторами по-разному, хотя и близко по смыслу [20–23].

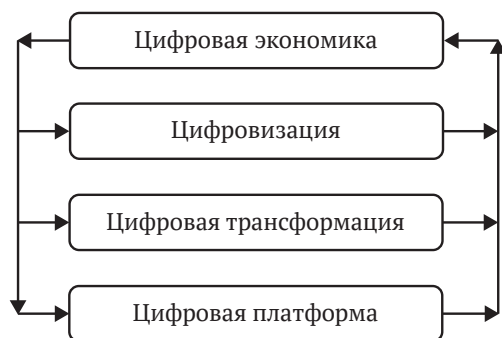


Рис. 1. Хронология развития понятийного аппарата и соотношение понятий цифровой экономики и цифровой трансформации

⁴ Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года». URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/43027/page/1> (Дата обращения: 12.06.2022)

⁵ Распоряжение Правительства РФ от 28.07.2017 г. № 1632-р «Об утверждении программы цифровая экономика Российской Федерации». URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71634878/> (Дата обращения: 12.06.2022)

Указом Президента РФ от 9 мая 2017 г. № 203 «цифровая экономика» определена в качестве «хозяйственной деятельности, в которой ключевым фактором производства являются данные в цифровом виде, обработки больших объемов и использования результатов анализа которых, по сравнению с традиционными формами хозяйствования, позволяют существенно повысить эффективность различных видов производства, технологий, оборудования, хранения, продажи, доставки товаров и услуг»⁶.

Ключевым понятием для понимания терминов «цифровая экономика» и «цифровая трансформация» является – «цифровизация», которая в общем трактуется как «процесс внедрения цифровых технологий генерации, обработки, передачи, хранения и визуализации данных в различные сферы человеческой деятельности» [24], а также – «интеграция цифровых технологий в повседневную жизнь путем оцифровки всего, что можно оцифровать»⁷.

К отраслям, где особое внимание обращается на вопросы цифровизации и трансформации цифровизации, относится и нефтегазовая. Непосредственно о цифровизации нефтегазового комплекса как составной части ТЭК (топливно-энергетического комплекса), ее сущности и перспективах развития идет речь в рамках ведомственной программы «Цифровая энергетика», разработанной в продолжение основных федеральных нормативных актов, касающихся цифровизации.

«Под цифровизацией нефтегазового комплекса следует понимать применение новых высоких технологий в рамках уже существующих бизнес-процессов без изменения их принципов и структуры» [25]. Цифровая трансформация предполагает совершенствование и изменение бизнес-процессов посредством управления совокупностью элементов цифровых технологий.

В общем виде схема цифровой трансформации нефтегазовой отрасли, включая ее влияние на конечные результаты деятельности компаний, может быть представлена в следующем виде (рис. 2). Согласно рис. 2 к цифровым технологиям, основанным на принципах искусственного интеллекта, закрепленных в национальной стратегии его развития до 2030 года⁸, и внедряемым в нефтяной отрасли России, относятся: большие данные, нейросети, цифровые двойники, когнитивные технологии, машинное обучение.

⁶ Указ Президента Российской Федерации от 09.05.2017 г. № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы». URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/41919> (Дата обращения: 12.06.2022)

⁷ Люди Роста. Глобальная цифровизация. URL: https://ludirosta.ru/post/globalnaya-tsifrovizatsiya_2225 (Дата обращения: 12.06.2022)

⁸ Указ Президента РФ от 10 октября 2019 г. № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации». URL: <https://garant.ru/products/ipo/prime/doc/72738946/> (Дата обращения: 12.06.2022)

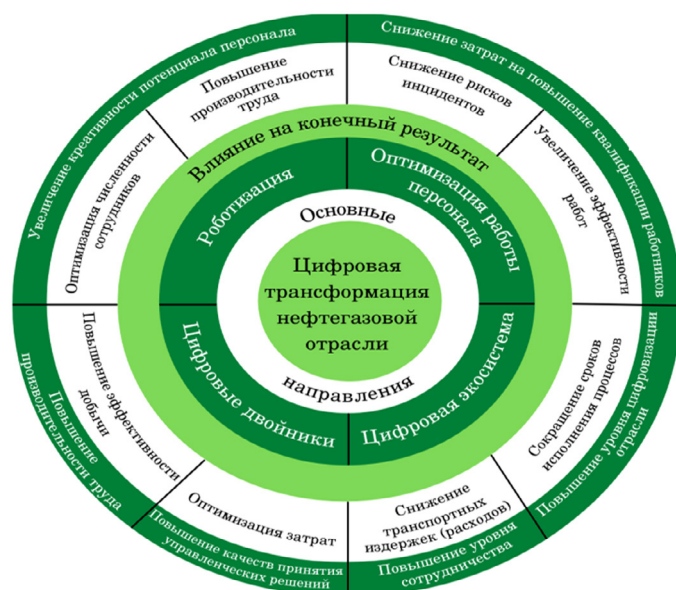


Рис. 2. Основные направления цифровой трансформации нефтегазовой отрасли и их влияние на конечный результат

Оценка текущего состояния цифровой трансформации нефтегазовой отрасли: основные направления цифровой трансформации крупнейших российских нефтегазовых компаний

Цифровая трансформация сейчас происходит во всех крупных нефтегазовых компаниях [16]. Это относится и к зарубежным, и к российским компаниям. Зарубежные нефтегазовые компании, такие как Equinor⁹, BP¹⁰, Shell¹¹, имеют высокий уровень цифровизации и цифровой трансформации, для достижения которого совершенствуя, наряду с цифровыми технологиями, партнерские отношения в области создания платформ для цифровой трансформации¹² [7–9].

⁹ Equinor. Equinor Sustainability report 2018. URL: <https://www.equinor.com/en/news/2019-03-15-annual-sustainability-reports-2018.html> (Дата обращения: 12.06.2022)

¹⁰ BP. BP Sustainability report 2018. Responding to the dual challenge. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/sustainability/group-reports/bp-sustainability-report-2018.pdf> (Дата обращения: 12.06.2022)

¹¹ Shell. Shell Energy transition report 2018. URL: https://www.shell.com/energy-and-innovation/the-energy-future/shell-energy-transition-report/_jcr_content/par/toptasks.stream/1524757699226/3f2ad7f01e2181c302cdc453c5642c77acb48ca3/web-shell-energy-transition-report.pdf (Дата обращения: 12.06.2022)

¹² Siemens. Making the digital leap with Topsiders 4.0. URL: <https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:a0f97b62-5070-46a3-984f-1ed4144e398d/topsiders-whitepaper.pdf> (Дата обращения: 12.06.2022)

Chevron. Chevron Sustainability report 2018. Climate change resilience framework. URL: <https://www.chevron.com/-/media/shared-media/documents/climate-change-resilience.pdf> (Дата обращения: 12.06.2022)

Eni. Eni Sustainability report 2018. URL: <https://www.eni.com/assets/documents/EniFor-2018-eng.pdf> (Дата обращения: 12.08.2022)

ExxonMobil. ExxonMobil Sustainability report 2018. Highlights. URL: <https://corporate.exxonmobil.com/Community-engagement/Sustainability-Report> (Дата обращения: 12.06.2022)

В России «технологический портфель нефтяных компаний состоит из сотен проектов, направленных на максимизацию нефтеотдачи на традиционных месторождениях, а также на обеспечение доступа и возможности эффективной разработки трудноизвлекаемых запасов» [5]. При этом сложность цифровизации в отрасли выше, чем в других отраслях. «Бизнес состоит из управления сложными физическими и химическими процессами, а также большим количеством сложных производственных и нефтедобывающих активов. Работа осуществляется в рамках сложной киберфизической системы, где реальное производство совмещено с его цифровым двойником»¹³. Среди нефтяных организаций можно выделить такие крупные холдинги, как ПАО «ЛУКОЙЛ», ПАО «НК «Роснефть», ПАО «Газпром», являющиеся лидерами по цифровизации и цифровой трансформации в отрасли¹⁴. Неплохие результаты демонстрирует и ПАО «Татнефть». Остановимся более детально на каждой из компаний.

ПАО «НК «Роснефть». Предприятия компании обеспечивают более 35 % добычи жидких углеводородов в России. Половина добытого сырья извлекается из крупных месторождений: Приобское, Самотлорское, Приразломное и Малобалыкское (ХМАО – Югра), Ванкорское (Красноярский край), Верхнечонское (Иркутская обл.)¹⁵

Комплексный план цифровизации компании является составной частью стратегии «Роснефть-2022», утвержденной в 2017 г. План включает такие программы, как: «цифровое месторождение», «цифровой завод», «цифровая цепочка поставок», «цифровая АЗС», реализация которых будет способствовать переходу на более высокий уровень информационного обслуживания бизнеса, надежности и экономичности производств, а также сокращению потерь. При этом увеличивается управляемость и скорость принятия решений по всей производственной цепочке компании. Стратегией предусмотрено внедрение 78 испытанных технологий и получение эффекта от внедрения в размере более 11 млрд руб.¹⁶

На Илишевском месторождении (Башкирия) функционирует «Цифровое месторождение» – «аналог реального производства, где все процессы, начиная с добычи и транспортировки нефти, заканчивая перемещением персонала и транспорта, отражаются на цифровой платформе. Процесс осуществляется на

¹³ INTERENERGO. On the digital transformation of Gazprom Neft and technological trends in the oil industry. URL: <https://ieport.ru/stat/325802-o-cifrovoj-transformacii-gazprom-nefti-i-technologicheskix-trendax-neftyanoj-otrasli.html> (Дата обращения: 12.06.2022)

¹⁴ Нефтегаз-ЭКСПО. Нефтяные организации. URL: <https://www.neftegaz-expo.ru/ru/ui/17160/> (Дата обращения: 12.06.2022)

¹⁵ Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевой базы Российской Федерации в 2020 году». М.: Министерство природных ресурсов и экологии России. Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра); 2021. С. 22–23.

¹⁶ Tadviser. Государство. Бизнес. Технологии. Информационные технологии в Роснефти.



базе «цифровых двойников» с использованием платформы 3D-визуализации. В отдельный проект определена система мониторинга трубопроводов с использованием дронов, основанная на технологиях машинного обучения и компьютерного зрения»¹⁷.

В качестве ключевых механизмов реализации цифровых программ выступают Центр цифровой трансформации и Цифровой кластер. На основе алгоритма искусственного интеллекта на объекте ПАО «Варьеганнефтегаз» внедрена технология компьютерного зрения. «Созданы детализированные трехмерные модели для шести добывающих активов («РН-Уватнефтегаз», «Славнефть-Красноярскнефтегаз», «РН-Ванкор», «НК «Конданефть», «Верхнеконскнефтегаз» и «Востсибнефтегаз»). Трехмерные модели будут использованы при создании единой информационно-технологической среды мониторинга работы нефтепромыслов с использованием продвинутой визуализации и трехмерного двойника актива»¹⁸.

Компания все свои проекты осуществляет на основе внедрения инновационных технологий, в том числе это касается и использования уникальных отечественных буровых установок в северном исполнении, а также собственного программного обеспечения¹⁹. Для соединения Ванкорского и Пайяхского кластеров со строящимся нефтеналивным терминалом порта «Бухта Север» компания строит 770-километровый трубопровод²⁰.

ПАО «Газпром нефть» разрабатывает месторождения в крупнейших нефтегазоносных регионах страны – Ханты-Мансийском и Ямало-Ненецком автономных округах, а также в Иркутской, Омской, Оренбургской, Томской областях и на шельфе Баренцева моря. Ключевым активом компании является южная часть Приобского месторождения (ООО «Газпромнефть-Хантос»), где добыча нефти в 2020 г. составила 10 млн т. Компанией ведутся активные работы по развитию новых крупных проектов разработки Новопортовского, Приразломного и Восточно-Мессояхского месторождений²¹.

Политика цифровой трансформации осуществляется на всех этапах деятельности – от геологоразведки до реализации продукции. В 2013 г. инновационные технологии начали внедряться в компании «Газпромнефть-Хантос», и уже с 2017 г. здесь функци-

онирует центр управления добычей (ЦУД)²². Позднее цифровая трансформация утверждается в перечне приоритетных направлений деятельности компании, координируемой профильной дирекцией²³.

В 2019 г. ПАО «Газпром нефть» «запустила более 150 новых цифровых инициатив и 10 программ цифровой трансформации»²⁴.

Компания «фокусируется на применении цифровых технологий, в том числе на ранних этапах работы с активами, когда создается максимальная стоимость, ведь неопределенности по геологическим объектам еще слишком велики и принятие качественных решений носит критический характер»²⁵.

Реализуются такие проекты, как: «Когнитивный геолог», позволяющий при использовании исходной геологической информации «дать четкую математическую оценку вероятности успеха в том или ином случае»²⁶; проект «цифровое бурение», способствующий проведению дистанционного управления из Центра управления бурением «Гео-Навигатор» (ЦУБ); «Умное месторождение», который «позволяет в режиме онлайн посмотреть любую информацию по разработке месторождения – параметры работы скважин, историю и планы ремонтов, уровни компенсации отборов жидкости, проведенные и планируемые исследования»²⁷; «Когнитивный инжиниринг», оптимизирующий с помощью машинного интеллекта множество схем разработки месторождения.

Разработка Новопортовского нефтегазоносного месторождения осуществляется с использованием интегрированной модели, «включающей: пять гидродинамических моделей основных объектов разработки; модели добывающих и нагнетательных скважин; модели наземной сети сбора продукции, в том числе

¹⁷ Tadviser. Государство. Бизнес. Технологии. Информационные технологии в Роснефти.

¹⁸ Там же.

¹⁹ Екб. Царьград. Шах и мат на Таймыре: «Восток Ойл» перевернёт мировую энергетику Ойл». URL: https://tsargrad.tv/articles/shah-i-mat-na-tajmyre-vostok-ojl-perevernjot-mirovuju-jenergetiku_592772 (Дата обращения: 01.08.2022)

²⁰ BFM. «Роснефть» приступила к эксплуатационному бурению на Пайяхском месторождении проекта «Восток Ойл».

²¹ Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевой базы Российской Федерации в 2020 году». М.: Министерство природных ресурсов и экологии России. Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра). 572 с.

²² Эксперт. Аналитический центр. Цифровой фонтан. URL: <http://www.acexpert.ru/archive/nomer-20-796/cifrovoy-fontan.html> (Дата обращения: 27.09.2021)

²³ Газпром нефть. Цифровизация — это фундаментальный тренд. URL: <https://www.gazprom-neft.ru/press-center/sibneft-online/archive/2018-may/1589542/> (Дата обращения: 23.07.2022)

²⁴ Comnews. Цифровая трансформация «Газпром нефти» дала экономический эффект. URL: <https://www.comnews.ru/content/208475/2020-08-06/2020-w32/cifrovaya-transformatsiya-gazprom-nefti-dala-ekonomicheskii-effekt> (Дата обращения: 23.08.2021)

²⁵ Газпром нефть. О цифровой трансформации «Газпром нефти» и технологических трендах нефтяной отрасли. URL: <https://www.gazprom-neft.ru/press-center/lib/4029430/> (Дата обращения: 19.09.2021)

²⁶ Газпром нефть. Добыча в цифровом формате «Газпром нефть» объединяет цифровыми технологиями весь цикл освоения месторождений. URL: <https://www.gazprom-neft.ru/press-center/sibneft-online/archive/2018-may/1589543/> (Дата обращения: 21.09.2021)

²⁷ Neftegaz.RU. Корреспондент Neftegaz.RU узнал, как цифровизация помогла «Салым Петролеум Девелопмент» оптимизировать работу добывающего фонда на Салыме. URL: <https://neftegaz.ru/news/dobycha/512708-korrespondent-neftegaz-ru-uznal-kak-tsifrovizatsiya-pomogla-salym-petroleum-development-optimizirova/> (Дата обращения: 09.09.2021)



модели трубопроводов от устьев скважин» [26]. При участии дочерней компании «Газпромнефть-Ангара» разработана цифровая модель нефтяных пластов, которая станет основой для формирования стратегии по разработке трудноизвлекаемых запасов ее «цифровым двойником»²⁸. В компании созданы центры компетенций по ML и AI, VR/AR, IoT, робототехнике, блокчейну, видеоаналитике и продуктовому сервисному дизайну»²⁹.

Нельзя не отметить «запуск цифровой системы управления логистикой в Арктике, которая позволила оптимизировать затраты на вывоз нефти сортов ARCO и Novu Port на 10 %»³⁰. Создана морская ледостойкая стационарная платформа (МЛСП) «Приразломная», на базе которой осуществляются все технологические операции: бурение, добыча, хранение нефти, подготовка и отгрузка готовой продукции»³¹.

Практически ПАО «Газпром нефть» является «цифровой нефтяной компанией», управляемой на основе больших данных и цифровых двойников. В компании добыта первая в мире нефть, найденная с помощью искусственного интеллекта, функционируют управляемые 40 тыс. «оцифрованных» скважин»³². Для реализации стратегии цифровой трансформации планируется инвестировать до 5 % общих инвестиций «Газпром нефти». По мнению специалистов, «цифровая платформа позволит на 23 % увеличить базовый эффект от программ цифровой трансформации за счет более быстрой реализации проектов»³³. В компании используется цифровой подход и в закупочной

деятельности. Оптимизация системы закупок, снабжения и логистики происходит за счет внедрения системы «айсорсинг»³⁴.

Для решения кадровой политики ПАО «Газпром нефть» выступает одним из учредителей научно-образовательного центра «Искусственный интеллект в промышленности», реализует программу «Бизнес-мышление в цифровой действительности»³⁵. ПАО «Газпром нефть», наряду с компаниями Equinor, BP, Shell, является членом международного консорциума Open Subsurface Data Universe (OSDU), предметом деятельности которого является работа с большим объемом геологических данных»³⁶.

ПАО «НК «ЛУКОЙЛ» осуществляет добычу нефти в Западной Сибири (ХМАО – Югра), Пермском крае, Ненецком АО, Республике Коми, на континентальном шельфе. Около половины нефтедобычи производит дочернее предприятие ООО «Лукойл-Западная Сибирь» на Ватъеганском, Тевлинско-Русскинском, Повховском и Южно-Якунском месторождениях. Около 37 % добывают два предприятия холдинга ООО «Лукойл-Пермь» и ООО «Лукойл-Коми». В 2020 г. добыча жидких углеводородов компании (без учета доли в совместных предприятиях) составила 73,4 млн т, снизившись по сравнению с предыдущим годом на 10,6 %³⁷. В 2021 г. добыча нефти увеличилась на 2,7 % по сравнению с 2020 г.³⁸

Цифровое развитие компании происходит в соответствии с «Информационной стратегией Группы «ЛУКОЙЛ» до 2030 года»³⁹, включающей следующие программы: цифровые двойники, экосистема, цифровой персонал и роботизация. К используемым технологиям относятся: «промышленный интернет вещей, технологии взаимодействия, роботы и дроны, искусственный интеллект, мобильные устройства,

²⁸ Neftegaz.ru. Газпром нефть создала первую в отрасли цифровую модель Ачимовской толщи. URL: <https://neftegaz.ru/news/Geological-exploration/197900-gazprom-neft-sozdala-pervuyu-v-otrasli-tsifrovuyu-model-achimovskoy-tolshchi>/https://neftegaz.ru/news/partnership/538597-achimovka-i-tsifrovizatsiya-gazprom-neft-i-halliburton-razrabotayut-programmu-tehnologicheskogo-sot/ (Дата обращения: 19.09.2021)

²⁹ Neftegaz.RU. Корреспондент Neftegaz.RU узнал, как цифровизация помогла «Салым Петролеум Девелопмент» оптимизировать работу добывающего фонда на Салыме. URL: <https://neftegaz.ru/news/dobycha/512708-korrespondent-neftegaz-ru-uznal-kak-tsifrovizatsiya-pomogla-salym-petroleum-development-optimizirova/> (Дата обращения: 09.09.2021)

³⁰ Neftegaz.RU. Корреспондент Neftegaz.RU узнал, как цифровизация помогла «Салым Петролеум Девелопмент» оптимизировать работу добывающего фонда на Салыме. URL: <https://neftegaz.ru/news/dobycha/512708-korrespondent-neftegaz-ru-uznal-kak-tsifrovizatsiya-pomogla-salym-petroleum-development-optimizirova/> (Дата обращения: 09.09.2021)

³¹ Pro-arctic. Рекордная скважина Приразломного месторождения запущена в эксплуатацию. URL: <https://pro-arctic.ru/08/09/2021/news/44438#read> (Дата обращения: 25.07.2022)

³² Microsoft. Как строят цифровую нефтяную компанию? URL: <https://news.microsoft.com/ru-ru/features/belevtsev/> (Дата обращения: 25.07.2022)

³³ Управление производством. Как «ГАЗПРОМ НЕФТЬ» уже получила 7,2 млрд руб. от цифровизации. URL: https://up-pro.ru/library/information_systems/automation_management/mlrd-rub-ot-tsifrovizatsii/ (Дата обращения: 25.07.2022)

³⁴ Isource. Как цифровые технологии меняют процесс закупок обществ. URL: <https://isource.neftegaz.ru/chapter2> (Дата обращения: 26.07.2022)

³⁵ Neftegaz.ru. Газпром нефть создала первую в отрасли цифровую модель Ачимовской толщи. URL: <https://neftegaz.ru/news/Geological-exploration/197900-gazprom-neft-sozdala-pervuyu-v-otrasli-tsifrovuyu-model-achimovskoy-tolshchi>/https://neftegaz.ru/news/partnership/538597-achimovka-i-tsifrovizatsiya-gazprom-neft-i-halliburton-razrabotayut-programmu-tehnologicheskogo-sot/ (Дата обращения: 19.09.2021)

³⁶ Газпром нефть. «Газпром нефть» сделает разработку цифровых решений дешевле за счёт открытой платформы промышленных данных. URL: <https://digital.gazprom-neft.ru/about-news?id=94> (Дата обращения: 21.09.2021)

³⁷ Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевой базы Российской Федерации в 2020 году». М.: Министерство природных ресурсов и экологии России. Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра); 2021. 572 с.

³⁸ Neftegaz.ru. Добыча углеводородов ЛУКОЙЛа в 2021 г. выросла на 4,7 %, объем переработки – на 7,4 %.

³⁹ Лукойл. Программа цифровизации. URL: <https://csr2018.lukoil.ru/strategy/digitalization-program> (Дата обращения: 04.08.2022)



облачные технологии, Big Data»⁴⁰. В развитие стратегии реализуется проект «интеллектуальное месторождение» на Ватъёганском месторождении. «В разработке находятся 12 объектов, 29 нефтеносных пластов и 156 залежей». В рамках проекта «решаются следующие задачи: актуализация представлений о геологическом строении, выработка эффективных решений по оптимизации разработки месторождения, уточнение и реализация перспектив увеличения добычи нефти»⁴¹. В ЯНАО, на Большехетской впадине компания реализует цифровой пилотный проект⁴². Элементы интеллектуального месторождения присутствуют в дочерних предприятиях компании: «ЛУКОЙЛ-Пермь», «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь», «ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть», «ЛУКОЙЛ-Коми», РИТЭК. К их числу относятся центры интегрированных операций (ЦИО).

На Кокуйском месторождении «ЛУКОЙЛ-Пермь» внедрение цифровых технологий позволило «эффективнее управлять добычей»⁴³ посредством мониторинга параметров работы скважин, насосного оборудования, а также контроля возникновения опасных ситуаций.

Цифровая нефтегазодобывающая модель создана на базе Южно-Ягунского и Восточно-Икилорского месторождений, осваиваемых «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь». Здесь же действует Центр интегрированных операций, в котором «воплощены новые управленческие подходы, включающие комплексное планирование, тесное сотрудничество с научными институтами и коллективный анализ технологического процесса»⁴⁴. На всех предприятиях компании по нефтепереработке и нефтехимии внедряются автоматизированные системы Advanced Process Control⁴⁵.

ПАО «ТАТНЕФТЬ». «Основным регионом деятельности ПАО «Татнефть», добывающей 4–5 % российской нефти, традиционно является Республика Татарстан. Крупнейшими месторождениями компании являются Ромашкинское, Бавлинское, Ново-Ел-

ховское в Республике Татарстан, добыча на которых в 2020 г. составила 22,9 млн т»⁴⁶.

Начало процесса цифровой трансформации в ПАО «Татнефть» относится к 2014 г. В настоящее время цифровые технологии охватывают все процессы: сбор и обработку геолого-технологической информации; создание и актуализацию геолого-гидродинамических моделей, принятие решений по выбору оптимальных геолого-технических мероприятий (ГТМ) и их реализации. Скважины проектируются на базе трехмерных (3D) моделей месторождения. Ведется активная работа над созданием искусственного интеллекта, цифровых «двойников». Цифровые двойники внедрены в том числе на месторождениях на Альметьевской, Абрахмановской площадях, а также на Ромашкинском и Новоелховском месторождениях «в виде гидродинамических моделей для нефтяных активов, которые обеспечивают 80 % добычи нефти».

Работает Центр ГТМ (геолого-технических мероприятий), где моделируются мероприятия по повышению нефтеотдачи пластов. Также внедрен проект «Мобильный ЦДНГ» (цех добычи нефти и газа), позволяющий непрерывно в течение суток контролировать и координировать процесс добычи нефти и газа удаленно от рабочего места. На базе компании разрабатывается собственное программное обеспечение, в его число входят: программный комплекс КИС АРМИТС, КИС «Татнефть-нефтедобыча», Roxar, T-navigator. Также разработан программный комплекс на основе нейросетевой интерпретации коротажа материала. Активно внедряется программа NGT Smart в целях мониторинга и управления разработкой нефтяных месторождений.

Весомая роль в ПАО «Татнефть» отводится цифровой трансформации инвестиционной деятельности. В 2019 г. «была создана Автоматизированная система управления инвестиционной деятельностью (АСУ ИД)». Система представляет собой единый банк инвестиционных проектов, являющийся аналитическим инструментом для управления инвестиционной деятельностью компании. Система разрабатывалась в рамках программы импортозамещения программного обеспечения на платформе «1С: Предприятие». В результате компании удалось обеспечить информационную прозрачность, усилить контроль выполнения проектов, применить нейросетевой анализ данных и получить значительный экономический эффект в размере 1 млрд руб. Специалистам компании при выборе оптимальных бизнес-проектов представляется перспективным использование результатов Центра моделирования по расчетам объемов производства.

Достаточно высокий уровень цифровой трансформации в компании позволяет специалистам проводить работу по формированию цифровой платформы для координации совокупности деятельности в данном направлении.

⁴⁶ Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевой базы Российской Федерации в 2020 году». М.: Министерство природных ресурсов и экологии России. Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра); 2021. 572 с.

⁴⁰ Эксперт. Аналитический центр. Цифровой фонтан. URL: <http://www.acexpert.ru/archive/nomer-20-796/cifrovoy-fontan.html> (Дата обращения: 27.09.2021)

⁴¹ Агентство нефтегазовой информации. Лукойл внедряет цифровые модели месторождений. URL: <https://www.angi.ru/news/2878022-ЛУКОЙЛ-внедряет-цифровые-модели-месторождений/> (Дата обращения: 28.10.2021)

⁴² Эксперт. Аналитический центр. Измерить нефть умом. URL: <http://www.acexpert.ru/archive/nomer-12-13-792/izmerit-neft-umom.html> (Дата обращения: 28.10.2021)

⁴³ Ассоциация независимых нефтегазодобывающих организаций. Нефть с интеллектом. URL: <http://www.assoneft.ru/activities/press-centre/tek/5164/> (Дата обращения: 27.07.2022)

⁴⁴ РБК. В лидеры выходят компании, способные быстро внедрять цифровые решения. URL: <https://plus.rbc.ru/news/5ad2f7ba7a8aa94d53490a4f> (Дата обращения: 27.10.2020)

⁴⁵ Там же.



**Анализ и систематизация общих,
отраслевых и производственных
(для отдельных предприятий и компаний)
зарубежных и отечественных методов,
методических подходов, рекомендаций
и методик к оценке цифровизации,
цифровой трансформации**

Об уровне развития методического аппарата оценки уровня цифровизации и цифровой трансформации свидетельствует значительное количество уже разработанных зарубежных и отечественных методик, касающихся глобальных и страновых (региональных) уровней. Большинство из них проанализированы, систематизированы и представлены в ряде научных исследований⁴⁷ [23, 27–31]. К международным методам оценки уровня цифровизации и цифровой трансформации можно отнести: Рейтинг Digital EvolutionIndex (DEI), Индекс развития информационных и коммуникационных технологий (ICT Development Index, IDI), Глобальный индекс кибербезопасности (Global Cybersecurity Index), Рейтинг TheFutureIsComing компании PwC, Глобальный индекс подключений (GlobalConnectivityIndex, GCI); Международный индекс цифровой экономики и общества (International Digital Economy and Society Index, I-DESI); Индекс цифровизации экономики Boston Consulting Group (e-Intensity); Индекс мировой цифровой конкурентоспособности (World Digital Competiveness Index – WDCI); Индекс развития электронного правительства (The UN Global E-Government Development Index – EGDI); Индекс сетевой готовности (Networked Readiness Index); Индекс электронного участия (E-Participation Index – EPART). В России для определения уровня цифровизации страны разработаны соответствующие методики: Рейтинг регионов РФ по уровню развития информационного общества (Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ); Индекс «Цифровая Россия» (ИЦ Сколково); Индекс цифровизации бизнеса (Институт статистических исследований и экономики НИУ ВШЭ); Цифровой индекс Иванова (ПАО Сбербанк).

Сравнительный анализ основных методик и методических подходов по оценке уровня цифровизации и цифровой трансформации на уровне секторов экономики (отраслей) и отдельных предприятий представлен в табл. 1.

Проанализированные методические подходы и методики оценивают уровень цифровизации и цифровой трансформации отрасли (секторов экономики) и отдельных предприятий с различных позиций, используя при этом соответствующие методы и показатели. К основным методам относятся: анкетирование, аналитический и сравнительный методы, метод интегральной оценки, экономико-математические ме-

тоды и методы финансово-экономического анализа, а также метод экспертных оценок, нечетких множеств, скользящих кривых и др. Оцениваются показатели цифровой зрелости, в том числе инновационного потенциала. Часть предлагаемых методов оценки обладает весомой погрешностью, что не позволяет точно проводить оценку из-за использования крайне узких условий и параметров.

Применительно к нефтегазовой отрасли интерес представляет комплексная методика определения уровня цифровизации, применение которой можно отнести как к уровню страны, отрасли, так и отдельной компании. Она разработана и успешно применяется компанией EY (Ernst & Young, Великобритания). Оценка степени готовности к цифровой трансформации уже проведена EY для более чем 3800 компаний в 44 странах. По заказу Минэнерго РФ такая оценка была проведена и для отечественной нефтегазовой отрасли⁴⁸. В соответствии с методикой определяются готовность институциональной среды страны, степень проникновения цифровых решений в отрасли; в частности, для компаний строится карта «Цифровая ДНК», основанная на аналитических данных о текущем уровне внедрения и использования цифровых систем, а также на уровне готовности компании к цифровой трансформации. Для расчетов рассматриваются следующие направления: стратегия, инновации и развитие; взаимодействие с клиентами; управление цепочкой поставок и операционной деятельностью; информационные технологии; риски и кибербезопасность; финансы; правовое обеспечение; налогообложение; лидерство и организационная культура. Методика позволяет сопоставить оценки уровней цифровизации отрасли и отдельных компаний, выявить сильные и слабые стороны. Компания Deloitte предлагает модель цифровой трансформации в сфере разведки и добычи нефти и газа, по которой может быть рассчитан уровень цифровизации и цифровой трансформации в данных сегментах. Однако анализ показал, что утвержденной отраслевой методикой не существует, равно как и методики оценки цифровизации и ее трансформации на уровне предприятий отрасли.

**Усовершенствованный авторский
методический инструментарий оценки уровня
цифровизации и цифровой трансформации
нефтегазовой отрасли**

Авторская методика подразумевает под собой комплексную оценку стратегического уровня цифровизации и цифровой трансформации как одного предприятия, так и отрасли в целом. Благодаря данной оценке возможно не только вычислить обозначенный выше уровень, но и идентифицировать роли таких явлений, как цифровизация и цифровая трансформация, в стратегии развития организации. Авторская методика разработана по результатам изучения

⁴⁷ Московская школа управления «Сколково». Центр Финансовых инноваций и безналичной экономики. Методология расчета индекса «Цифровая Россия» субъектов Российской Федерации. URL: https://finance.skolkovo.ru/downloads/documents/FinChair/Research_Reports/SKOLKOVO_Digital_Russia_Methodology_2019-04_ru.pdf (Дата обращения: 12.06.2022)

⁴⁸ Государственный контракт от 21.08.2019. № 0173100008319000044/К/02. Анализ уровня внедрения и использования цифровых информационных систем. URL: <https://in.minenergo.gov.ru/upload/iblock/971/971c417247ad76e15c6d3b910dc9dcca.pdf> (Дата обращения: 12.06.2022)



зарубежных и отечественных научных публикаций, а также исследования методов оценки, используемых консалтинговыми компаниями. В авторской методике учтено большинство плюсов и минусов существующих методик, которые были определены на базе сравнительного анализа 24 существующих методических рекомендаций и отраженных в табл. 1. Так, учитывая результаты проведенного сравнительного анализа, для экспресс-оценки перечень используемых показателей сокращён до трех; все показатели для расчета рекомендуется брать из открытых источников информации.

Условия/принципы реализации авторского методического инструментария экспресс-оценки уровня цифровой трансформации компаний отрасли, учитывающего недостатки существующих методических подходов по оценке уровня цифровизации и цифровой трансформации, примут вид:

1. Оценка уровня цифровой трансформации базируется на сравнительном подходе;
2. Оценка уровня цифровой трансформации под- лежит выборка ведущих компаний анализируемой и оцениваемой отрасли;
3. Отбираемые показатели для оценки должны иметь связь с цифровой трансформацией, характеризовать ее и быть в открытом доступе;
4. Источниками информации для отобранных показателей служат исключительно официальные источники информации;
5. На базе отобранных показателей формируются мультипликаторы, характеризующие уровень цифро- визации и цифровой трансформации;
6. Мультипликаторам присваиваются определен- ные веса, которые устанавливаются на основании экс- пертного опроса.

Таблица 1

Сравнительный анализ методических подходов к оценке уровня цифровизации и цифровой трансформации отрасли и отдельных предприятий

Источник	Название методики, ключевой метод оценки	Показатели в методике	Положительные стороны	Отрицательные стороны
Комплексные методики и методологические подходы к оценке уровня цифровизации и цифровой трансформации (для отраслей и отдельных предприятий)				
Потететко С. В. Оценка уровня цифровизации предприятий (организаций) и отраслей. Беларусь. ОАО «Гипросвязь» [32]	Оценка уровня цифро- вого развития пред- приятий, отраслей и функциональных сфер	Автоматизация, компьютериза- ция, информатизация, цифро- визация	Позволяет получить обоб- щенную картину оценки для предприятия и отрасли, кон- троля измерения в области цифровизации, выявления и развития перспективных точек роста и определения ближайших перспектив цифровой трансформации предприятий и отрасли	Документ со- держит очень краткое описа- ние методики оценивания
EY (Ernst & Young, Вели- кобритания). Анализ уровня внедрения и использова- ния цифровых информационных систем*	Методика уровня вне- дрения и использова- ния цифровых инфор- мационных систем	Определяется готовность институциональной среды страны, степень проникновения цифровых решений в отрас- ли, а конкретно для компаний строится карта «Цифровая ДНК», основанная на аналити- ческих данных о текущем уров- не внедрения и использования цифровых систем, а также уровня готовности к цифровой трансформации. Для расчетов рассматриваются следующие направления: стратегия, инно- вации и развитие; взаимодей- ствие с клиентами; управление цепочкой поставок и операци- онной деятельностью; инфор- мационные технологии; риски и кибербезопасность; финансы; правовое обеспечение; налого- обложение; лидерство и орга- низационная культура	Позволяет сопоставить оценки уровней цифрови- зации отрасли и отдельных компаний, выявить сильные и слабые стороны	Сложность в сборе данных, в частности по нефтегазовой отрасли

* Государственный контракт от 21.08.2019. № 0173100008319000044/К/02. Анализ уровня внедрения и использования циф- ровых информационных систем. URL: <https://in.minenergo.gov.ru/upload/iblock/971/971c417247ad76e15c6d3b910dc9dcca.pdf> (Дата обращения: 12.06.2022)



Продолжение табл. 1

Источник	Название методики, ключевой метод оценки	Показатели в методике	Положительные стороны	Отрицательные стороны
Deloitte: Цифровая трансформация в сфере разведки и добычи нефти и газа – от байтов к баррелям*	Модель цифровой трансформации	Модель цифровой трансформации представляет дорожную карту, включающую 10 этапов (механизация, установка датчиков, передача, интеграция, анализ, визуализация, дополнение, роботизация, создание, виртуализация) с расшифровкой технологий по каждому этапу. Определяется текущий уровень цифровой зрелости, желаемый уровень трансформации и направления повышения уровня трансформации	Текущий и желаемый уровень цифровой зрелости и трансформации определяется в сегментах разведки, разработки и добычи углеводородного сырья по соответствующим технологиям. Определяется оценка возможностей цифровой трансформации для каждого сегмента. Может быть применена как к отрасли в целом, так и для предприятий по отдельным сегментам	Большое количество показателей оценки, громоздкость расчетов
IBM Цифровая трансформация нефтегазовой промышленности**	Модель цифровой трансформации	Указываются направления, которые получают преимущества в результате цифровой трансформации по секторам нефтегазовой отрасли (поисковые и оценочные работы, разработка и добыча)	Широкий охват оценочных показателей	Сложность получения статистических данных при анализе предприятий отраслей
Куклина Е. А., Мицеловская О. С. Методологический подход к оценке уровня инновационного развития предприятий (на примере сферы жилищно-коммунального хозяйства) [33]	Методологический подход к оценке уровня инновационного развития отрасли и предприятия с использованием методов экспертных оценок, Innovation Scorecard (СИП), оценки финансовой устойчивости, коэффициентов и др.	Оценка перспектив инновационного развития отрасли: доля организаций, осуществляющих технологические инновации, в общем числе организаций, %; Объем и интенсивность затрат на технологические инновации; Объем и доля инновационных товаров, работ, услуг в общем объеме отгруженных товаров, выполненных работ, услуг. Оценка инновационного потенциала предприятия: инновационный процесс, инновационная стратегия, инновационная структура, инновационная культура, обеспечение ресурсами. Оценка уровня инновационной активности: Коэффициент обеспеченности интеллектуальной собственности; Коэффициент персонала, занятого в НИОКР; Коэффициент имущества, предназначенного для НИОКР; Коэффициент освоения новой техники; Коэффициент внедрения новой продукции; Коэффициент инновационного роста	Комплексная оценка с применением нескольких общепризнанных методов для каждого этапа. Возможность применения к различным сферам	Сложность получения статистических данных при анализе отдельных отраслей
Институт статистических исследований и экономики знаний НИУ ВШЭ [34]	Индекс цифровизации отраслей экономики, социальной сферы и органов власти, разработанный для агрегатной оценки уровня распространения цифровых технологий	Индекс характеризует скорость адаптации к цифровой трансформации, уровень использования широкополосного интернета, облачных сервисов, RFID-технологий, ERP-систем, включенность в электронную торговлю организаций предпринимательского сектора. Индекс рассчитывается по России и странам Европы, Республике Корея и Турции	Рассчитывается по небольшому количеству показателей	Не может считаться оптимальным по причине учета лишь малого количества показателей

* Deloitte. Цифровая трансформация в сфере разведки и добычи нефти и газа – от байтов к баррелям. URL: <https://nangs.org/analytics/deloitte-tsifrovaya-transformatsiya-v-sfere-razvedki-i-dobychi-nefti-i-gaza-ot-bajtov-k-barrelyam-fevral-2018-pdf> (Дата обращения: 26.08.2021)

** IBM. Цифровая трансформация нефтегазовой промышленности. URL: <https://www.ibm.com/downloads/cas/JLE286ZX> (Дата обращения: 27.08.2021)



Продолжение табл. 1

Источник	Название методики, ключевой метод оценки	Показатели в методике	Положительные стороны	Отрицательные стороны
Истомина Е.А. Оценка трендов цифровизации в промышленности [35]	Методика оценки цифровизации в промышленности	Рассмотрены методики оценки цифровизации на макроуровне и для отдельного хозяйствующего субъекта. Экономический эффект от инвестиций в цифру, процент производительности труда, прибыльность	Автор указывает всего 3 показателя, которые крайне важны для предпринимателя, по ее мнению. Остальные показатели описываются как незначительные, в связи с чем можно пренебречь оценкой	Разрозненность методического представления. Нет увязки оценки трендов цифровизации отдельных предприятий с промышленностью в целом
Методики оценки уровня цифровизации и цифровой трансформации отдельных предприятий и их инновационной составляющей				
Яшин С.Н., Щекотурова С.Д. Применение методики оценки эффективности инновационного развития предприятия на примере ПАО «РУСПО-ЛИМЕТ» [36]	Метод скользящих кривых	- Доля сотрудников, занятых в НИР и ОКР - Уровень освоения новой техники - Степень освоения новой продукции - Доля материальных ресурсов для НИР и ОКР - Степень обеспеченности предприятия интеллектуальной собственностью - Доля инвестиций в инновационные проекты	- Полнота оценки. Логическая структура соблюдена по мере всей методики - Оценка сфокусирована на анализе относительно небольшого количества показателей, связанных между собой. Это упрощает расчет и обобщение - Разработана на основе дополняемых методик - Оценка инновационного развития проводится в комплексе с экономическим состоянием предприятия	Не учитывает стратегические и тактические ориентиры компании. Отсутствует сравнение с другими компаниями отрасли
Коханова В.С. Аппарат нечеткой логики как инструмент оценки эффективности цифровизации компании [37]	Нечеткая логика	Параметры варьируются в зависимости от необходимости. Можно вводить как простейшую двоичную шкалу «хороший – плохой», так и более сложную, где количество термов будет достигать 5, 7, или даже 10	Стоит наравне с другими системами оценки; Оценивание производится в более свободном виде, чем при формальной логике. Универсальный и прикладной характер инструментов нечеткой логики	До сих пор существует часть людей, которые не воспринимают данный метод оценки
Брусакова И.А. Методы и модели оценки зрелости инновационной структуры [38]	Продукционная модель корпоративных знаний о готовности предприятия к цифровым трансформациям	Инновационность инфраструктуры предприятия, инновационная активность, инновационная сложность предприятия	После оценки трех макропараметров можно говорить о готовности предприятия к цифровым трансформациям	Определяется не весь уровень цифровизации, а только инновационная составляющая с учетом информационной составляющей
Захарова Е.В., Митякова О.И. Оценка инновационного потенциала предприятия с учетом цифровизации экономики [39]	Методы расчета инновационного потенциала показателей информационного потенциала (аналитический метод расчета системы показателей, метод расчета интегрального показателя на основе модели логистической регрессии, метод финансово-экономического анализа, метод экспертных оценок, метод расчета интегрального показателя на основе модели логистической регрессии)	Охватывает 19 показателей по 4 группам: производственно-техническая, финансово-управленческая, факторы инновационной активности и показатели информационной составляющей	Относительно легкие расчеты за счет малого количества показателей. Благодаря оценке информационной составляющей, можно определить сильные и слабые стороны потенциала предприятия. База строится на методиках оценки инновационного потенциала	Определяется не весь уровень цифровизации, а только инновационная составляющая с учетом информационной составляющей



Продолжение табл. 1

Источник	Название методики, ключевой метод оценки	Показатели в методике	Положительные стороны	Отрицательные стороны
Митякова О.И. Оценка инновационного потенциала промышленного предприятия [40]	Аналитический метод расчета системы показателей	Определение состояния каждой составляющей инновационного потенциала путем вычисления ряда показателей, характеризующих инновационный потенциал: 1. Кадровый 2. Производственно-технологический 3. Научно-технический 4. Финансово-экономический 5. Организационно-управленческий потенциалы	Расчеты опираются на данные, которые фиксируются в отчетности финансово-хозяйственной деятельности предприятия, высокий уровень объективности расчетов, всесторонняя оценка потенциала	Определяется не весь уровень цифровизации, а только ее инновационная составляющая
Delloite: Digital Maturity Model Achieving digital maturity to drive growth*	Модель цифровой зрелости (Digital Maturity Model)	Выделяется 5 ключевых показателей, по которым проводят оценку: потребители, стратегия, технологии, производство, структура и культура организации (Customer, Strategy, Technology, Operations, Organisation & Culture). В свою очередь у них выделяется 28 подпоказателей, которые разбиты на 179 цифровых характеристик. Акцент делается на стратегию (Business Strategy), определяющую фокус преобразований. Последовательными шагами конкретизации стратегии являются определение бизнес-модели (Business Model) и операционной модели (Operating Model), которые и определяют требуемый уровень цифровой зрелости по выделенным измерениям	Оценка проводится по большому количеству показателей, что повышает ее точность и углубленность во внутренние аспекты	Не найден пример применения данной оценки – закрытость данных. Нельзя провести быструю оценку
Мерзлов И.Ю., Шилова Е.В., Санникова Е.А., Сединин М.А. Комплексная методика оценки уровня цифровизации организаций [27]	Комплексная методика оценки уровня цифровизации организаций	Разработана пошаговая методика определения цифровизации бизнес-процессов. Выделено шесть укрупненных бизнес-процессов, каждый из которых уточнен рядом подпроцессов: управление персоналом, производство, выполнение работ, оказание услуг, маркетинг, логистика, финансы и бухгалтерия, общехозяйственная деятельность. Разработана пирамида процесса цифровизации, включающая пять уровней (первичная, локальная, частичная, комплексная цифровизация; «умная» организация; цифровая экосистема. По итоговым данным может определяться отраслевой и страновой уровень цифровизации, а также соответствующий рейтинг построения различных типов	Основывается на методах экспертных оценок и анкетирования. Простота понимания и подсчета результатов	Общедоступность к заполнению анкеты за счет создания сайта, что может привести к погрешности при подсчете. А также возможность заполнения анкеты не специалистами со стороны организации

* Delloite. Digital Maturity Model Achieving digital maturity to drive growth. URL: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/global/Documents/Technology-Media-Telecommunications/deloitte-digital-maturity-model.pdf> (Дата обращения: 28.08.2021)



Продолжение табл. 1

Источник	Название методики, ключевой метод оценки	Показатели в методике	Положительные стороны	Отрицательные стороны
Бабкин А. В., Пестова А. Ю. Оценка уровня цифровизации промышленного предприятия (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого) [41, 42]	Оценка уровня цифровизации промышленного предприятия	Трудовые ресурсы, материально-техническое обеспечение, цифровая инфраструктура предприятия, программное обеспечение, финансовые ресурсы, организационно-управленческие показатели / 19 показателей	Используются для оценки комплексно статистические данные предприятия и среднерыночные значения по каждому из оцениваемых параметров	Сложность оценки. Отсутствует сравнение с другими компаниями отрасли
Козлов А. В., Тесля А. Б. Цифровой потенциал промышленных предприятий: сущность, определение и методы расчета [43]	Методика определения цифрового потенциала промышленного предприятия как инструмента управления процессами цифровой трансформации на предприятии (экспертные оценки + для получения численной оценки интегрального показателя – цифрового потенциала – могут быть использованы и иные, более сложные модели, например, метод параметрической энтропии, метод Саати, метод главных компонент)	Показатель внешней среды, показатель внутренней среды, включающий 2 подгруппы: отражающие ресурсы на данный момент и отражающие будущие возможности предприятия по внедрению цифровых технологий. 17 показателей	Предлагаемый подход к оценке цифрового потенциала позволяет анализировать не только текущий уровень цифровизации бизнес-процессов на предприятии, но и возможности наращивания цифрового потенциала	Не совсем точное оценивание по причине ориентировки в основном на субъективных оценках
Центр цифрового бизнеса MIT (MIT Center for Digital Business) и Capgemini Consulting*	Оценка цифровой трансформации	Клиентский опыт, операционные процессы и бизнес-модели / 9 показателей	Относительно небольшое количество показателей и доступные расчеты	Сложность в сборе статистических данных для оценки
Аналитическое агентство Arthur D. Little. Digital Transformation – How to Become Digital Leader**	Индекс цифровой трансформации	При расчете индекса используется 23 показателя, характеризующих стратегию развития и руководство; продукты и сервисы; управление клиентами; операции и цепочки поставок; корпоративные сервисы и контроль; информационные технологии; рабочее место и культура	Результат оценки индексов позволяет определить, на каком уровне находится компания, насколько успешна трансформация, предсказать результат развития компании. Относительно легкие расчеты за счет малого количества показателей	Сложность в сборе статистических данных для оценки

* Центр цифрового бизнеса MIT (MIT Center for Digital Business) и Capgemini Consulting. Оценка цифровой трансформации. URL: https://www.capgemini.com/wp-content/uploads/2017/07/The_Digital_Advantage_How_Digital_Leaders_Outperform_their_Peers_in_Every_Industry.pdf (Дата обращения: 27.08.2021)

** Аналитическое агентство Arthur D. Little. Digital Transformation – How to Become Digital Leader. URL: https://www.adlittle.com/sites/default/files/viewpoints/ADL_HowtoBecomeDigitalLeader_02.pdf (Дата обращения: 05.09.2020)



Продолжение табл. 1

Источник	Название методики, ключевой метод оценки	Показатели в методике	Положительные стороны	Отрицательные стороны
Компания KPMG. Are you ready for digital transformation? Measuring your digital business aptitude*	Модель оценки цифровых способностей	Видение и стратегия, цифровые таланты, ключевые цифровые процессы, гибкие источники и технологии, руководство – 5 основных показателей, 23 показателя в сумме	Откалиброванное управление рисками, Цифровое управление, Архитектурная дисциплина, Заинтересованность, Гибкая Архитектура, Инфраструктура, социальные медиа, Мобильное взаимодействие, Мобильность, Стратегическое партнерство, Измерение и аналитика, Оптимизированные Платформы, Гибкая Разработка, Дизайн интерфейса, Развитие Талантов, Оптимизация Навыков, Развитие Талантов, Приобретение Талантов, Воплощение стратегии в жизнь, Идеиное Лидерство, Определена стратегия, определены цели	Не найден пример применения данной оценки – закрытость данных. Нельзя провести быструю оценку
Глобальный центр трансформации цифрового бизнеса [27]	Цифровое пианино	Бизнес-модель, организационная структура, сотрудники, процессы, ИТ-возможности, предложения, модель взаимодействия	На основе вопросов, которые задаются при данной оценке, можно выявить разрыв между текущим положением дел и требуемым уровнем на каждом направлении, что укажет на объем необходимых преобразований	Ключевым аспектом будут являться ответы на вопросы. Неточный ответ на них равнозначен нечеткой оценке
Компания Ionology. Step by Step Guide to Digital Transformation**	Цифровые преобразования	Стратегия и культура, персонал и клиенты, процессы и инновации, технологии, данные и аналитика	Методика ориентирована на интересы более молодого поколения	Нет общего количества показателей оценки, выделены лишь ключевые направления. Поэтому нет возможности оценить положительные моменты
Национальная академия наук и техники Германии. Индекс зрелости Индустрии 4.0. Управление цифровым преобразованием Компаний. Исследование acatech***	Индекс зрелости Индустрии 4.0 Acatech	Ресурсы, информационные системы, культура и организационная структура	Обработка преимуществ, недостающих и имеющихся возможностей, анализ недочетов, что впоследствии позволяет оценить, насколько гибкая и непрерывно развивающаяся компания создается в итоге	Сложная методика для оценки

* Компания KPMG. Are you ready for digital transformation? Measuring your digital business aptitude. URL: <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/pdf/2016/04/measuring-digital-business-aptitude.pdf> (Дата обращения: 04.09.2021)

** Компания Ionology. Step by Step Guide to Digital Transformation. URL: <https://www.ionology.com/step-by-step-guide-to-digital-transformation> (Дата обращения: 05.10.2021)

*** Национальная академия наук и техники Германии. Индекс зрелости Индустрии 4.0. Управление цифровым преобразованием Компаний. Исследование Acatech. URL: https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/03/acatech_STUDIE_rus_Maturity_Index_WEB.pdf (Дата обращения: 04.09.2020)



Окончание табл. 1

Источник	Название методики, ключевой метод оценки	Показатели в методике	Положительные стороны	Отрицательные стороны
Компания Команда-А (KMDA). Оценка стратегических преобразований в процессе цифровой трансформации*	Оценка стратегических преобразований в процессе цифровой трансформации	Клиентоцентричность, коллаборации, данные, инновации, ценность, люди	Увязка со стратегией. Клиентоориентированность	Предлагается разработчиком для проведения оценки. Отсутствие какого-либо документа, где можно изучить подробнее методику
DMA Pulse. Цифровое решение для оценки потенциала и динамики изменений вашей компании в процессе цифровой трансформации**	Оценки цифровой зрелости	Цифровая инфраструктура, HR и развитие человеческого капитала, создание продуктов и управление ценностью, цифровизация бизнес-процессов, использование данных, управление клиентским опытом	Более 40 блоков вопросов разного уровня глубины, позволяющих определить зоны отставания и потенциал развития	Отсутствие какого-либо документа, где можно изучить подробнее методику

* Компания Команда-А (KMDA). Оценка стратегических преобразований в процессе цифровой трансформации. URL: <https://komanda-a.pro/transformation> (Дата обращения: 02.09.2020)

** DMA Pulse. Цифровое решение для оценки потенциала и динамики изменений вашей компании в процессе цифровой трансформации. URL: <https://komanda-a.pro/audit> (Дата обращения: 09.08.2021)

Этапы реализации авторского методического инструментария по оценке уровня цифровой трансформации предприятий (компаний) и отрасли в целом представлены на рис. 3.

Этап I. Апробация авторского методического инструментария проводилась на примере нефтегазовой отрасли. Информационной базой исследования послужили годовые отчеты предприятий выборки (ПАО «Газпром», ПАО «НК «Роснефть», ПАО «Татнефть» и ПАО «Лукойл»).

Ключевыми показателями, характеризующими уровень цифровизации и цифровой трансформации,

были приняты: прибыль, нематериальные активы, затраты на НИОКР, рыночная стоимость компании. Для расчета рыночной стоимости компании источниками информации о котировках акций и их количестве послужили финансовые Интернет-ресурсы⁴⁹.

⁴⁹ Finanz.ru. Котировки акций. URL: <https://www.finanz.ru/aktsii> (Дата обращения: 12.06.2022)

InvestFunds. Независимый источник данных для частного инвестирования в России. Котировки акций. URL: <https://investfunds.ru/stocks/> (Дата обращения: 12.06.2022)

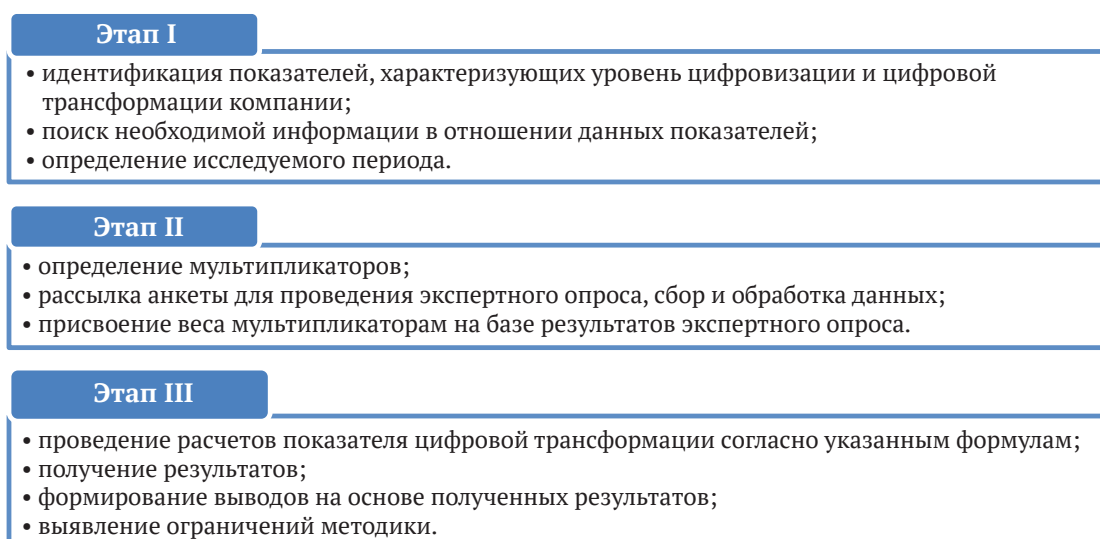


Рис. 3. Этапы реализации и апробации авторского методического инструментария в условиях нефтегазовой отрасли РФ



Были обособлены три периода для исследования за исключением экономически нерепрезентативных временных промежутков:

- 2008 г. Год мирового экономического кризиса;
- 2010-2011 гг. Период выхода из кризиса, реабилитация экономики;
- 2016-2020 гг. Период разработки, развития, формирования и внедрения цифровых технологий и платформенных решений в Российской Федерации. Рассматриваемый период увеличен с 2 до 4 лет в связи с чрезвычайно быстрым развитием изучаемого направления.

Все показатели представлены в сопоставимом виде. Некоторые показатели в отчетах за 2008 г. отсутствовали, другая часть была указана в долларах, а не в рублях. Конвертирование долларов в рубли было осуществлено по среднему курсу для каждого года⁵⁰. Ниже приведены таблицы для каждой компании с отобранными показателями. Прочерки означают отсутствие данных в открытом доступе.

Этап II. Применение стоимостного подхода позволило выделить следующие мультипликаторы, характеризующие уровень цифровизации и цифровой трансформации:

⁵⁰ Минфин. Конвертер валют. URL: <https://minfin.com.ua/currency/converter/> (Дата обращения: 12.06.2022)

1. Мультипликатор отношения нематериальных активов и рыночной стоимости компании

$$A = \frac{HA}{P}, \quad (1)$$

где HA – нематериальные активы компании; P – рыночная стоимость компании, получаемая умножением стоимости акции на количество акций.

2. Мультипликатор отношения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ и рыночной стоимости компании

$$B = \frac{RDC}{P}, \quad (2)$$

где RDC – затраты компании на НИОКР.

3. Мультипликатор отношения чистой прибыли компании и рыночной стоимости компании

$$C = \frac{Pt}{P}, \quad (3)$$

где Pt – чистая прибыль компании.

Таким образом,

$$DL = (x_1A + x_2B + x_3C)100 \%, \quad (4)$$

где DL – показатель уровня цифровизации и цифровой трансформации; x_1 – вес мультипликатора A ; x_2 – вес мультипликатора B ; x_3 – вес мультипликатора C .

Таблица 2

Отобранные показатели для ПАО «Газпром»

Показатели	Год							
	2008	2010	2011	2016	2017	2018	2019	2020
Нематериальные активы, руб.	$3,2 \cdot 10^8$	$3,7 \cdot 10^8$	$3,7 \cdot 10^8$	$1,49 \cdot 10^{10}$	$2,009 \cdot 10^{10}$	$1,93 \cdot 10^{10}$	$1,71 \cdot 10^{10}$	$1,474 \cdot 10^{10}$
Затраты на НИОКР, руб.	$2,67 \cdot 10^9$	$2,62 \cdot 10^9$	$3,2 \cdot 10^9$	$2,89 \cdot 10^{10}$	$1,61 \cdot 10^{10}$	$1,359 \cdot 10^{10}$	$1,92 \cdot 10^{10}$	$1,807 \cdot 10^{10}$
Чистая прибыль, руб.	$1,73 \cdot 10^{11}$	$7,8 \cdot 10^{11}$	$1,307 \cdot 10^{12}$	$9,516 \cdot 10^{11}$	$7,143 \cdot 10^{11}$	$1,456 \cdot 10^{12}$	$1,203 \cdot 10^{12}$	$1,35 \cdot 10^{11}$
Стоимость акции, руб.	108,6	193,5	171,3	154,55	130,5	153,5	256,4	212,98
Количество акций, ед.	$2,367 \cdot 10^{10}$	$2,367 \cdot 10^{10}$	$2,367 \cdot 10^{10}$	$2,367 \cdot 10^{10}$	$2,367 \cdot 10^{10}$	$2,367 \cdot 10^{10}$	$2,367 \cdot 10^{10}$	$2,367 \cdot 10^{10}$

Таблица 3

Отобранные показатели для ПАО «НК «Роснефть»

Показатели	Год							
	2008	2010	2011	2016	2017	2018	2019	2020
Нематериальные активы, руб.	$1,83 \cdot 10^{10}$	$2,3 \cdot 10^{10}$	$2,2 \cdot 10^{10}$	$5,9 \cdot 10^{10}$	$7,5 \cdot 10^{10}$	$7,5 \cdot 10^{10}$	$6,9 \cdot 10^{10}$	$8 \cdot 10^{10}$
Затраты на НИОКР, руб.	$2,05 \cdot 10^9$	$2,9 \cdot 10^9$	$8,55 \cdot 10^9$	$2,02 \cdot 10^{10}$	$2,99 \cdot 10^{10}$	$3,21 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{10}$	$2,68 \cdot 10^{10}$
Чистая прибыль, руб.	$1,43 \cdot 10^{11}$	$3,47 \cdot 10^{11}$	$3,84 \cdot 10^{11}$	$1,74 \cdot 10^{11}$	$3,83 \cdot 10^{11}$	$8,28 \cdot 10^{11}$	$9,17 \cdot 10^{11}$	$3,24 \cdot 10^{11}$
Стоимость акции, руб.	112,34	218,85	214,55	402,8	291,5	432,5	454	435,1
Количество акций, ед.	$1,0598 \cdot 10^{10}$	$1,0598 \cdot 10^{10}$	$1,0598 \cdot 10^{10}$	$1,0598 \cdot 10^{10}$	$1,0598 \cdot 10^{10}$	$1,0598 \cdot 10^{10}$	$1,0598 \cdot 10^{10}$	$1,0598 \cdot 10^{10}$

Таблица 4

Отобранные показатели для ПАО «Лукойл»

Показатели	Год							
	2008	2010	2011	2016	2017	2018	2019	2020
Нематериальные активы, руб.	$2,42 \cdot 10^{10}$	$4,407 \cdot 10^{10}$	$4,34 \cdot 10^{10}$	$4,313 \cdot 10^{10}$	$4,13 \cdot 10^{10}$	$4,18 \cdot 10^{10}$	$4,31 \cdot 10^{10}$	$5 \cdot 10^{10}$
Затраты на НИОКР, руб.	$2,3 \cdot 10^9$	$3,65 \cdot 10^9$	$4,11 \cdot 10^9$	$5,8 \cdot 10^9$	$5,8 \cdot 10^9$	$6,2 \cdot 10^9$	$5,7 \cdot 10^9$	$5,2 \cdot 10^9$
Чистая прибыль, руб.	$2,674 \cdot 10^{11}$	$2,743 \cdot 10^{11}$	$3,345 \cdot 10^{11}$	$3,038 \cdot 10^{11}$	$3,994 \cdot 10^{11}$	$6,192 \cdot 10^{11}$	$6,402 \cdot 10^{11}$	$1,52 \cdot 10^{10}$
Стоимость акции, руб.	948	1742	1702,5	3449	3345,5	4997	6169	5169,5
Количество акций, ед.	$6,93 \cdot 10^8$	$6,93 \cdot 10^8$	$6,93 \cdot 10^8$	$6,93 \cdot 10^8$	$6,93 \cdot 10^8$	$6,93 \cdot 10^8$	$6,93 \cdot 10^8$	$6,93 \cdot 10^8$



Таблица 5

Отобранные показатели для ПАО «Татнефть»

Показатели	Год							
	2008	2010	2011	2016	2017	2018	2019	2020
Нематериальные активы, руб.	$2,2 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^8$	$1,9 \cdot 10^8$	$4,6 \cdot 10^8$	$8,8 \cdot 10^8$	$1,5 \cdot 10^9$	$1,85 \cdot 10^9$	$2,05 \cdot 10^9$
Затраты на НИОКР, руб.	–	$9 \cdot 10^7$	$6 \cdot 10^7$	$6,3 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^9$	$2,5 \cdot 10^9$	$2,4 \cdot 10^9$
Чистая прибыль, руб.	$3,43 \cdot 10^{10}$	$3,89 \cdot 10^{10}$	$5,488 \cdot 10^{10}$	$1,05 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{11}$	$1,98 \cdot 10^{11}$	$1,56 \cdot 10^{11}$	$8,16 \cdot 10^{10}$
Стоимость акции, руб.	56	148,7	160,69	427	478,8	737,9	759,7	513,7
Количество акций, ед.	$2,18 \cdot 10^9$	$2,18 \cdot 10^9$	$2,18 \cdot 10^9$	$2,18 \cdot 10^9$	$2,18 \cdot 10^9$	$2,18 \cdot 10^9$	$2,18 \cdot 10^9$	$2,18 \cdot 10^9$

Вес каждого из мультипликаторов рекомендуется определять путем экспертного опроса специалистов в данной сфере деятельности. В рамках реализации авторского методического инструментария экспертам предлагалась анкета. По результатам опроса 35 экспертов из Института экономика УрО РАН, Института горного дела УрО РАН, Томского политехнического университета, Тюменского индустриального университета было установлено, что веса мультипликаторов А и В одинаковы и равны 0,4 у.е. соответственно, вес мультипликатора С присвоен на уровне 0,2 у.е. Вес считался путем определения среднего арифметического. Отсюда формула (4) примет вид:

$$DL = (A \times 0,4 + B \times 0,4 + C \times 0,2) 100 \%. \quad (5)$$

По данным, полученным на этапе I реализации авторского методического инструментария, в табл. 6–9 произведены расчеты и представлена оценка итогового уровня цифровизации и цифровой трансформации компаний в годовом измерении. В некоторых ячейках таблицы отсутствуют значения, что связано с ранее указанным фактором – закрытость данных, невозможность выполнения расчета.

В российских условиях рекомендуется удовлетворительным считать уровень цифровизации и цифровой трансформаций – больше 5 %; если же показатель меньше данного значения, то уровень признается неудовлетворительным, следовательно, компания не ориентирована на цифровое развитие в долгосрочной перспективе.

Этап III

Таблица 6

Значения рассчитанных мультипликаторов и уровня цифровизации и цифровой трансформации для ПАО «Газпром»

Мультипликаторы	Год							
	2008	2010	2011	2016	2017	2018	2019	2020
HA / P, у.е.	0,00012	0,00009	0,00009	0,00407	0,00650	0,00531	0,00282	0,00292
RDC, у.е.	0,00104	0,00057	0,00079	0,00790	0,00521	0,00374	0,00316	0,00358
Pt / P, у.е.	0,06729	0,17019	0,32230	0,26009	0,23121	0,40067	0,19819	0,02678
DL, %	1,39	3,43	6,48	5,68	5,09	8,38	4,20	0,80

Таблица 7

Значения рассчитанных мультипликаторов и уровня цифровизации и цифровой трансформации для ПАО «НК «Роснефть»

Мультипликаторы	Год							
	2008	2010	2011	2016	2017	2018	2019	2020
HA / P, у.е.	0,01537	0,00992	0,00968	0,01382	0,02428	0,01636	0,01434	0,01735
RDC, у.е.	0,00172	0,00125	0,00376	0,00473	0,00968	0,00700	0,00623	0,00581
Pt / P, у.е.	0,12011	0,14961	0,16888	0,04076	0,12397	0,18064	0,19058	0,07026
DL, %	3,09	3,44	3,91	1,56	3,84	4,55	4,63	2,33

Таблица 8

Значения рассчитанных мультипликаторов и уровня цифровизации и цифровой трансформации для ПАО «Лукойл»

Мультипликаторы	Год							
	2008	2010	2011	2016	2017	2018	2019	2020
HA / P, у.е.	0,03684	0,03651	0,03679	0,01805	0,01782	0,01207	0,01008	0,01396
RDC, у.е.	0,00350	0,00302	0,00348	0,00243	0,00250	0,00179	0,00133	0,00145
Pt / P, у.е.	0,40704	0,22725	0,28360	0,12713	0,17231	0,17884	0,14978	0,00424
DL, %	9,75	6,13	7,28	5,00	3,36	4,26	4,13	3,45



По данным табл. 6–9 была составлена итоговая таблица уровней цифровизации и цифровой трансформации для каждой компании выборки и отрасли в целом (табл. 10).

Выводы: на основании полученного скрининга компаний и результатов апробации авторского методического инструментария оценки уровня цифровизации и цифровой трансформации (табл. 10, рис. 4) можно заключить, что в целом ситуация по цифровой трансформации нефтегазовой отрасли Российской Федерации неудовлетворительна. Темпы изменения уровня цифровизации и цифровой трансформации за рассматриваемые временные периоды у компаний выборки отражены на рис. 4. Наиболее стабильная удовлетворительная динамика развития складывается у ПАО «Газпром». У компании ПАО «Лукойл» также наблюдается подобная тенденция, но только в 2008, 2010 и 2011 гг., после 2016 г. показатель снижается до

неудовлетворительного уровня. Также в период разработки и внедрения цифровых технологий и платформенных решений на территории РФ можно наблюдать тренд увеличения показателя цифровизации и цифровой трансформации у ПАО «НК «Роснефть».

Наименьшие значения уровня цифровизации и цифровой трансформации в рассматриваемых временных периодах были зафиксированы у ПАО «Татнефть». При этом в отчетах каждая из компаний выборки декларирует постоянно увеличивающиеся темпы цифровизации всех процессов. Наблюдаемую ситуацию, опираясь на полученные данные, можно охарактеризовать либо замедлением темпов внедрения процессов цифровизации и цифровой трансформации по причине уже достигнутого высокого уровня, либо же ухудшением положения и наличием в отчетах компаний не совсем достоверных сведений. 2020 г. характеризуется снижением темпов у всех компаний по причине пандемии

Таблица 9

Значения рассчитанных мультипликаторов и уровня цифровизации и цифровой трансформации для ПАО «Татнефть»

Мультипликаторы	Год							
	2008	2010	2011	2016	2017	2018	2019	2020
HA / P, у.е.	0,00180	0,00062	0,00054	0,00049	0,00084	0,00093	0,00112	0,00183
RDC, у.е.	–	0,00028	0,00017	0,00068	0,00058	0,00062	0,00151	0,00214
Pt / P, у.е.	0,28113	0,12016	0,15676	0,11265	0,09586	0,12285	0,09425	0,07291
DL, %	–	2,44	3,16	2,30	1,97	2,52	1,99	1,62

Таблица 10

Итоговая таблица уровней цифровизации и цифровой трансформации для каждой компании выборки и отрасли в целом, %

Название компании	Год								ЦТ средняя за анализируемые периоды
	2008	2010	2011	2016	2017	2018	2019	2020	
ПАО «Газпром»	3,01	6,77	11,56	4,87	5,09	6,64	5,30	0,87	5,51
ПАО «НК «Роснефть»	3,09	3,44	3,91	1,56	3,84	4,55	4,63	2,33	3,41
ПАО «Татнефть»	–	2,44	3,16	2,30	1,97	2,52	1,99	1,62	2,28
ПАО «Лукойл»	9,75	6,13	7,28	3,36	4,26	4,13	3,45	0,70	4,88
Отраслевой уровень	3,9625	4,695	6,4775	3,0225	3,79	4,46	3,8425	1,38	4,02

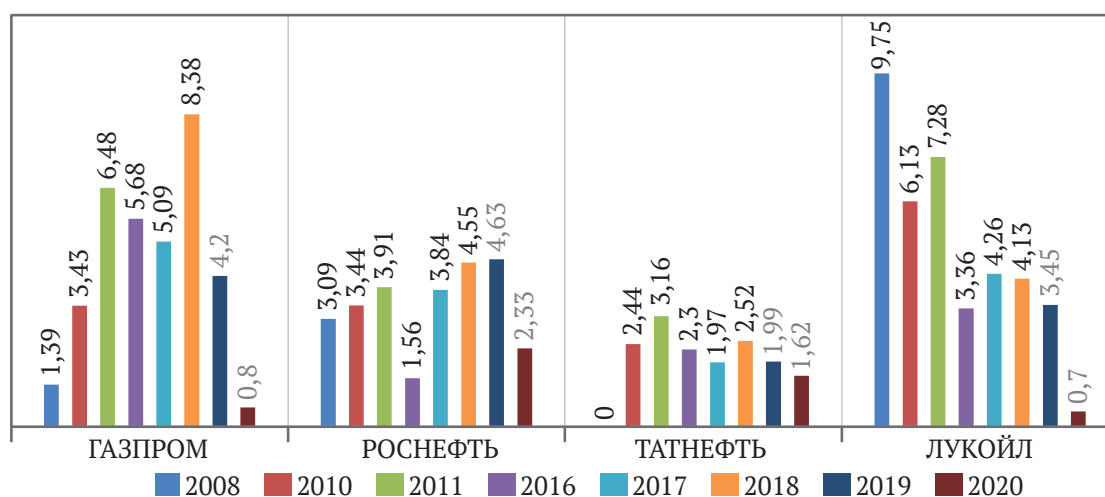


Рис. 4. Динамика изменений уровня цифровизации и цифровой трансформации каждой из компаний, %



COVID-19, хотя в работе [8] отмечено, что меньше всего пострадали от пандемии компании с высоким уровнем внедрения цифровых процессов.

Опираясь на рис. 4, можно представить следующее ранжирование кампаний отрасли по внедрению цифровых процессов в их деятельность: в число лидеров по уровню цифровизации и цифровой трансформации входят ПАО «Газпром» и ПАО «Лукойл», на втором месте ПАО «НК «Роснефть», замыкает рейтинг ПАО «Татнефть».

Выводы

Разработанный авторский методический инструментарий оценки уровня цифровизации и цифровой трансформации позволяет провести экспресс-анализ как предприятия (компании), так и отрасли в целом, на предмет внедрения цифровых процессов и идентифицировать их роль в стратегическом развитии. Тем не менее, как и любой другой инструментарий, методика имеет ряд несущественных ограничений. В первую очередь в методическом инструментарии использованы основные ключевые индикаторы цифровой трансформации (нематериальные активы, затраты на НИОКР и чистая прибыль), но более узкие, например, такие как количество патентов в области цифровизации, внедрение и использование цифровых двойников месторождений и др., в ней не учтены. Это оправдано тем, что целью не ставились оценка цифровой платформы, а также учет уровня цифровизации и цифровой трансформации поставщиков и потребителей компаний. Во-вторых, методический инструментарий очень сильно зависит от открытости и полноты собираемых данных, несмотря на небольшое число показателей. В-третьих, отсутствует возможность оценки компаний, не котирующихся на фондовой бирже. В-четвертых, вес мультипликаторов определялся на основании проведенного экспертного опроса, результаты которого в значительной степени зависят от экспертов.

Выявлено, что лидеры отрасли в период с 2016 по 2020 г. в РФ по уровню цифровизации и цифровой

трансформации располагаются в следующем порядке от наиболее продвинутых к наименее продвинутым: на первом месте ПАО «Газпром» ($DL_{av} - 4,82\%$); на втором – ПАО «НК «Роснефть» ($DL_{av} - 3,38\%$); на третьем – ПАО «Лукойл» ($DL_{av} - 3,18\%$); на четвертом – ПАО «Татнефть» ($DL_{av} - 2,08\%$). Значения получены путем определения среднего арифметического уровней цифровизации и цифровой трансформации (DL_{av}) за рассматриваемые периоды по каждой компании, по данным табл. 10.

Усредненный показатель уровня цифровизации и цифровой трансформации по отрасли за последние 5 лет составляет 3,36 %, что крайне неудовлетворительно для проведения полноценной цифровой трансформации. Дальнейшее направление исследований видится в проведении оценки и сравнения уровней цифровизации и цифровой трансформации зарубежных нефтегазовых отраслей ведущих нефте- и газодобывающих стран с отечественными, с использованием авторского методического инструментария.

Таким образом, цель текущего исследования достигнута, так как была усовершенствована система управления цифровизацией и цифровой трансформацией нефтегазовой отрасли посредством разработки авторского методического инструментария оценки уровня цифровизации и цифровой трансформации как отдельного предприятия, так и нефтегазовой отрасли в целом, на базе проведенного сравнительного анализа уже существующих методик.

В исследовании были проанализированы теоретические основы цифровизации и цифровой трансформации; изучены и систематизированы общие, отраслевые и производственные (для отдельных предприятий и компаний) зарубежные и отечественные методические инструментарии, методические подходы, рекомендации и методики к оценке цифровизации, цифровой трансформации; идентифицировано текущее состояние цифровой трансформации нефтегазовой отрасли при помощи апробации авторского методического инструментария оценки уровня цифровизации и цифровой трансформации.

Список литературы

1. Гордина В. Трудности разведки Нефтяные проекты в Арктике. URL: <http://pro-arctic.ru/17/04/2018/resources/31616#read> (Дата обращения: 12.06.2022)
2. Насибулин М.М. ТЭК России: оцифровка. *Neftegaz.RU*. 2020;(4):19–24. URL: <https://magazine.neftegaz.ru/upload/iblock/59c/59ce2d2f0ca1e25d1f29c1daadebb2c4.pdf> (Дата обращения: 12.06.2022)
3. Каширский А.С., Кириченко Ю.В. Мировой океан – последний резерв человечества. *Горные науки и технологии*. 2017;(1):67–76. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2017-1-67-74>
4. Алифирова Е. Газпром нефть создала первую в отрасли цифровую модель ачимовской толщи. URL: <https://neftegaz.ru/news/Geological-exploration/197900-gazprom-neft-sozdala-pervuyu-v-otrasli-tsifrovuyu-model-achimovskoy-tolshchi/> (Дата обращения: 12.06.2022)
5. Коваленко А. Нефть с интеллектом. *Эксперт Урал*. 2018;(38). URL: <http://www.assoneft.ru/activities/press-centre/tek/5164/> (Дата обращения: 12.06.2022)
6. Хамидуллин М., Сахарова К. Цифровая трансформация инвестиционной деятельности в ПАО «Татнефть». *Neftegaz.RU*. 2021;(8):28–33. URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/tsifrovizatsiya/694505-tsifrovaya-transformatsiya-investitsionnoy-deyatelnosti-v-pao-tatneft/> (Дата обращения: 12.06.2022)
7. Pleby M., Knutsen E. Data-driven remote condition monitoring optimizes off-shore maintenance, reduces costs. *WorldOil*. 2017:60–62. URL: <https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:d8274ee1-a0ea-4858-b203-9b6e4ea33b9a/wo-1217-offshore-technology.pdf> (Дата обращения: 12.06.2022)
8. Hawash B., Abuzawayda Y.I., Mokhtar U.A. et al. Digital transformation in the oil and gas sector during COVID-19 Pandemic. *International Journal of Management*. 2020;11(12):725–735. <https://doi.org/10.34218/IJM.11.12.2020.067>



9. Daneeva Yu., Glebova A., Daneev O., Zvonova E. Digital transformation of oil and gas companies: energy transition. *Advances in Economics, Business and Management Research*. 2020;(148):199–205. <https://doi.org/10.2991/aeblr.k.200730.037>
10. Ларченко И.В., Воробьева Л.Г. Нефтегазовый комплекс России: сценарий развития. *Инновации*. 2020;(7):12–18. <https://doi.org/10.26310/2071-3010.2020.261.7.003>
11. Мартынов В.Г., Кошелев В.Н., Майер В.В., Туманов А.А. Нефтегазовое образование в России: вчера, сегодня, завтра. *Высшее образование в России*. 2021;30(8–9):144–157. <https://doi.org/10.31992/0869-3617-2021-30-8-9-144-157>
12. Мартынов В.Г., Кошелев В.Н., Душин А.В. Современный вызов для нефтегазового образования. *Высшее образование в России*. 2021;29(12):9–20. <https://doi.org/10.31992/0869-3617-2020-29-12-9-20>
13. 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>
14. Верчеба А.А. Подготовка кадров для горно-геологической отрасли России. *Горные науки и технологии*. 2021;6(2):144–153. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-144-153>
15. Вавенков М.В. VR/AR-технологии и подготовка кадров для горной промышленности. *Горные науки и технологии*. 2022;7(2):180–187. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-2-180-187>
16. Васильков А. Цифровизация нефтегазовой отрасли. URL: <https://dx.media/articles/how-it-works/tsifrovaya-transformatsiya-neftegazovoy-otrasli/> (Дата обращения: 12.06.2022)
17. Алтухов А.В., Гостилович А.О., Кашкин С.Ю. Юридические аспекты цифровых платформ экономики совместного потребления. *Экономика и управление*. 2021;27(2):102–110. <https://doi.org/10.35854/1998-1627-2021-2-102-110>
18. Атурин В.В., Мора И.С., Смагулова С.М. Управление цифровой трансформацией: научные подходы и экономическая политика. *Управленец*. 2020;11(2):67–76. <https://doi.org/10.29141/2218-5003-2020-11-2-6>
19. Tapscott D. *The digital economy by Don tapscott. Promise and Peril in the age of networked intelligence*. New York: McGraw-Hill; 1995. 376 p.
20. Osterwalder A., Pigneur Y., Tucci C.L. Clarifying business models: origins, present, and future of the concept. *Communications of the Association for Information Systems*. 2005;16(1):1–26. <https://doi.org/10.17705/1CAIS.01601>
21. Бабкин А.В., Буркальцева Д.Д., Костень Д.Г., Воробьев Ю.Н. Формирование цифровой экономики в России: сущность, особенности, техническая нормализация, проблемы развития. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки*. 2017;10(3):9–25. URL: https://economy.spbstu.ru/userfiles/files/articles/2017/3/01_babkin_burkaltseva_kosten_vorobev.pdf (Дата обращения: 12.06.2022)
22. Кешелава А.В., Буданов В.Г., Дмитров И.Д. и др. *Введение в «Цифровую» экономику. На пороге «цифрового» будущего. Книга первая*. ВНИИГеосистем; 2017. 28 с. URL: <https://spkurdyumov.ru/uploads/2017/07/vvedenie-v-cifrovuyu-ekonomiku-na-poroge-cifrovogo-budushhego.pdf> (Дата обращения: 12.06.2022)
23. Кох Л.В., Кох Ю.В. Анализ существующих подходов к измерению цифровой экономики. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки*. 2019;12(4):78–89. <https://doi.org/10.18721/JE.12407>
24. Плотников В.А. Цифровизация производства: теоретическая сущность и перспективы развития в российской экономике. *Известия СПбГЭУ*. 2018;(4):16–24. URL: https://unecon.ru/sites/default/files/izvestiya_no_4-2018.pdf (Дата обращения: 12.06.2022)
25. Сулоева С.Б., Мартынов В.С. Особенности цифровой трансформации предприятий нефтегазового комплекса. *Организатор производства*. 2019;27(2):27–36. <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.26.70.003>
26. Апасов Р.Т., Чамеев И.Л., Варавва А.И. и др. Интегрированное моделирование – инструмент повышения качества проектных решений для разработки нефтяных оторочек многопластовых нефтегазоконденсатных месторождений. *Нефтяное хозяйство*. 2018;(12):46–49. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-12-46-49>
27. Мерзлов И.Ю., Шилова Е.В., Санникова Е.А., Сединин М.А. Комплексная методика оценки уровня цифровизации организаций. *Экономика, предпринимательство и право*. 2020;10(9):2379–2396. <https://doi.org/10.18334/epp.10.9.110856>
28. Соловьева И.П., Куприянова М.В. Обзор зарубежных и отечественных методик оценки уровня цифровизации. В: *II Международная научная конференция «Актуальные проблемы менеджмента, экономики и экономической безопасности»*. 28 сентября 2020 г., Костанай. Чебоксары: ИД «Среда»; 2020. С. 125–130. <https://doi.org/10.31483/r-96267>
29. Гилева Т.А. Цифровая зрелость предприятия: методы оценки и управления. *Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. Серия: Экономика*. 2019;(1):38–52. <https://doi.org/10.17122/2541-8904-2019-1-27-38-52>
30. Лapidус Л.В. Анализ методик оценки уровня цифровизации в контексте приоритетности задач для российских регионов. В: *Научно-практическая конференция «Региональная размерность цифровой экономики»*. 23 апреля 2019 г., Москва. С. 6–9. URL: http://larisalapidus.ru/wp-content/uploads/2020/04/Lapidus_IV_LCh_2019_tezisyi-1-1.pdf (Дата обращения: 12.06.2022)
31. Куприянова М.В., Симякова И.П. Методологические подходы к оценке уровня цифровизации промышленного производства. В: *Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Право, экономика и управление: актуальные вопросы»*. 13 декабря 2019 г., Чебоксары. Чебоксары: ИД «Среда»; 2019. С. 28–34. <https://doi.org/10.31483/r-74149>



32. Потететко С.В. Оценка уровня цифровизации предприятий (организаций) и отраслей. Беларусь. ОАО «Гипросвязь». URL: https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/CIS/Documents/Events/2020/03_Minsk/Presentations/ITU%20Workshop%204%20March%202020%20-%20Sergey%20Potetenko.pdf (Дата обращения: 26.08.2021)
33. Кукина Е.А., Мицеловская О.С. Методологический подход к оценке уровня инновационного развития предприятия (на примере сферы жилищно-коммунального хозяйства). *Управленческое консультирование*. 2020;(6):110–122. <https://doi.org/10.22394/1726-1139-2020-6-110-122>
34. Леднева О.В. Статистическое изучение уровня цифровизации экономики России: проблемы и перспективы. *Вопросы инновационной экономики*. 2021;11(2):455–470. <https://doi.org/10.18334/vinec.11.2.111963>
35. Истомина Е.А. Оценка трендов цифровизации в промышленности. *Вестник Челябинского государственного университета*. 2018;(12):108–116. <https://doi.org/10.24411/1994-2796-2018-11212>
36. Яшин С.Н., Щекотурова С.Д. Применение методики оценки эффективности инновационного развития предприятия на примере ПАО «РУСПОЛИМЕТ». *Финансы и кредит*. 2016;(47):27–46. URL: <https://www.fin-izdat.ru/journal/fc/detail.php?ID=70222> (Дата обращения: 12.06.2022)
37. Коханова В.С. Аппарат нечеткой логики как инструмент оценки эффективности цифровизации компании. *Вестник университета*. 2021;(2):36–41. <https://doi.org/10.26425/1816-4277-2021-2-36-41>
38. Брусакова И.А. Методы и модели оценки зрелости инновационной структуры. *Управленческие науки*. 2019;3(9):56–62. <https://doi.org/10.26794/2304-022X-2019-9-3-56-62>
39. Захарова Е.В., Митякова О.И. Оценка инновационного потенциала предприятия с учетом цифровизации экономики. *Вопросы инновационной экономики*. 2020;3(10):1653–1666. <https://doi.org/10.18334/vinec.10.3.110601>
40. Митякова О.И. Оценка инновационного потенциала промышленного предприятия. *Финансы и кредит*. 2004;(13):69–74.
41. Бабкин А.В., Пестова А.Ю. Алгоритм оценки уровня цифровизации промышленного предприятия. В: *Сборник трудов научно-практической конференции с зарубежным участием «Цифровая трансформация экономики и промышленности»*. Под ред. Бабкина А. В. 20–22 июня 2019 г., Санкт-Петербург. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС; 2019. С. 683–680. <https://doi.org/10.18720/IEP/2019.3/74>
42. Бабкин А.В., Пестова А.Ю. Показатели для оценки уровня цифровизации промышленного предприятия. В: *Материалы XIV международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития хозяйствующих субъектов, территорий и систем регионального и муниципального управления»*. 01–02 июня 2019 г., Курск. Курск: Юго-Западный государственный университет. 2019;(3):38–41.
43. Козлов А.В., Тесля А.Б. Цифровой потенциал промышленных предприятий: сущность, определение и методы расчета. *Вестник Забайкальского государственного университета*. 2019;25(6):101–110. <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2019-25-6-101-110>

References

1. Gordina V. Difficulties in exploration oil projects in the Arctic. URL: <http://pro-arctic.ru/17/04/2018/resources/31616#read> (Accessed: 12.06.2022)
2. Nasibulin M.M. Fuel and energy complex of Russia: digitization. *Neftegaz.RU*. 2020;(4):19–24. (In Russ.) URL: <https://magazine.neftegaz.ru/upload/iblock/59c/59ce2d2f0ca1e25d1f29c1daadebb2c4.pdf> (Accessed: 12.06.2022)
3. Kashirsky A.S., Kirichenko Y.V. World ocean as the last reserve of mankind. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2017;(1):67–76. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2017-1-67-74>
4. Alifirova E. Gazprom Neft created the industry's first digital model of the Achimov formation. URL: <https://neftegaz.ru/news/Geological-exploration/197900-gazprom-neft-sozdala-pervuyu-v-otrasli-tsifrovuyu-model-achimovskoy-tolshchi/> (Accessed: 12.06.2022)
5. Kovalenko A. Oil with intelligence. *Expert Ural*. 2018;(38). (In Russ.) URL: <http://www.assoneft.ru/activities/press-centre/tek/5164/> (Accessed: 12.06.2022)
6. Khamidullin M., Sakharova K. Digital transformation of investment activity in PJSC Tatneft. *Neftegaz.RU*. 2021;(8):28–33. (In Russ.) URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/tsifrovizatsiya/694505-tsifrovaya-transformatsiya-investitsionnoy-deyatelnosti-v-pao-tatneft/> (Accessed: 12.06.2022)
7. Ileby M., Knutsen E. Data-driven remote condition monitoring optimizes off-shore maintenance, reduces costs. *WorldOil*. 2017:60–62. URL: <https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:d8274ee1-a0ea-4858-b203-9b6e4ea33b9a/wo-1217-offshore-technology.pdf> (Accessed: 12.06.2022)
8. Hawash B., Abuzawayda Y.I., Mokhtar U.A. et al. Digital transformation in the oil and gas sector during COVID-19 Pandemic. *International Journal of Management*. 2020;11(12):725–735. <https://doi.org/10.34218/IJM.11.12.2020.067>
9. Daneeva Yu., Glebova A., Daneev O., Zvonova E. Digital transformation of oil and gas companies: energy transition. *Advances in Economics, Business and Management Research*. 2020;(148):199–205. <https://doi.org/10.2991/aebmr.k.200730.037>
10. Larchenko L.V., Vorobeva L.G. Oil and gas complex of Russia: development scenario. *Innovations*. 2020;(7):12–18. (In Russ.) <https://doi.org/10.26310/2071-3010.2020.261.7.003>
11. Martynov V.G., Koshelev V.N., Mayer V.V., Tumanov A.A. Oil and gas education in Russia: yesterday, today, tomorrow. *Vyshee Obrazovanie v Rossii*. 2021;30(8–9):144–157. (In Russ.) <https://doi.org/10.31992/0869-3617-2021-30-8-9-144-157>



12. Martynov V.G., Koshelev V.N., Dushin A.V. Modern challenges for oil and gas education. *Vyshee Obrazovanie v Rossii*. 2021;29(12):9–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.31992/0869-3617-2020-29-12-9-20>
13. 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>
14. Vercheba A.A. Personnel training for the mining and geological sector of Russia. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(2):144–153. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-144-153>
15. Vavenkov M.V. VR/AR technologies and staff training for mining industry. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(2):180–187. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-2-180-187>
16. Vasilkov A. Digitalization of the oil and gas industry. URL: <https://dx.media/articles/how-it-works/tsifrovaya-transformatsiya-neftegazovoy-otrasli/> (Accessed: 12.06.2022)
17. Altukhov A.V., Gostilovich A.O., Kashkin S. Yu. Legal aspects of digital platforms for the sharing consumption economy. *Economics and Management*. 2021;27(2):102–110. (In Russ.) <https://doi.org/10.35854/1998-1627-2021-2-102-110>
18. Aturin V.V., Moga I.S., Smagulova S.M. Digital transformation management: Scientific approaches and economic policy. *Upravlenets*. 2020;11(2):67–76. (In Russ.) <https://doi.org/10.29141/2218-5003-2020-11-2-6>
19. Tapscott D. *The digital economy by Don tapscott. Promise and Peril in the age of networked intelligence*. New York: McGraw-Hill; 1995. 376 p.
20. Osterwalder A., Pigneur Y., Tucci C.L. Clarifying business models: origins, present, and future of the concept. *Communications of the Association for Information Systems*. 2005;16(1):1–26. <https://doi.org/10.17705/1CAIS.01601>
21. Babkin A.V., Burkaltseva D.D., Vorobey D.G., Kosten Yu.N. Formation of digital economy in Russia: essence, features, technical normalization, development problems. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*. 2017;3:9–25. (In Russ.) URL: https://economy.spbstu.ru/userfiles/files/articles/2017/3/01_babkin_burkaltseva_kosten_vorobev.pdf
22. Keshelava A.V., Budanov V.G., Dmitrov I.D. et al. *Introduction to the Digital Economy. On the threshold of the “digital” future. Book 1*. VNIIGeosystem; 2017. 28 p. (In Russ.) URL: <https://spkurdyumov.ru/uploads/2017/07/vvedenie-v-cifrovuyu-ekonomiku-na-poroge-cifrovogo-budushhego.pdf>
23. Kokh L.V., Kokh Yu.V. Analysis of existing approaches to measurement. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*. 2019;12(4):78–89. (In Russ.) <https://doi.org/10.18721/JE.12407>
24. Plotnikov V.A. Digitalization of production: the theoretical essence and development prospects in the Russian economy. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo Gosudarstvennogo Ekonomicheskogo Universiteta*. 2018;(4):16–24. (In Russ.) URL: https://unecon.ru/sites/default/files/izvestiya_no_4-2018.pdf
25. Suloeva S.B., Martynatov V.S. The features of the digital transformation of oil and gas enterprises. *Organizator Proizvodstva*. 2019;27(2):27–36. (In Russ.) <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.26.70.003>
26. Apasov R.T., Chameev I.L., Varavva A.I. et al. Integrated modeling: a tool to improve quality of design solutions in development of oil rims of multi-zone oil-gas-condensate fields. *Oil Industry Journal*. 2018;(12):46–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-12-46-49>
27. Merzlov I. Yu., Shilova E.V., Sannikova E.A., Sedinin M.A. Comprehensive methodology for assessing the level of digitalization in the organizations. *Ekonomika, Predprinimatelstvo i Pravo*. 2020;10(9):2379–2396. (In Russ.) <https://doi.org/10.18334/epp.10.9.110856>
28. Soloveva I.P., Kupriianova M.V. A review of foreign and national approaches for evaluating the level of digitization. In: *II International Scientific Conference “Actual Problems of Management, Economics and Economic Security”*. September 28, 2020, Kostanay. Cheboksary: Publ. House “Sreda”; 2020. Pp. 125–130. (In Russ.) <https://doi.org/10.31483/r-96267>
29. Gileva T.A. Digital maturity of the enterprise: methods of assessment and management. *Bulletin USPTU. Science, Education, Economy. Series Economy*. 2019;(1):38–52. (In Russ.) <https://doi.org/10.17122/2541-8904-2019-1-27-38-52>
30. Lapidus L.V. Analysis of methods for assessing the level of digitalization in the context of priority tasks for Russian regions. In: *Scientific and Practical Conference “Regional Dimension of the Digital Economy”*. April 23, 2019, Moscow. Pp. 6–9. URL: http://larisalapidus.ru/wp-content/uploads/2020/04/Lapidus_LV_LCh_2019_tezisi-1-1.pdf (Accessed: 12.06.2022)
31. Kupriianova M.V., Simikova I.P. Methodology of evaluating the level of digitalization in the sphere of industrial production. In: *All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation “Law, Economics and Management: Topical Issues”*. December 13, 2019, Cheboksary. Cheboksary: Publ. House “Sreda”; 2019. Pp. 28–34. (In Russ.) <https://doi.org/10.31483/r-74149>
32. Potetenko S.V. *Assessment of the level of digitalization of enterprises (organizations) and industries*. Belarus. JSC “Giprosvyaz”. URL: https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/CIS/Documents/Events/2020/03_Minsk/Presentations/ITU%20Workshop%204%20March%202020%20-%20Sergey%20Potetenko.pdf (Accessed: 26.08.2021)
33. Kuklina E.A., Mitselovskaya O.S. Methodological approach in assessing the level of innovative development of an enterprise (on the example of housing and communal services sphere). *Administrative Consulting*. 2020;(6):110–122. (In Russ.) <https://doi.org/10.22394/1726-1139-2020-6-110-122>



34. Ledneva O.V. Statistical study of the Russian economy digitalization level: problems and prospects. *Voprosy Innovatsionnoy Ekonomiki*. 2021;11(2):455–470. (In Russ.) <https://doi.org/10.18334/vinec.11.2.111963>
35. Istomina Ye.A. Methodology assessment of trends in the digital economy of industry. *Bulletin of Chelyabinsk State University*. 2018;(12):108–116. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/1994-2796-2018-11212>
36. Yashin S.N., Shchekoturova S.D. Applying the methodology for assessment of enterprise innovative development efficiency: evidence from PAO Ruspolymer. *Finance and Credit*. 2016;(47):27–46. (In Russ.) URL: <https://www.fin-izdat.ru/journal/fc/detail.php?ID=70222> (Accessed: 12.06.2022)
37. Kokhanova V.S. Fuzzy logic apparatus as a tool for assessing the effectiveness of digitalization of a company. *Vestnik Universiteta*. 2021;(2):36–41. (In Russ.) <https://doi.org/10.26425/1816-4277-2021-2-36-41>
38. Brusakova I.A. Methods and models for estimating the maturity of the innovation structure. *Management Sciences*. 2019;9(3):56–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.26794/2304-022X-2019-9-3-56-62>
39. Zakharova E.V., Mityakova O.I. Assessment of the innovative potential of the enterprise taking into account the digitalization of the economy. *Voprosy Innovatsionnoy Ekonomiki*. 2020;10(3):1653–1666. (In Russ.) <https://doi.org/10.18334/vinec.10.3.110601>
40. Mityakova O.I. Evaluation of the innovative potential of an industrial enterprise. *Finance and Credit*. 2004;(13):69–74. (In Russ.)
41. Babkin A.V., Pestova A.Yu. Algorithm of the assessment of level of digitalization of the industrial enterprise. In: Babkin A.V. (ed.) *Collection of Proceedings of the Scientific and Practical Conference with Foreign Participation "Digital Transformation of the Economy and Industry"*. June 20–22, 2019, St. Petersburg. St. Petersburg: POLYTECH-PRESS; 2019. Pp. 683–680. <https://doi.org/10.18720/IEP/2019.3/74>
42. Babkin A.V., Pestova A.Yu. Indicators for assessing the level of digitalization of an industrial enterprise. In: *Materials of the XIV International Scientific-Practical Conference "Actual Problems of Development of Economic Entities, Territories and Systems of Regional and Municipal Government"*. June 01–02, 2019, Kursk. Kursk: Southwestern State University. 2019;(3):38–41.
43. Kozlov A.V., Teslya A.B. Digital potential of industrial enterprises: essence, determination and calculation methods. *Transbaikalian State University Journal*. 2019;25(6):101–110. (In Russ.) <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2019-25-6-101-110>

Информация об авторах

Вера Васильевна Юрак – кандидат экономических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук; доцент кафедры экономики и менеджмента, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-1529-3865](https://orcid.org/0000-0003-1529-3865), Scopus ID [57190411535](https://orcid.org/57190411535), ResearcherID [J-7228-2017](https://orcid.org/J-7228-2017); e-mail vera_yurak@mail.ru

Ирина Геннадьевна Полянская – кандидат экономических наук, доцент, заведующая сектором, ученый секретарь, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-0073-2821](https://orcid.org/0000-0002-0073-2821), Scopus ID [55764050500](https://orcid.org/55764050500); e-mail irina-pol2004@mail.ru

Александр Николаевич Малышев – экономист, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук; лаборант-исследователь научно-исследовательской лаборатории рекультивации нарушенных земель и техногенных объектов, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-3104-1687](https://orcid.org/0000-0002-3104-1687), Scopus ID [57223099993](https://orcid.org/57223099993); e-mail malyshev.k1b@gmail.com

Information about the authors

Vera V. Yurak – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Senior Researcher, Institute of Economics of the Urals Branch of the Russian Academy of Sciences; Associate Professor of the Department of Economics and Management, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation; ORCID [0000-0003-1529-3865](https://orcid.org/0000-0003-1529-3865), Scopus ID [57190411535](https://orcid.org/57190411535), ResearcherID [J-7228-2017](https://orcid.org/J-7228-2017); e-mail vera_yurak@mail.ru

Irina G. Polyanskaya – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Head of the Sector, Scientific Secretary, Institute of Economics of the Urals Branch of the Russian Academy of Sciences; Associate Professor of the Department of Economics and Management, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation; ORCID [0000-0002-0073-2821](https://orcid.org/0000-0002-0073-2821), Scopus ID [55764050500](https://orcid.org/55764050500); e-mail irina-pol2004@mail.ru

Alexander N. Malyshev – Economist, Institute of Economics of the Urals Branch of the Russian Academy of Sciences; Laboratory Researcher of the Research Laboratory for the Reclamation of Disturbed Lands and Man-Made Objects, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation; ORCID [0000-0002-3104-1687](https://orcid.org/0000-0002-3104-1687), Scopus ID [57223099993](https://orcid.org/57223099993); e-mail malyshev.k1b@gmail.com

Поступила в редакцию 12.08.2022
Поступила после рецензирования 13.10.2022
Принята к публикации 15.12.2022

Received 12.08.2022
Revised 13.10.2022
Accepted 15.12.2022