ISSN 0536-1028

IZVESTIYA VYSSHIKH UCHEBNYKH ZAVEDENII
GORNYI ZHURNAL
ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ

3
2019

Журнал распространяется по подписке Агентством «Роспечать», подписной индекс 70367.
Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ), индексируется в Международной базе изданий по наукам о Земле Georef.

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

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

В журнале публикуются статьи по следующим группам специальностей научных работников:

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

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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ

Научно-технический журнал. Издается с 1958 года

Выходит 8 раз в год **№ 3, 2019**

Учредитель и издатель

УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

О. Г. ЛАТЫШЕВ, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург

Редакционная коллегия

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

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

© «Известия высших учебных заведений. Горный журнал», 2019

IZVESTIYA VYSSHIKH UCHEBNYKH ZAVEDENII

GORNYI ZHURNAL

Scientific and technical journal. First published in 1958

8 issues a year **No. 3, 2019**

Founder and publisher

URAL STATE MINING UNIVERSITY

Editor-in-chief

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

Deputy editor-in-chief

O. G. LATYSHEV, Ural State Mining University, Ekaterinburg

Editorial board

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ: ПОДЗЕМНАЯ, ОТКРЫТАЯ, СТРОИТЕЛЬНАЯ

Кантемиров В. Д., Титов Р. С., Яковлев А. М. **Обоснование технологий освоения месторождений медноколчеданных руд в арктической зоне Урала** **6**

Шишлянников Д. И., Максимов А. Б. **Развитие средств механизированной добычи калийных руд** **15**

ГЕОМЕХАНИКА. РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

Миренков В. Е. **Интегральные уравнения, выявляющие некорректные формулировки задач геомеханики (In English)** **22**

Кашников Ю. А., Ермашов А. О., Лебедева О. О. **Трехмерное геомеханическое моделирование как основа решения сложных задач обеспечения промышленной безопасности разработки калийных месторождений (In English)** **30**

ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА. АЭРОГАЗОДИНАМИКА

Латышев О. Г., Казак О. О., Сынбулатов В. В. **Исследование реологических характеристик горных пород в условиях воздействия на массив поверхностно-активными веществами** **39**

Аликулов Ш. Ш. **Лабораторные исследования применения поверхностно-активных веществ для подземного выщелачивания урана из слабопроницаемых руд** **48**

ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ И НЕФТЕГАЗОВАЯ ГЕОЛОГИЯ, ГЕОФИЗИКА

Егошина О. С., Александров Б. М. **Система цифрового кодирования генетической классификации видов торфа и ее роль в комплексной оценке запасов торфа по категориям сырья и направлениям использования** **55**

Давыдов В. А., Арзамасцев Е. В., Байдиков С. В., Горшков В. Ю. **Электрометрические исследования на Крылатовском руднике** **64**

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Козин В. З., Комлев А. С., Ступакова Е. В. **Оценка однородности навесок и погрешности метода выполнения измерений при анализе руд и продуктов обогащения (In English)** **72**

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ ГОРНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

Трушина Г. С. **Значение угольной промышленности на современном и перспективном этапах развития мировой и российской энергетики** **81**

ГОРНАЯ МЕХАНИКА. ГОРНЫЕ МАШИНЫ И ТРАНСПОРТ

Афанасьев А. И., Казаков Ю. М., Копачев В. Ф. **Градиент давления по высоте лопаток в шахтных осерадиальных вентиляторах с конической проточной частью** **90**

Юдин А. В., Абдулкаримов М. К., Шестаков В. С. **Анализ и оценка параметров колебаний двухмассной с диссипативными свойствами системы грохота с каскадной просеивающей поверхностью** **97**

Софьина Н. Н., Островский В. Г., Воробель С. В., Романов В. А., Зверев В. Ю. **Диагностирование нефтепромыслового и горного оборудования методом анализа возбужденных резонансных колебаний** **107**

БЕЗОПАСНОСТЬ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Шинкевич М. В., Родин Р. И. **Способ дегазации отрабатываемого угольного пласта скважинами в породах кровли** **115**

ИСТОРИЯ. ИНФОРМАЦИЯ. РЕЦЕНЗИИ

Памяти коллеги. Латышев Олег Георгиевич..... **122**

CONTENTS

GEOTECHNOLOGY: UNDERGROUND, OPEN, CONSTRUCTIONAL

Kantemirov V. D., Titov R. S., Iakovlev A. M. **Substantiating the technologies of copper sulphide ore deposits exploitation in the Arctic zone of the Urals** **6**

Shishliannikov D. I., Maksimov A. B. **The development of potash ore mechanized extraction**... **15**

GEOMECHANICS. DESTRUCTION OF ROCKS

Mirenkov V. E. **Integral equations revealing ill-posed problems in geomechanics (In English)** **22**

Kashnikov Iu. A., Ermashov A. O., Lebedeva O. O. **3d geomechanical modeling as the complex problem solving assumption of potassium salt development safety (In English)**..... **30**

PHYSICAL AND CHEMICAL PROCESSES OF MINING. AEROGAS DYNAMICS

Latyshev O. G., Kazak O. O., Synbulatov V. V. **Investigating the rheological characteristics of rocks in the conditions of rock massif saturation with surfactants**..... **39**

Alikulov Sh. Sh. **Laboratory researches on the application of surfactants of uranium underground leaching from weakly permeable ores**..... **48**

MINING AND OIL-AND-GAS GEOLOGY, GEOPHYSICS

Egoshina O. S., Aleksandrov B. M. **Digital coding system of peat types genetic classification and its role in peat reserves integrated assessment according to raw material categories and uses**..... **55**

Davydov V. A., Arzamastsev E. V., Baidikov S. V., Gorshkov V. Iu. **Electrometric studies in Krylatovskii mine**..... **64**

MINERAL PROCESSING

Kozin V. Z., Komlev A. S., Stupakova E. V. **Sample weights homogeneity assessment and measurement procedure errors in the analysis of ore and mineral processing products (In English)** ... **72**

ECONOMICS AND MINING PRODUCTION CONTROL

Trushina G. S. **The significance of coal industry at the modern and future stages of global and Russian energy sector development**..... **81**

ROCK GEOMECHANICS. MINING MACHINERY AND TRANSPORT

Afanasiev A. I., Kazakov Iu. M., Kopachev V. F. **Pressure gradient by the height of blades in mine axial-radial fans with a flare blade section**..... **90**

Iudin A. V., Abdulkarimov M. K., Shestakov V. S. **Analysing and evaluating oscillation parameters of a dissipative two-mass system of a screen with a cascade screening surface**..... **97**

Sofina N. N., Ostrovskii V. G., Vorobel S. V., Romanov V. A., Zverev V. Iu. **Diagnosis of oilfield and mining equipment by analyzing excited resonant oscillations 107**

MINING SAFETY

Shinkevich M. V., Rodin R. I. **Method of degassing a coal seam by wells in the roof rock 115**

HISTORY. INFORMATION. REVIEWS

***In memory of Oleg Georgievich Latyshev*..... 122**

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ: ПОДЗЕМНАЯ, ОТКРЫТАЯ, СТРОИТЕЛЬНАЯ

УДК 553.435(470.13) DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-6-14

Обоснование технологий освоения месторождений медноколчеданных руд в арктической зоне Урала

Кантемиров В. Д.[1], Титов Р. С.[1]*, Яковлев А. М.[1]
[1] Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия
e-mail: ukrigd15@mail.ru

Реферат

Введение. *В связи с истощением запасов отрабатываемых меднорудных месторождений цветная металлургия Уральского экономического региона испытывает ощутимый дефицит медесодержащего сырья. Одним из перспективных регионов для организации новой сырьевой базы цветной металлургии является Приполярный и Полярный Урал, где поисковыми геологоразведочными работами выявлено значительное количество перспективных для доразведки и промышленного освоения меднорудных и медно-цинковых рудопроявлений.*

Цель работы. *На основании анализа геологических данных и оценки возможного объема промышленных запасов медесодержащего сырья обосновать техническую возможность и экономическую целесообразность вовлечения в переработку богатейших ресурсов арктической зоны, в первую очередь – Приполярного Урала.*

Методология. *Разработка колчеданных месторождений, особенно с использованием флотационных методов, сопровождается формированием особой техногенной среды и резким нарушением природного равновесия. Для минимизации экологического воздействия на окружающую среду при переработке медноколчеданных руд рассматриваются современные методы рентгенорадиометрической и электростатической сепарации.*

Результаты. *Анализом и оценкой геологических данных выявлены районы первоочередного освоения меднорудных месторождений, обоснованы объемы первоочередной добычи руды, определены основные подходы к разработке месторождений и состав основного технологического и обогатительного оборудования. Разработаны подходы и принципиальная качественно-количественная схема предварительной концентрации рудного сырья с использованием сухих методов предварительного обогащения, реализация которых позволит сократить до минимума вредное воздействие на экологию арктических регионов.*

Выводы. *Регионы Приполярного Урала располагают значительными оцененными прогнозными ресурсами рудных полезных ископаемых, перспективное освоение которых для отечественной металлургии способствует интенсификации импортозамещения и диверсификации поставок меднорудного сырья.*

Ключевые слова: *медноколчеданные руды; объем запасов; объемы добычи; карьер; технологии обогащения; концентрат; эффективность инвестиций.*

Введение. Цветная металлургия Уральского экономического региона в последнее время испытывает определенный дефицит медесодержащего сырья, что обусловлено истощением собственной минерально-сырьевой базы. Отчасти сглаживание проблемы замещения выбывающих горнодобывающих мощностей обеспечивается планируемым освоением запасов медно-порфировых руд Южного Урала Михеевским и Томинским ГОКами в составе АО «Русская медная компания», однако при этом не снимается потребность в пополнении ресурсов традиционных для цветной металлургии Урала медноколчеданных руд.

Методология. Далее анализируется возможность вовлечения в переработку медноколчеданных руд Приполярного Урала с осуществлением предварительной концентрации современными сухими методами обогащения, позволяющей минимизировать негативное экологическое воздействие технологии разработки месторождений и первичной переработки руд на окружающую среду.

Анализ и обсуждение. Минерально-сырьевые ресурсы для производства меди на Урале развивались в основном на базе медноколчеданных месторождений, связанных с главной рудовмещающей структурой Урала – Магнитогорско-Тагильским прогибом, к которому приурочена рудная зона Северного Урала Свердловской области с разрабатываемыми Валенторским, Шемурским, Ново-Шемурским и Тарньерским месторождениями. Потенциальные месторождения Приполярного Урала принадлежат к этой же рудовмещающей структуре. Геологосъемочными, поисковыми и тематическими работами на территории Северного и Приполярного Урала (ХМАО) выявлено три потенциальных колчеданоносных рудных района: Северо-Сосьвинский, Вольинский и Грубеинско-Тыкотловский – с приуроченными к ним соответствующими колчеданными месторождениями (*Шадрин А. Н. Количественная оценка прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых зоны транспортного коридора «Урал Промышленный – Урал Полярный»: отчет. Ч. V. Медь, цинк, свинец. Тюмень: Сибирский науч.-аналит. центр. 2006. 27 с.; Золоев К. К., Федоров О. П. Концепция комплексного промышленного освоения Приполярного Урала на основе опережающего развития транспортной и энергетической инфраструктуры: отчет; раздел «Недропользование» / Департамент по нефти, газу и минеральным ресурсам Ханты-Мансийского автономного округа–Югры. Екатеринбург–Ханты-Мансийск: НПЦ Мониторинг, 2005. 205 с.*).

Северо-Сосьвинский район включает три крупных и два мелких разведанных колчеданных месторождения и четыре перспективных участка. Суммарные утвержденные запасы по крупным месторождениям категорий $C_1 + C_2$ составляют: руды – 48,6 млн т; меди – 602,0 тыс. т; цинка – 975,3 тыс. т. Утвержденные прогнозные ресурсы (на 01.01.2003 г.) по категории P_2 оценены в 33,1 млн т руды (400 тыс. т меди и 640 тыс. т цинка). Суммарные запасы по категории C_2 мелких месторождений, оцененные как авторские и квалифицированные как прогнозные ресурсы, по состоянию на 01.01.2003 г. составляли по категории P_1: руда – 8,6 млн т, медь – 25,6 тыс. т, цинк – 24,6 тыс. т; по категории P_3: руда – 16,0 млн т, медь – 210 тыс. т, цинк – 130 тыс. т; по категории P_2: руда – 12,8 млн т, медь – 170 тыс. т, цинк – 100 тыс. т. Эти оценки утверждены Министерством природных ресурсов РФ (МПР).

Как наиболее перспективные для потенциального промышленного освоения указанного района можно выделить Маньялбынтурский и Большесосьвинский участки. Рудопроявление Маньялбынтурского участка представлено двумя рудными телами № 1 и № 2 со средним содержанием соответственно меди (β^{Cu}) 0,48 % и 1,73 %; цинка (β^{Zn}) 1,34 % и 1,01 %. Среднее содержание по двум рудным телам: меди 1,01 %; цинка 1,17 %. Подсчитанные по рудным телам запасы категории C_2 оцениваются как авторские и равны соответственно: меди – 9 тыс. т и 21 тыс. т, цинка – 19 тыс. т и 12 тыс. т. Рудопроявление Большесосьвинского участка представлено одноименным рудным телом с содержанием меди 0,42–2,05 %.

Утвержденные МПР РФ по Северо-Сосьвинскому району прогнозные ресурсы по категории P_3 (на 01.01.2003 г.) составляют: медь – 1000 тыс. т (β^{Cu} 1,5 %); цинк – 1500 тыс. т (β^{Zn} 2,2 %).

Вольинский район представлен рядом рудопроявлений, наиболее крупными являются рудопроявления Яныманьинского и Тольинского участков. Минерализация участков представлена вкрапленностью пирита, халькопирита, сфалерита

и гематита, в которых β^{Cu} 1,4 %; β^{Zn} 0,8 % и β^{Au} 1,5 г/т. Авторские (В. Е. Козырев, К. К. Золоев, А. В. Сурганов) прогнозные ресурсы участков оценены на 01.01.1998 г. по категории P_3 до глубины 500 м и составляют: медь 1500–1880 тыс. т; цинк 1000–1130 тыс. т. Прогнозные ресурсы по Вольинскому району, принятые МПР РФ, составляют: по меди – 1500 тыс. т; по цинку – 1000 тыс. т со средним содержанием меди ~ 2 %; цинка ~ 1,2 %.

Грубеинско-Тыкотловский район характеризуется колчеданно-полиметаллическим оруденением. Рудопроявление представлено тремя участками: Тыкотловским, Амбровожским и Парусшорским. Наиболее богатая минерализация района приурочена к западной зоне с содержанием 7,8 % меди, 11,4 % свинца и 0,3 % цинка. Прогнозные ресурсы по району квалифицированы по категории P_3 и оценены (В. Е. Козыревым) до глубины 500 м в следующих количествах: медь – 2400 тыс. т (содержание 2 %); цинк – 1800 тыс. т (содержание 1,5 %); свинец – 1440 тыс. т (содержание 1,2 %). Прогнозные ресурсы категории P_3, принятые МПР РФ по этому району, составляют: по меди – 1000 тыс. т; по цинку – 1000 тыс. т. Прогнозные ресурсы свинца не приняты.

В табл. 1 приведены расчетные прогнозные запасы руд по категории P_3 в рудных районах на территории ХМАО–Югра. Расчеты проведены на основе использования массовой доли меди в рудах по районам сосредоточения ее запасов, принятых МПР РФ.

Таблица 1. Расчетные запасы медной руды на территории ХМАО–Югра
Table 1. Estimated reserves of copper ore at the territory of KhMAO-Yugra

Рудный район	Рассчитанные запасы руды категории P_3, млн т	
	по В. Е. Козыреву	принятые МПР РФ
Северо-Сосьвинский	67	44
Вольинский	94	61
Грубеинско-Тыкотловский	120	79
Итого по ХМАО	281	184

При оценке меднорудного потенциала на основе анализа имеющейся геологической информации принято, что для первоочередной разработки наиболее подходит группа месторождений медно-цинковых руд Вольинского и Северо-Сосьвинского районов. В табл. 2 представлено состояние прогнозных ресурсов месторождений указанной группы.

Оценку возможного объема промышленных запасов предлагается производить по формуле приведения с учетом различных категорий запасов (C_1, C_2, P_1, P_2, P_3) [3]:

$$Z_{\text{пр}} = (C_1 + C_2) + \frac{P_1}{2} + \left(\frac{P_2 + P_3}{5}\right). \quad (1)$$

Объем приведенных промышленных запасов в пределах указанных районов может составить более 20 млн т. С учетом глубины оценки прогнозных ресурсов (200–500 м по отдельным рудопроявлениям) и опыта отработки сходных месторождений севера Свердловской области разработку месторождений предполагается производить открытым способом в два этапа: на первом этапе – Вольинского района, на втором – Северо-Сосьвинского района. Для освоения месторождения Вольинского района горно-обогатительный комбинат (ГОК) производственной мощностью до 1 млн т руды в год целесообразно разместить рядом с пос. Приполярный, в зоне доступности к планируемым автомобильным и железным

дорогам [3, 4]. Параметры карьеров по отработке медно-цинковых руд приняты с учетом опыта освоения [5] схожих по геологическому типу месторождений севера Свердловской области (табл. 3).

Месторождения Северо-Сосьвинского района предполагается осваивать во вторую очередь, с частичным использованием оборудования, высвобождаемого после завершения работ в Вольинском районе.

Особое значение приобретает выбор технологий обогащения медноколчеданных руд в районах разработки месторождений [6–9]. Это связано с особой чувствительностью природы Приполярного Урала, являющейся средой обитания ценных рыб и редких эндемиков [10].

Таблица 2. Состояние прогнозных ресурсов категории P_3 медно-цинковых месторождений для первоочередного освоения

Table 2. The status of P_3 perspective resources of copper-zinc deposits for top-priority exploitation

Рудный район	Площадь, км^2	Геолого-промышленный тип	Тип руды	Глубина прогноза, м	Среднее содержание компонентов, %	Ресурсы металла, тыс. т
Вольинский	540	Медно-цинково-колчеданный	Прожилковая, вкрапленная	500		
Cu					2,0	1880
Zn					1,2	1130
Северо-Сосьвинский	220	Медно-цинково-колчеданный	Прожилковая, вкрапленная	500		
Cu					1,5	1000
Zn					2,2	1500

Разработка колчеданных месторождений сопровождается формированием особой техногенной среды, резким нарушением природного равновесия, что обусловлено доступом кислорода воздуха, углекислого газа и поверхностных вод, обогащенных кислородом, к сульфидным рудам при их добыче. В кислородной среде у сульфидов, в состав которых входят неметаллы с полным заполнением электронных оболочек электронами (S^{2-}, As^{3-} и т. п.) и металлы (Fe^{2+}, Cu^{+} и т. д.) с низкой степенью окисления, резко проявляется химический потенциал (способность веществ к химическим изменениям). При окислении сульфидов выделяется тепло Q с образованием Fe^{3+}, S^{6+}, As^{5+} и образуются растворы кислот, как, например, при окислении пирита (FeS_2): $2FeS_2 + 7O_2 + 2H_2O \rightarrow 2FeSO_4 + 2H_2SO_4$.

Аналогичные процессы окисления сульфидов и преобразования продуктов реакций могут развиваться и при разработке колчеданных месторождений ХМАО, особенно с использованием флотационных методов, основанных на применении токсичных реагентов и размещении на поверхности земли тонкодисперсных сульфидсодержащих хвостов обогащения – источников серной кислоты и сульфатов тяжелых цветных металлов. Полный цикл получения сульфидных концентратов флотацией на территории ХМАО, предлагаемый рядом исследователей, является экологически опасным направлением для Приполярного Урала.

Результаты. Технико-экономические расчеты выполнены для карьера № 3 (табл. 3). Приняты следующие условия: средняя плотность руды – 4,3 т/м^3, вскрышных пород – 2,8 т/м^3; коэффициент вскрыши по группе карьеров – 3,8 м^3/т; потери – 3,5 %; разубоживание – 7,7 %. Установлено, что карьерами первой очереди всего может быть добыто ~ 12 млн т руды и отработано ~ 46 млн м^3 вскрышных пород. При среднем содержании меди 1,95 % и цинка 1,65 % соответственно может быть добыто ~ 220 тыс. т меди и ~ 190 тыс. т цинка, кроме того, около 9 т золота (при содержании 0,9–1,0 г/т). Расчет производительности и необходимого количества технологического оборудования карьера выполнен для годового объ-

ема добычи горной массы, что соответствует максимальной производительности карьера № 3 (табл. 3): по руде – 1000,0 тыс. т (250,0 тыс. м^3); по скальной вскрыше – 10 640,0 тыс. т (3800,0 тыс. м^3); всего – 11 640,0 тыс. т (4050,0 тыс. м^3). Общий срок существования предприятия (с момента получения лицензии на пользование недрами) может составить 17–20 лет. Начало ведения горных работ планируется через 5 лет с момента получения лицензии на пользование недрами.

Таблица 3. Параметры карьеров на конец отработки и объемы добычи
Table 3. The parameters of open pits at the end of mining and production

Параметр карьера	Карьер № 1* Тарньер	Карьер № 2** Ново-Шемур	Карьер № 3 Расчетный
Глубина, м	190	120	165
Длина по дну, м	100	510	400
Ширина по дну, м	45	100	200
Площадь по дну, тыс. м^2	4	40	63
Длина по поверхности, м	630	750	730
Ширина по поверхности, м	440	340	530
Площадь по поверхности, тыс. м^2	220	200	304
Объем горной массы в контурах карьера, тыс. м^3	16 150	9628	20 192
В том числе руды, тыс. м^3	1226	459	1164
тыс. т	4622	1970	5007
вмещающих пород, тыс. м^3	14 924	9169	19 027
тыс. т	41 784	25 670	53 276
Коэффициент вскрыши, м^3/т	3,23	4,65	3,8

* Параметры действующего карьера; ** проектные параметры карьера.

Для минимизации экологического воздействия на окружающую среду при переработке медноколчеданных руд месторождений Приполярного Урала предлагаются сухие методы концентрирования ценных компонентов в промпродукт на основе использования современных рентгенорадиометрических (РРС) и барабанных коронных электростатических (ЭС) сепараторов [11]. С учетом специфики минерального состава сырья и принятого оборудования разработана принципиальная технологическая схема предварительного обогащения медно-цинковых руд ХМАО–Югра.

Расчеты показывают, что в результате сухого способа обогащения после переработки 1 млн т руды с содержанием меди 1,9 % и цинка 1,65 % может быть получено примерно 240 тыс. т медно-цинкового концентрата с содержанием 7,77 % меди и 6,63 % цинка соответственно, а также хвостов обогащения в объемах ~ 560 тыс. т. Хвосты складируются в специальный отвал с гидроизоляцией основания. Таким образом, предлагаемая технология обогащения позволяет извлечь из руды в концентрат 82–98 % ценных металлов.

Полученный медно-цинковый концентрат отгружается железнодорожным транспортом на медеплавильные заводы Уральского региона для последующей глубокой переработки.

Опыт переработки колчеданных руд свидетельствует о наличии в них золота со средним содержанием 0,9–1,5 г/т. На медеплавильных заводах отработана технология выделения золота из черновой меди, что позволяет получать предприятиям существенный дополнительный доход.

С учетом указанного опыта переработки руд выполнен расчет по прогнозируемому содержанию золота в концентрате. При прогнозируемой средней массовой доле золота в руде 1 г/т в 1 млн т руды содержится ~ 0,9–1,0 т золота. Парагенетически золото на 90 % связано с сульфидной минерализацией, т. е. 900 кг золота содержится в сульфидах, при этом в хвостах обогащения будет потеряно ~76 кг драгоценного металла.

Оценка эффективности проекта освоения медно-колчеданных руд Приполярного Урала показала, что объем первоначальных инвестиций может составить 4–5 млрд р. при среднегодовых эксплуатационных затратах более 1,5 млрд р. Выручка от реализации товарной продукции определена из расчета рыночной стоимости ценных компонентов в концентрате (меди, цинка, золота) и зависит от многих факторов, связанных с уровнем цен на металлы на мировых рынках, валютных курсов и др.

Расчетные показатели свидетельствуют об эффективности данного проекта – сравнительно высокий индекс доходности (PI = 4,3), ЧДД свыше 5 млрд р. и приемлемый срок окупаемости ~ 6 лет. Анализ рисков инвестиций свидетельствует о достаточно высокой чувствительности инвестиционного проекта к рыночной конъюнктуре (рис. 1). Несмотря на стохастичность в поведении колебаний цены на металл во времени, полученная регрессионная зависимость будет сохранять свою тенденцию и для более поздних периодов оценки.

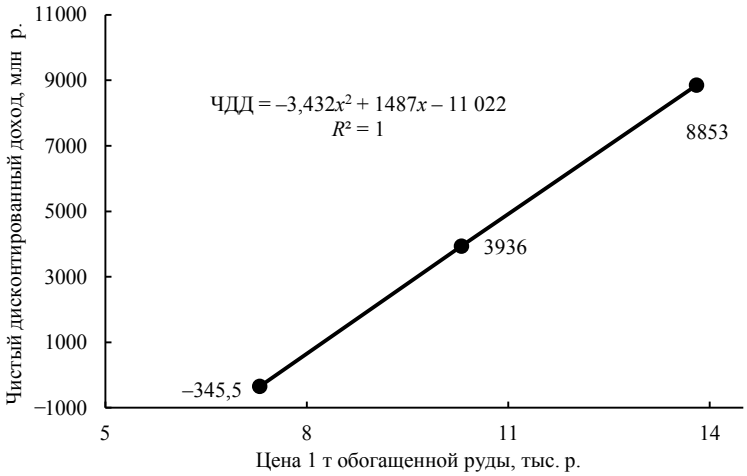


Рис. 1. Зависимость эффективности (ЧДД) проекта от цен на металлы
Fig. 1. Dependence between the project effectiveness (NPV) and the prices for metals

Выводы. Актуальность исследований, связанных с оценкой перспектив освоения новых сырьевых баз для отечественной металлургии во многом обусловлена острым дефицитом руд цветных и легирующих металлов (медь, хром, марганец и др.), который покрывается поставками из-за рубежа. Одним из направлений импортозамещения и диверсификации поставок меднорудного сырья в регионе может стать освоение сырьевых ресурсов Приполярного Урала в пределах горной части территории Ханты-Мансийского автономного округа–Югры.

Для минимизации вредного экологического воздействия на окружающую среду предпочтительными технологиями обогащения медноколчеданных руд и другого минерального сырья месторождений Приполярного Урала являются сухие методы предварительного обогащения, без применения глубоких стадий обогащения и химических реагентов. При этом предварительное обогащение на про-

мышленной площадке предприятий рекомендуется производить стадиальным дроблением, грохочением и сепарацией сырья с отсечением некондиционных руд и сопутствующих пород, при этом полученный промежуточный продукт (концентрат) вывозится в освоенные индустриальные регионы Урала для последующей переработки.

Повышение эффективности инвестиционных проектов по отработке медно-цинковых руд, чувствительных к изменению цены на товарную продукцию, можно обеспечить за счет этапности разведки и отработки месторождений введением в эксплуатацию на первом этапе наиболее ценных участков. Создать условия для снижения затрат на вскрышные работы можно путем сокращения коэффициентов вскрыши в границах отработки передовых карьеров первой очереди и использования техники и технологии, в наибольшей степени соответствующих сложившимся горнотехническим условиям разработки.

Комплексное освоение ресурсов арктических регионов Урала при условии создания необходимой транспортной, энергетической и социальной инфраструктуры может быть достаточно эффективным, как показывает успешный опыт разработки углеводородов и предварительная оценка перспектив освоения медно-рудного потенциала [12–15].

Исследования выполнены в рамках Государственного задания 007-00293-18-00. Тема № 0405-2018-0001. Проект № 18-5-5-10. Обоснование методов и этапов адаптации горнотехнологических систем к изменяющимся условиям разработки сложноструктурных глубокозалегающих месторождений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Виноградов А. М., Малышев А. И. Факторы и критерии прогноза, направление и методика поисков крупных колчеданных месторождений на Урале // Литосфера. 2014. № 5. С. 90–109.

2. Алтушкин И. А., Щибрик М. Ю., Малек Т. И., Король Ю. А. Инновационные подходы в развитии меднорудной базы на Урале // Горный журнал. 2016. № 7. С. 77–82.

3. Корнилков С. В., Лаптев Ю. В., Кантемиров В. Д. Стратегия освоения месторождений твердых полезных ископаемых Приполярного Урала // Известия вузов. Горный журнал. 2013. № 6. С. 11–17.

4. Машковцев Г. А., Быховский Л. З., Коротков В. В., Орлова Н. И. Рудный потенциал твердых полезных ископаемых арктической зоны России // Разведка и охрана недр. 2016. № 3. С. 3–12.

5. Кантемиров В. Д. Технологические особенности освоения новых сырьевых баз // ГИАБ. 2014. № 6. С. 369–373.

6. Мацко Н. А., Харитонова М. Ю. Экспресс-оценка вероятных темпов роста железорудной и медной отраслей минерально-сырьевого комплекса России // ГИАБ. 2014. № 7. С. 294–299.

7. Евдокимов А. Н., Смирнов А. Н., Фокин В. И. Полезные ископаемые арктических островов России // Записки Горного института. 2015. Т. 216. С. 5–12.

8. Рыльникова М. В., Емельяненко Е. А., Горбатова Е. А., Ягудина Ю. Р. Совершенствование технологии переработки руд медноколчеданных месторождений Урала // Горный журнал. 2016. № 12. С. 65–72.

9. Бодуэн А. Я., Петров Г. В., Спыну А. Ю., Мардарь И. И. Попутное извлечение редких микроэлементов при комплексной переработке сульфидных медных руд // Металлург. 2014. № 1. С. 83–85.

10. Борисков Ф. Ф., Кантемиров В. Д. Минимизация экологического ущерба в районах с повышенной экологической чувствительностью к переработке колчеданных руд // Фундаментальные основы технологий переработки и утилизации техногенных отходов: матер. междунар. конгресса «ТЕХНОГЕН – 2012». Екатеринбург: УИПЦ, 2012. С. 369–371.

11. Шемякин В. С., Скопов С. В., Федоров Ю. О. Радиометрическое обогащение минерального сырья и техногенных отходов // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: матер. междунар. науч.-техн. конф. Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2009. С. 38–41.

12. Ilinova A. A., Dmitrieva D. M. Sustainable development of the Arctic zone of the Russian Federation: ecological aspect // Biosciences Biotechnology Research Asia. 2016. Iss. 13(4). P. 2101–2106. DOI: 10.13005/bbra/2370

13. Johnson E. Trends 2015. The national economy is taking off will our industry do the same? // North. Logger and Timber Process. 2015. Vol. 63. No. 7. P. 18–20, 21–23.

14. Sakhuja V., Narula K. Asia in the Arctic. Narratives, Perspectives and Policies. Singapore: Springer, 2016. 143 p.

15. Conley H. A., Pumphrey D. L., Toland T. M., David M. Arctic economics in the 21st century. The benefits and costs of cold. Washington: CSIS, 2013. 67 p.

Поступила в редакцию 12 ноября 2018 года

Сведения об авторах:

Кантемиров Валерий Даниилович – кандидат технических наук, заведующий сектором управления качеством минерального сырья Института горного дела УрО РАН. E-mail: ukrkant@mail.ru
Титов Роман Сергеевич – научный сотрудник сектора управления качеством минерального сырья Института горного дела УрО РАН. E-mail: ukrigd15@mail.ru
Яковлев Андрей Михайлович – научный сотрудник сектора управления качеством минерального сырья Института горного дела УрО РАН. E-mail: ukrigd15@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-6-14

Substantiating the technologies of copper sulphide ore deposits exploitation in the Arctic zone of the Urals

Valerii D. Kantemirov[1], Roman S. Titov[1], Andrei M. Iakovlev[1]
[1] Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. *Owing to the depletion of reserves in mineable copper deposits, the non-ferrous metallurgy of the Ural Economic Region runs a significant deficit of copper-containing raw material. One promising region for the organization of a new non-ferrous metallurgy mineral base is the Nether-Polar and Polar Urals. Geological exploration discovered a significant number of promising copper and copper-zinc ore occurrences for supplementary exploration and industrial exploitation.*

Research aim. *Based on geological data analysis and the estimation of copper-containing raw material potential industrial reserves, the research aims to substantiate technical capability and economic advisability of including, first of all, the Nether-Polar Urals into Arctic zone reach resources processing.*

Methodology. *Pyrite deposits exploitation, particularly with the use of flotation methods, is accompanied with special technogenic environment development as well as drastic environmental disturbance. In order to minimize environmental impact caused by copper sulphide ore processing, modern methods of X-ray radiometric and electrostatic separation are considered.*

Results. *Geological data analysis and estimation revealed the regions of top-priority exploitation of copper deposits; main approaches to deposits exploitation and the set of main technological and mineral processing equipment have been determined. Approaches and principal quantitative-qualitative scheme of ore raw material preliminary concentration have been developed with the use of dry methods of preconcentration, the realization of which will make it possible to minimize the negative environmental impact on the ecology of Arctic regions.*

Conclusions. *The regions of the Nether-Polar Urals have considerable evaluated perspective resources of ore minerals, further exploitation of which contributes to the intensification of import substitution industrialization and copper raw material supply diversification in native metallurgy.*

Key words: *copper sulphide ore; reserves; production; open pit; dressing technology; concentrate; the effectiveness of investment.*

Acknowledgements: research has been carried out under the government contract no. 007-00293-18-00, theme no. 0405-2018-0001, project no. 18-5-5-10. Substantiating the methods and the stages of mining-technological systems adaptation to the changing conditions of deep complex-structured deposits exploitation.

REFERENCES

1. Vinogradov A. M., Malyshev A. I. Forecast factors and criteria, direction and technique of large pyrite deposits prospecting in the Urals. *Litosfera = Lithosphere*. 2014; 5: 90–109. (In Russ.)
2. Altushkin I. A., Shchibrik M. Iu., Malek T. I., Korol Iu. A. Innovative approaches to the development of copper mineral base in the Urals. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2016; 7: 77–82. (In Russ.)
3. Kornilkov S. V., Laptev Iu. V., Kantemirov V. D. Development strategy of the fields of solid minerals of the Pre-polar Urals. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2013; 6: 11–17. (In Russ.)
4. Mashkovtsev G. A., Bykhovskii L. Z., Korotkov V. V., Orlova N. I. Solid minerals mining potential of Arctic region of Russia. *Razvedka i okhrana nedr = Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2016; 3: 3–12. (In Russ.)
5. Kantemirov V. D. Technological features of development of new raw-material bases. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2014; 6: 369–373. (In Russ.)
6. Matsko N. A., Kharitonova M. Iu. The express-estimation of probable growth rates for iron and copper branches of Russian mineral sector. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2014; 7: 294–299. (In Russ.)
7. Evdokimov A. N., Smirnov A. N., Fokin V. I. Minerals of Russian Arctic islands. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2015; 216: 5–12. (In Russ.)

8. Rylnikova M. V., Emelianenko E. A., Gorbatova E. A., Iagudina Iu. R. Improving the technology of processing ore in copper sulphide ore deposits in the Urals. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2016; 12: 65–72. (In Russ.)
9. Boduen A. Ia., Petrov G. V., Spynu A. Iu., Mardar I. I. Incidental extraction of rare microelements at complex processing of sulfide copper ores. *Metallurg = Metallurgist*. 2014; 1: 83–85. (In Russ.)
10. Boriskov F. F., Kantemirov V. D. Ecological damage minimization in the regions with increased environmental sensitivity to pyrite ore processing. In: *The fundamentals of the technologies of technogenic wastes processing and utilization: Proceedings of International Congress TECHNOGEN – 2012*. Ekaterinburg: UIPTs Publishing; 2012: 369–371. (In Russ.)
11. Shemiakin V. S., Skopov S. V., Fedorov Iu. O. Radiometric dressing of mineral raw material and technogenic wastes. In: *Scientific fundamentals and practice of ore and technogenic raw material processing: Proceedings of International Scientific-to-Practice Conference*. Ekaterinburg: Fort Dialog-Iset Publishing; 2009: 38–41. (In Russ.)
12. Ilinova A. A., Dmitrieva D. M. Sustainable development of the Arctic zone of the Russian Federation: ecological aspect. *Biosciences Biotechnology Research Asia*. 2016; 13(4): 2101–2106. DOI: 10.13005/bbra/2370
13. Johnson E. Trends 2015. The national economy is taking off will our industry do the same? *North. Logger and Timber Process*. 2015; 63 (7): 18–20, 21–23.
14. Sakhuja V., Narula K. *Asia in the Arctic. Narratives, Perspectives and Policies*. Singapore: Springer; 2016. 143 p.
15. Conley H. A., Pumphrey D. L., Toland T. M., David M. *Arctic economics in the 21st century. The benefits and costs of cold*. Washington: CSIS, 2013. 67 p.

Received 12 November, 2018

Information about authors:

Valerii D. Kantemirov – PhD (Engineering), Head of the Sector of Mineral Resources Quality Management, Institute of Mining UB RAS. E-mail: ukrkant@mail.ru
Roman S. Titov – scientific researcher, Sector of Mineral Resources Quality Management, Institute of Mining UB RAS. E-mail: ukrigd15@mail.ru
Andrei M. Iakovlev – scientific researcher, Sector of Mineral Resources Quality Management, Institute of Mining UB RAS. E-mail: ukrigd15@mail.ru

Для цитирования: Кантемиров В. Д., Титов Р. С., Яковлев А. М. Обоснование технологий освоения месторождений медноколчеданных руд в арктической зоне Урала // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 3. С. 6–14. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-6-14
For citation: Kantemirov V. D., Titov R. S., Iakovlev A. M. Substantiating the technologies of copper sulphide ore deposits exploitation in the Arctic zone of the Urals. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 3: 6–14 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-6-14

УДК 622.322.8 DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-15-21

Развитие средств механизированной добычи калийных руд

Шишлянников Д. И.[1]*, Максимов А. Б.[1]
[1] Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия
e-mail: 4varjag@mail.ru

Реферат

Введение. *Актуальной является задача выявления основных тенденций развития средств механизированной добычи калийных руд, применяемых в условиях соляных месторождений России и стран СНГ.*

Методология исследования. *Выполнен анализ тенденций совершенствования проходческо-очистных комбайнов для добычи калийно-магниевых солей. Приведены сведения об основных этапах развития проходческо-очистных комбайнов, применяемых при подземной добыче калийно-магниевых солей на рудниках Верхнекамского месторождения. Показано, что первые образцы выемочных машин выполнялись с шагающим ходовым оборудованием и роторными исполнительными органами, реализующими режуще-скалывающий способ разрушения калийного массива. Вследствие значительной динамической нагруженности приводов главных исполнительных органов и низких значений технической производительности данные машины были заменены на комбайны с пространственными планетарно-дисковыми исполнительными органами и гусеничным ходовым оборудованием. Описана конструкция комбайна ПКГ-1 (проходческий комбайн конструкции Я. Я. Гуменника). Приведены данные по проходческо-очистным комбайнам «Караганда-7/15». Изложена информация о достоинствах и недостатках комбайнов с планетарно-дисковыми исполнительными органами. Показаны этапы развития отечественных проходческо-очистных комбайнов «Урал». Выполнен анализ технических решений, применяемых в конструкциях зарубежных выемочных машин для добычи калийных руд. Приведены данные о результатах опытно-промышленной эксплуатации комбайнов 900А «Мариетта» производства компании Sandvik на рудниках Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей.*

Результаты исследования. *Определены основные тенденции развития современных проходческо-очистных комбайнов для добычи калийных руд.*

Выводы. *Показано, что проходческо-очистные комбайны «Урал» являются наиболее адаптированными добычными машинами для горно-геологических и технических условий калийных рудников России и стран СНГ.*

Ключевые слова: *проходческо-очистной комбайн; калийная руда; этапы развития; анализ технических решений; тенденции развития.*

Введение. Современная технология добычи калийных солей в России базируется на применении проходческо-очистных комбайновых комплексов при камерной системе отработки месторождений. Принцип действия выемочных машин, входящих в составы комплексов, основан на механическом отделении калийной руды от массива резанием. Данный способ в обозримом будущем останется приоритетным для подземной добычи калийных солей, так как обеспечивает наименьшие удельные энергозатраты по сравнению с другими известными на сегодняшний день способами разрушения калийного массива [1].

На предприятиях России, осуществляющих добычу калийной руды подземным способом, эксплуатируются выемочные машины как отечественного, так и зарубежного производства. Многообразие моделей комбайнов обусловливает актуальность задачи выявления и анализа основных тенденций развития средств механизированной добычи калийных руд, применяемых в условиях соляных месторождений России и стран СНГ.

Методология исследования: анализ опыта горнодобывающих и машиностроительных компаний. Развитие механизированной проходки выработок

в калийных рудниках Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВМКМС) началось в послевоенные годы, после пуска в работу на Соликамском руднике трофейной штрекопроходческой машины производства немецкой фирмы «Шмидт-Кранц». Этот комбайн проходил выработку круглого сечения диаметром 3 м с углами наклона 5–8°, был оборудован исполнительным органом бурового типа в виде трехлучевой коронки и подающим устройством шагающего типа. Опыт использования этого комбайна показал, что с его помощью удалось значительно повысить темпы проходки горных выработок и снизить стоимость проходки. Результаты эксплуатации этого комбайна послужили толчком к началу поисково-конструкторских работ по созданию отечественных проходческо-очистных комбайнов с фронтальными исполнительными органами, предназначенными для валовой (сплошной) выемки мощных пластов [2].

Первым отечественным комбайном, внедренным на рудниках ВМКМС, стал проходческо-очистной комбайн ШБМ-2, разработанный в институте «Сибгипрогормаш» (г. Новосибирск) и выпускавшийся Ясиноватским машиностроительным заводом. Конструкция комбайнов ШБМ-2 включала рабочий орган буроскалывающего типа, ковшовый грузчик, две бермовые фрезы, шагающий механизм перемещения, ленточный конвейер, огораживающий щит, пульт управления и другие вспомогательные узлы. Техническая производительность комбайнов ШБМ-2 была сравнительно низкой и составляла $Q_т$ = 1,5 т/мин. Отличительными особенностями комбайна ШБМ-2 (и его модернизации ШБМ-3) была простота, надежность и долговечность конструкции. К 1972 г. общее количество комбайнов типа ШБМ, эксплуатируемых на рудниках Верхнекамского и Старобинского месторождений, составляло около 70 ед.

С учетом результатов эксплуатации и устранения недостатков комбайнов типа ШБМ конструкторами института «Гипроуглемаш» был разработан проходческо-очистной комбайн ПК-8. Образец комбайна прошел опытно-промышленные испытания на руднике БКПРУ-1 ВМКМС в 1965 г., после чего промышленное производство комбайнов было освоено на Ясиноватском машиностроительном заводе. Применение в конструкции комбайна гусеничного ходового оборудования позволило существенно сократить затраты времени на отвод комбайна из очистной камеры и его зарубку.

Конструкция исполнительного органа на первых образцах комбайна ПК-8 была выполнена по типу комбайна ШБМ и предусматривала режуще-скалывающий способ разрушения забоя. Данный способ разрушения калийного массива обусловливал возникновение значительных динамических составляющих нагрузок на приводах исполнительного органа, что существенно влияло на межремонтный период комбайна и ограничивало его техническую производительность ($Q_т$ = 2 т/мин). В 1971 г. режуще-скалывающий орган комбайна ПК-8 был заменен на орган со сплошным резанием и комбайн получил шифр ПК-8М. Последующая модификация комбайнов (модернизировано гидрооборудование, ряд основных узлов и увеличена техническая производительность до $Q_т$ = 4 т/мин) получила шифр ПК-8МА. В настоящее время комбайн ПК-8МА под шифром ПКС-8 выпускается Солигорским институтом проблем ресурсосбережения с опытным производством (г. Солигорск, Белоруссия) [2, 3].

Наряду с использованием комбайнов, оснащенных исполнительными органами сплошного действия, предпринимались попытки внедрения добычных машин со стреловидными и барабанными исполнительными органами, обеспечивающими селективную выемку соляных пород. Неудовлетворительные результаты опытно-промышленной эксплуатации данных машин были обусловлены сложностью обеспечения поперечной устойчивости и низкой технической производительностью комбайнов [4].

Первый проходческий комбайн в СССР с пространственным планетарным исполнительным органом и гусеничным ходовым оборудованием ПКГ-1 был разработан Я. Я. Гуменником. Экспериментальный образец комбайна ПКГ-1 изготовлен и испытан в 1953 г. на шахте «Байдаевская» треста «Куйбышевуголь» в Кузбассе. Впоследствии специалистами Государственного проектно-конструкторского и экспериментального института угольного машиностроения «Гипроуглемаш» в 1954–1955 гг. разработана усовершенствованная конструкция комбайна ПКГ-1, получившая название ПКГ-2. Небольшая партия этих машин была изготовлена Малаховским экспериментальным заводом (Московская обл.). В 1959 г. комбайн ПКГ-2 модернизирован и получил обозначение ПКГ-3. Именно в конструкции комбайнов Я. Я. Гуменника было впервые реализовано основное преимущество пространственных планетарно-дисковых исполнительных органов: взаимодействие с забоем как можно меньшего числа инструментов и сосредоточение на них всей мощности приводов и всего напорного усилия [5, 6].

Проектно-конструкторская работа по совершенствованию комбайна ПКГ-3 специалистами института «Гипроуглемаш» привела к созданию проходческо-очистного комбайна «Караганда-7/15» и его модификаций 7/15С и 7/15М, предназначенных для добычи каменной соли и калийных руд.

Комбайн «Караганда-7/15» (7/15С и 7/15М) состоял из планетарно-дискового исполнительного органа с механизмом качания, бермовых фрез с отрезными барабанами, служащих для подрезки почвы и транспортировки руды к приемной части скребкового конвейера-грузчика, гусеничной ходовой части, щита ограждения и пультов управления [2–4]. Комбайн «Караганда-7/15С» (7/15М) серийно выпускался с 1969 г. В 1972 г. в ПО «Уралкалий» в промышленной эксплуатации находились 35 таких выемочных машин.

Комбайны типа «Урал» начали разрабатываться в институте «Гипроуглемаш» в период внедрения комбайнов «Караганда-7/15С» в 1970–1971 гг. Опытный образец комбайна модификации «Урал-20КС» был изготовлен в 1971 г. Копейским машиностроительным заводом им. С. М. Кирова. Серийное производство комбайнов «Урал-10КС» и «Урал-20КС» было освоено тем же заводом в 1976 г. [4].

В 1977–1980 гг. комбайны «Урал» были модернизированы и с 1981 г. начали выпускаться под обозначениями «Урал-10КСА» и «Урал-20КСА». В процессе модернизации удалось повысить надежность и долговечность комбайнов за счет увеличения установленной мощности приводов, доработки конструкции редукторов и гидросистемы. Кроме того, комбайны «Урал» оснастили регуляторами нагрузки электроприводов типа ПРИЗ. Всего в период с 1971 по 1989 г. был выпущен 281 комбайн модификации «Урал-20КС (КСА)». Единичные экземпляры этих машин продолжают эксплуатироваться на Украине [2, 3, 6].

В 1984 г. изготовлены образцы комбайнов «Урал-10А» и «Урал-20А», которые были дополнительно оснащены аппаратурой дистанционного управления (АДУ), лазерной установкой для контроля положения комбайна в очистной камере, устройствами защиты электродвигателей от перегрузки типа КОРД, аппаратурой обеспечения полуавтоматического режима работы комплекса *комбайн–бункер-перегружатель–самоходный вагон*. Производство комбайнов «Урал-20А» закончилось в 2004 г. Было выпущено 187 комбайнов модификации «Урал-20А», некоторые из которых продолжают успешно эксплуатироваться на рудниках России и Белоруссии [2].

Комбайн «Урал-20Р» является в настоящее время последней модификацией комбайнов типа «Урал-20». Опытные образцы проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р» были поставлены на рудники ВМКМС в 2001 г.

Комбайны «Урал-20Р» аналогичны по конструкции ранее выпускавшимся модификациям «Урал-20А» и «Урал-20КСА» и отличаются от предыдущих модифи-

каций конструкцией забурника, некоторыми геометрическими параметрами планетарно-дисковых исполнительных органов, редукторами с модернизированными подшипниковыми узлами и большими модулями зацепления зубчатых пар, большей установленной мощностью приводов породоразрушающих исполнительных органов, более совершенными узлами гидравлики и электрики. Все внесенные в конструкцию изменения позволили повысить максимальную техническую производительность комбайнов «Урал-20Р» по отбойке руды до 8 т/мин по сравнению с 6,4 т/мин для комбайнов «Урал-20А» [6, 7].

Многочисленные модернизации комбайнов «Урал-20» в основном обусловлены не совсем удачными техническими решениями по компоновке и комплектации исполнительных органов. В результате выполненных модернизаций компоновка планетарных исполнительных органов комбайна «Урал-20Р» оказалась точно такой, как у комбайнов «Урал-10КС» и «Урал-10А», главные исполнительные органы которых не подвергались модернизации.

За 42 года серийного производства Копейским машиностроительным заводом выпущено более 1000 комбайнов «Урал» различных модификаций. Комбайны «Урал» широко используются при разработке Старобинского месторождения калийных руд в Белоруссии, при добыче каменной (поваренной) соли на Соль-Илецком месторождении в Оренбургской области и Тыретьском месторождении в Иркутской области, на Артемовском месторождении в Донецкой области Украины. Семь комбайнов «Урал-20КС» («Урал-20КСА») были поставлены с 1976 по 1989 гг. на рудники «Бергбау», «Вера» и «Глюкауф» в ГДР, где эксплуатировались на добыче калийной руды и каменной соли. Комбайны «Урал-20Р» используются на Тюбегатанском месторождении в Республике Узбекистан, на Гарлыкском месторождении в Республике Туркменистан [8].

Породоразрушающие исполнительные органы и погрузочное оборудование комбайна «Урал-20Р» приводятся в действие от трехфазных асинхронных электродвигателей через механические трансмиссии. Привод механизма хода – гидравлический, обеспечивает бесступенчатое регулирование скорости подачи комбайна. Электрооборудование комбайна выполнено в рудничном взрывозащищенном и взрывобезопасном исполнении [7]. Аналогичные технические решения применялись в разное время при создании комбайнов «Вольмейер» (ФРГ), «Хаббегер» (Швейцария), «Атлас Копко FF260 – FF550» (Швеция) [6].

При добыче калийных руд в США, Канаде, странах Евросоюза широкое применение получили комбайны 2ВТ-6 фирмы «Джой», 426 и 526 фирмы «Гудмен», 1012АСД, 780А и 900А «Мариетта» концерна «Сандвик». Основным отличием современных зарубежных аналогов от отечественных комбайнов «Урал» является использование в их конструкциях исполнительных органов роторного типа, более высокая установленная мощность двигателей исполнительных органов, в то же время меньшее общее количество электродвигателей, что зачастую обусловливает лучшие показатели надежности приводов комбайнов [2, 4].

Например, комбайны для добычи калийно-магниевых руд 900А «Мариетта» имеют техническую производительность не менее 10 т/мин, что более чем на 25 % превосходит соответствующий показатель комбайнов «Урал-20Р» [9, 10]. При добыче менее крепких руд (предел прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж} < 27$ МПа) производительность комбайна может доходить до 20 т/мин.

Испытанный на рудниках ПАО «Уралкалий» комбайн 900А «Мариетта» (MF-320) производства концерна «Сандвик» [2, 9, 10] в сравнении с комбайном «Урал-20Р» показал следующие преимущества:

– масса 126 т против 100–110 т комбайна «Урал-20Р»;

– установленная мощность приводов породоразрушающих исполнительных органов 746 кВт (два электродвигателя) против 590 кВт комбайна «Урал-20Р» (шесть электродвигателей);

– радиальный вылет резцов составляет 48,5 мм, что позволяет обеспечить производительность более 10 т/мин;

– исполнительный орган имеет более простую конструкцию, что повышает надежность машины в целом, состоит из двух трехлучевых буровых коронок и верхнего и нижнего отбойных барабанов (комбайны «Урал-20Р» оснащаются планетарно-дисковыми исполнительными органами, бермовыми фрезами, шнеками и отбойным устройством, привод исполнительных органов включает сложные разветвленные трансмиссии);

– основная часть забоя разрушается резами концентрической формы с постоянными значениями шага резания и толщины стружки, что позволяет снизить удельные энергозатраты процесса разрушения калийного массива и уменьшить количество пылевидных классов в продуктах отбойки – отходов горного производства;

– в конструкциях редукторов исполнительных органов комбайнов 900А «Мариетта» (MF-320) отсутствуют конические передачи, что повышает наработку на отказ трансмиссий данных комбайнов в 1,5–2 раза по сравнению с комбайнами «Урал-20Р»;

– на комбайне 900А «Мариетта» применяется одноцепной скребковый конвейер с гидравлическим приводом, максимальная производительность которого составляет 24 т/мин (минимум в 2,5 раза превышает производительность конвейера комбайна «Урал-20Р);

– на комбайне 900А «Мариетта» применена ходовая часть с индивидуальным гидроприводом на каждую гусеничную тележку, что позволяет обеспечить значительные напорные усилия на забой и минимизировать проскальзывания гусениц друг относительно друга, характерные для дифференциального привода ходовой части комбайнов «Урал-20Р» ранних модификаций;

– комбайн 900А «Мариетта» (MF-320) оснащен современными системами автоматического управления, двусторонней системой радиосвязи, индикаторами и приборами наблюдения за состоянием всех рабочих процессов и систем, узлов и агрегатов [2, 9].

Следует, однако, отметить, что опытная эксплуатация комбайнов зарубежных фирм показала меньшую эффективность использования данных добычных машин, чем у отечественных аналогов. Иностранные проходческо-очистные комбайны сложны в обслуживании и ремонте; для заправки гидросистем необходимы специальные дорогостоящие рабочие жидкости; узлы отдельных систем плохо защищены от агрессивного воздействия атмосферы соляных рудников. Указанные факторы в сочетании со значительной стоимостью добычных машин и политикой экономических санкций, которые вынуждены поддерживать европейские и американские машиностроительные предприятия, обусловили отказ от широкого внедрения иностранных проходческо-очистных комбайнов на калийных рудниках России [11, 12].

Результаты исследования. На сегодняшний день в мировой и отечественной практике машиностроения для калийных добывающих предприятий основными тенденциями являются:

– увеличение массы и установленной мощности приводов исполнительных органов выемочных комбайнов, так как более массивная и мощная машина, как правило, обеспечивает большую производительность;

– совершенствование элементов гидропривода и гусеничной ходовой части, что в сочетании с увеличенной массой комбайна позволяет повысить напорные усилия при подаче выемочной машины на забой;

– разрушение массивов стружками большого сечения с рациональными заданными параметрами шага резания и толщины стружки, что позволяет увеличить

энергоэффективность работы выемочных машин и уменьшить количество пылевидных классов в продуктах отбойки – отходов горного производства;

– упрощение кинематических схем механических трансмиссий приводов исполнительных органов, что позволяет повысить надежность комбайнов;

– внедрение средств автоматического и дистанционного управления, что позволяет обеспечить безопасное и эффективное использование выемочной машины.

Выводы. Анализ данных литературных источников, отображающих опыт отечественных и зарубежных машиностроительных компаний, а также отзывов инженерно-технических сотрудников горнодобывающих предприятий позволяет сделать вывод о том, что проходческо-очистные комбайны «Урал» являются наиболее адаптированными добычными машинами для горно-геологических и технических условий калийных рудников России и стран СНГ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Shishlyannikov D. I., Chekmasov N. V., Trifanov M. G., Ivanov S. L., Zvonarev I. E. Substantiation of the rational method to control the operating and technical-condition parameters of a heading-and-winning machine for potash mines // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2015. No. 44 (3). P. 283–287.

2. Старков Л. И., Земсков А. Н., Кондрашев П. И. Развитие механизированной разработки калийных руд. Пермь: ПГТУ, 2007. 522 с.

3. Пинский В. Л. Развитие техники и технологии добычи калийных руд в России // Горный журнал. 2007. № 8. С. 13–17.

4. Бреннер В. А. [и др.]. Режимы работы комбайнов для добычи калийных руд. М.: Недра, 1978. 216 с.

5. Архангельский А. С. Проходческий комбайн конструкции Якова Гуменника. М.: Углетехиздат, 1956. 57 с.

6. Семенов В. В. Обоснование и выбор параметров исполнительных органов проходческо-очистных комбайнов нового поколения для добычи калийных руд: дис. … канд. техн. наук. Тула, 2011. 219 с.

7. Комбайн проходческо-очистной «Урал-20Р»: руководство по эксплуатации. Копейск: КМЗ, 2006. 279 с.

8. Уголкин С. И., Петров В. П. Организация технического сервиса горно-шахтного оборудования производства ОАО «КМЗ» // Горное оборудование и электромеханика. 2008. № 8. С. 50–53.

9. Компания Sandvik Mining and Construction подписала контракт с ОАО «Уралкалий» о поставке горных комбайнов. URL: http://mining-media.ru/ru/article/podzemmash/273-kompaniya-sandvik-mining-and-construction-podpisala-kontrakt-s-oao-uralkalij-o-postavke-gornykh-kombajnov (дата обращения 12.12.2018).

10. Мариетта для «Уралкалия». URL: https://www.newsko.ru/articles/nk-301520.html (дата обращения 12.12.2018).

11. Zvonarev I. E., Shishlyannikov D. I. Efficiency improvement of loading of potassium ore by means of "Ural-20R" heading-and-winning machine // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. No. 87 (2) / 022055.

12. Trifanov G. D., Shishlyannikov D. I., Lavrenko S. A. Assessment of URAL-20R machine use efficiency while developing potash salt fields // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. No. 11 (9). P. 5722–5726.

Поступила в редакцию 14 декабря 2018 года

Сведения об авторах:

Шишлянников Дмитрий Игоревич – кандидат технических наук, доцент кафедры горной электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: 4varjag@mail.ru

Максимов Алексей Борисович – аспирант кафедры горной электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: maksimov.aleksey.9858975@gmail.com

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-15-21

The development of potash ore mechanized extraction

Dmitrii I. Shishlyannikov[1], Aleksei B. Maksimov[1]

[1] Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia.

Abstract

Introduction. *The task of identifying the main trends in the development of potassium ores mechanized mining means used in salt deposits of Russia and CIS countries is relevant.*

Research methodology. *The data on the main stages of development of heading-and-winning combines used in underground mining of potassium and magnesium salts in the mines of the Upper Kama (Verkhnekamskoe) deposit were presented. It is shown that the first samples of excavating machines were designed with walking running equipment and rotary actuators, implementing the cutting-chipping method of potassium massif destruction. Due to the significant dynamic loading of main executive bodies' drives and low values of technical performance, these machines were replaced by combines with spatial planetary disk actuators and crawler running equipment. The design of the harvester PKG-1 (roadheader design by Ia. Ia. Gumennik) was described. Data on heading-and-winning combines Karaganda-7/15 were given. The information about advantages and disadvantages of combines with planetary-disk executive bodies was presented. Stages of development of domestic heading-and-winning combines Ural were shown. The analysis of technical solutions used in the construction of foreign excavating machines for potash ores extraction was carried out. The data on the results of pilot operation of 900A Marietta combines produced by Sandvik in the mines of the Verkhnekamskoye deposit of potassium and magnesium salts are presented.*
Research results. *The main trends in the development of modern heading-and-winning combines for potash ores extraction are determined.*
Conclusion. *It is proved that heading-and-winning combines Ural are the most adapted mining machines for geological and technical conditions of potash mines of Russia and CIS countries.*

Key words: *heading-and-winning combine; potash ore; stages of development; analysis of technical solutions; development trends.*

REFERENCES

1. Shishlyannikov D. I., Chekmasov N. V., Trifanov M. G., Ivanov S. L., Zvonarev I. E. Substantiation of the rational method to control the operating and technical-condition parameters of a heading-and-winning machine for potash mines. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2015; 44 (3): 283–287.
2. Starkov L. I., Zemskov A. N., Kondrashev P. I. *The evolution of mechanized development of potash ores*. Perm: PSTU Publishing; 2007. (In Russ.)
3. Pinskii V. L. The development of machinery and the technology of potash ore extraction in Russia. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2007; 8: 13–17. (In Russ.)
4. Brenner V. A. et al. *Operation modes of combine harvesters for potash ore extraction*. Moscow: Nedra Publishing; 1978. (In Russ.)
5. Arkhangelskii A. S. *Roadheader design by Iakov Gumennik*. Moscow: Ugletekhizdat Publishing; 1956. (In Russ.)
6. Semenov V. V. *Rationale for the choice of parameters of the executive bodies of new generation heading-and-winning combines for potash ore extraction*. PhD (engineering) diss. Tula; 2011. (In Russ.)
7. *Heading-and-winning combine Ural-20R. User manual*. Kopeysk: KMZ Publishing; 2006. (In Russ.)
8. Ugolkin S. I., Petrov V. P. Organization of technical service for JSC KMZ mining equipment. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics*. 2008; 8: 50–53. (In Russ.)
9. Mining-media. *Sandvik Mining and Construction has signed a contract with Uralkali for the supply of mining combines*. Available from: http://mining-media.ru/ru/article/podzemmash/273-kompaniya-sandvik-mining-and-construction-podpisala-kontrakt-s-oao-uralkalij-o-postavke-gornykh-kombajnov [Accessed 12th December 2018]. (In Russ.)
10. Newsko. *Marietta for the Uralkali*. Available from: https://www.newsko.ru/articles/nk-301520.html [Accessed 12th December 2018]. (In Russ.)
11. Zvonarev I. E., Shishlyannikov D. I. Efficiency improvement of loading of potassium ore by means of "Ural-20R" heading-and-winning machine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017; 87 (2): 022055.
12. Trifanov G. D., Shishlyannikov D. I., Lavrenko S. A. Assessment of Ural-20R machine use efficiency while developing potash salt fields. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016; 11 (9): 5722–5726.

Received 14 December, 2018

Information about authors:

Dmitrii I. Shishlyannikov – PhD (Engineering), associate professor of the Mining Electromechanics Department, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: 4varjag@mail.ru
Aleksei B. Maksimov – PhD student of the Mining Electromechanics Department, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: maksimov.aleksey.9858975@gmail.com

Для цитирования: Шишлянников Д. И., Максимов А. Б. Развитие средств механизированной добычи калийных руд // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 3. С. 15–21. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-15-21
For citation: Shishliannikov D. I., Maksimov A. B. The development of potash ore mechanized extraction. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 3: 15–21 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-15-21

УДК 622.83+539.3 DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-22-29

Integral equations revealing ill-posed problems in geomechanics

Valerii E. Mirenkov[1]
[1] Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Russia
e-mail: mirenkov@misd.nsc.ru

Abstract

Introduction. *The class of ill-posed problems in geomechanics is very wide because of the lack of efficient numerical methods and a desire to obtain analytical solutions.*

Research aim. *The theory of problems in mathematical physics intended to consider infinite bodies using the class of Cauchy problems with the Cauchy conditions or Cauchy data that vanish at infinity. The violation of this conditions leads to ill-posed problems. The research aims to propose a system of integral equations which will make it possible to reduce the level of assumptions when solving some problems of geomechanics.*

Methodology. *The correctness of common solutions to a number of geomechanical problems has been analyzed. This class of problems includes rock mechanics problems considering a half-plane, a plane with holes, and a space with a plane. In these cases, it is required to solve an auxiliary problem by Mikhlin and Kristianovich.*

Results. *With the numerical methods, for example, finite element method, and the commercial programs at hand, another extreme appears. In calculation of stress-strain state in surrounding rock around underground excavations researches used to pose boundary conditions without concern about their compatibility. In the meanwhile, the requirements of the theory of problems in mathematical physics must be satisfied. The analysis shows that the new extreme has even increased the number of ill-posed problems.*

Conclusions. *This study puts forward the integral equations that allow withdrawing ill-posed problems before solving and discusses the class of such problems to solve the problems of rock mechanics as well.*

Key words: *underground excavation; displacements; Cauchy problem; boundary conditions; the correctness of the solution.*

Introduction. Rock mechanics is aimed at studying the behavior of a massif with excavations and create methods to calculate stresses and displacements in order to use them with confidence when improving old and creating new technological solutions in mineral production. Currently, the finite element method (FEM) is the basic method of estimating rock deformation around excavations; it is implemented by a number of commercial software packages used in calculation. The formal use of such programs by itself excludes the analysis of calculation domain, calculation practicability, and the search for optimum simulation of the event in the rock massif with an excavation. As a rule, in these conditions, ill-posed problems are solved. The presence of angular points at the contour of an excavation leads to infinite stresses which can be corrected neither by auxiliary finite element division nor by FEM improvement. Arbitrary assertions for boundary conditions (absolutely stiff stratum, ideal glide along the contacts, and solid cohesion, etc.) are not controlled in the process of calculation and distort the result.

Works [1, 2] refer to an absolutely stiff stratum with ideal glide along the contact of a stratum with rock. In fact, the problem is reduced to solution for rectilinear finite mathematical cut, which is incorrect, as it is shown in [3]. In [2], the formulation of fracture stress in face vicinity leads to logarithmic singularities in displacements and is not accepted in the foundations of the elasticity theory.

Research aim. In a virgin rock massif everything is well established: stresses are fixed and displacements are identically zero. When excavation was made, changes in stresses and displacements started to come only from the excavation and it created auxiliary problem of determining, in particular, stresses and displacements vanishing at infinity. Let us accept, according to [1–8], the source field of compressive stresses in a virgin massif in the center of a future excavation as $\sigma_y = \gamma H$, $\sigma_x = \lambda\gamma H$ – vertical and horizontal constituents correspondingly, where H – excavation laying depth; γ – specific weight of rock; λ – horizontal stress. If (conventionally) at the site of a future excavation the rock is replaced by the action of normal and shearing stresses and σ_y and σ_x are projected onto the contour, nothing will be changed in the massif. An important point is that it is impossible to simply remove these shearing stresses σ_y and σ_x projected onto the future contour. Let us take the same stresses but with "minus" and apply to the contour of a hole, similar to the future excavation, at an auxiliary plane and calculate the stresses and displacements in the vicinity, in that case, naturally, they will be converging to zero as they will be moving away from the hole. This last problem is called auxiliary [1–3]; having superimposed it on the plane which simulates the rock massif with a future excavation we will develop zero normal and shearing stresses at the contour. It could be argued that having removed compressive stresses from the contour of an excavation we will develop zero normal and shearing stresses at the contour.

Posing, following Kolosov–Muschelishvili [9], boundary conditions for the first and second basic problems of the elasticity theory and excluding complex potentials, we will deduce the system of singular integral equations connecting boundary values of stress and displacement components in the form:

$$\begin{gathered} f(t_0) + 2\mu g(t_0) = \frac{1}{\pi i}\int_{\Gamma} \frac{f(t) + 2\mu g(t)}{t - t_0}\, dt; \\ \kappa\overline{f(t_0)} - 2\mu\overline{g(t_0)} = \frac{1}{\pi i}\int_{\Gamma} \frac{\kappa\overline{f(t)} - 2\mu\overline{g(t)}}{t - t_0}\, dt + \int_{\Gamma}\left[f(t) + 2\mu g(t)\right] d\,\frac{\overline{t} - \overline{t_0}}{t - t_0}, \end{gathered} \tag{1}$$

where $\kappa = 3 - 4w$; $\mu = E[2(1 + w)]^{-1}$; E – Young's modulus; w – Poisson's ratio,

$$f(t) = i\int_0^t \left(X_n + iY_n\right) ds, \tag{2}$$

X_n, Y_n – the components of stresses in the direction of x-axis and y-axis; $g = u + iv$; u, v – the components of displacements in the direction of x-axis and y-axis; i – unit imaginary number, bar above the function denotes the complex conjugate value; Γ – the boundary of the domain under consideration; t_0 – point affix of Γ boundary. A system of equations (1), (2) characterizes the three problems of the elasticity theory on a consistent and simultaneous basis; they can be applied in one variation or another. It should be noted that the derivation of the system (1), (2) didn't use the solution of the third basic (miscellaneous) problem which thus is not independent and is considered as a special case of a solution for the first and second basic problems of the elasticity theory; or a system of equations is instantly built using (1), (2) for any miscellaneous problem.

Before referring to FEM, in order to eliminate errors, it is necessary to write the system (1), (2) for the domain under consideration and a priori posed boundary

conditions and check the deduced system for degeneracy. If Fredholm equations of second kind are deduced, then it is possible to proceed to their numerical calculation, i. e. rough calculation of integrals entering into the equation. An important thing here is that the required functions within (1), (2) are solved by quadratures. If equations (or an equation) refer to Fredholm equations of first kind,it is necessary to make a step back in the process of posing boundary conditions and change conditions which have led to degeneracy.

Methodology. There are three types of inverse problems for elastic structures or their elastic parts: inverse problems of mechanical characteristics determination, boundary inverse problems of stress identification, and geometrical inverse problems of internal flaws fixing in elastic body. The analysis of these problems, which are assigned to ill-posed problems, provides for the use of auxiliary experimental data. Inverse problems division into three groups is rather conventional. Let us focus, for instance, on the third type, at the realization of which it is necessary to assume that mechanical characteristics of the body under consideration are defined correctly and the posed boundary conditions are fulfilled correctly – in fact, there is a need to solve the problems of the three types. The introduced correct system of equations (1), (2) allows to write the solution for displacement components in quadratures and for stress components in the same fashion, which makes it possible to exclude the process of regularization and propose the method of problem reduction to the procedure of successive approximations converging to the correct solution for material's elastic constants, boundary conditions, and the geometry of weakening by their variation. The number of successive approximations is defined in advance by the fixed precision of calculations and as their number increases the distinction between approximate and precise solution reduces and the solution hovers around precise, i. e. the process is convergent.

Thus, the use of experimental data determined with an error and continuous medium discretization at any type of numerical calculation causes errors into the inverse operator; a priori assumptions about the character of the structure's deformation (absolutely solid body, ideal glide, sudden change in displacements, the violation of conformity in the finite number of points, etc.) cause errors in boundary conditions when posing a problem and expand the class of inverse problems. All such inverse problems are ill-posed, i. e. their solutions may be lacking, not exclusive, or unstable (observed data slight variation may correspond to large change in required data), but there is a general requirement – a need to overcome ill-posedness through regularization [10, 11] or through precise equations derivation which connect boundary conditions of stress and displacement components, describe the process of deformation within the limits of the chosen model, and exclude regularization, i. e. the system (1), (2) should be used.

Results. By way of a particular example of an ill-posed problem about boundary conditions identification, let us consider the problem of an elastic punch with a horizontal bottom indentation into an elastic half-plane, which was simplified in [9] to the condition of absolutely solid punch indented into the half-plane with contact cohesion. "Correct" solution to this problem for normal and shearing contact stresses correspondingly is introduced in [9] and is as follows:

$$P(t)=\frac{P_0}{2\pi\sqrt{\ell^2-t^2}}\frac{1+\kappa}{\sqrt{\kappa}}\cos\left[\frac{\ell_n\kappa}{2\pi}\ell_n\frac{\ell+t}{\ell-t}\right];$$
$$T(t)=\frac{P_0}{2\pi\sqrt{\ell^2-t^2}}\frac{1+\kappa}{\sqrt{\kappa}}\sin\left[\frac{\ell_n\kappa}{2\pi}\ell_n\frac{\ell+t}{\ell-t}\right], \quad (3)$$

where P_0 – the resultant of forces pressing the punch; 2ℓ – the length of the punch; $\kappa = 3 - 4w$, w – Poisson's ratio. The accurate system of singular integral equations

connecting the components of stresses $\sigma_y(x)$ and $\tau(x)$ and displacements $u(x)$ and $\nu(x)$ on the border of the half-plane is deduced from (1), (2) as

$$\begin{aligned} 2\mu u'(x) &= a\sigma_y(x) + в\int_{-i}^{i}\frac{\tau(t)}{t-x}dt; \\ 2\mu v'(x) &= -a\tau(x) + в\int_{-i}^{i}\frac{\sigma_y(t)}{t-x}dt, \end{aligned} \tag{4}$$

where μ, a, $в$ characterize the medium of the half-plane; $u'(x)$, $v'(x)$ – the x-derivatives of displacement components; $\tau(x)$, $\sigma_y(x)$ – shearing and normal stresses for $|x| \le \ell$. In assumptions of [9], system (4) has got left parts equal to zero, and it reduces to the singular equation system which requires regularization, while regularization is not taken into account, the solution to this problem (3) is unambiguous but incorrect because there is no continuous dependence on the source data and the solution has no limit at approaching to the angular point under the punch. The solution of the ill-posed problem in the theory of elasticity is of no practical value.

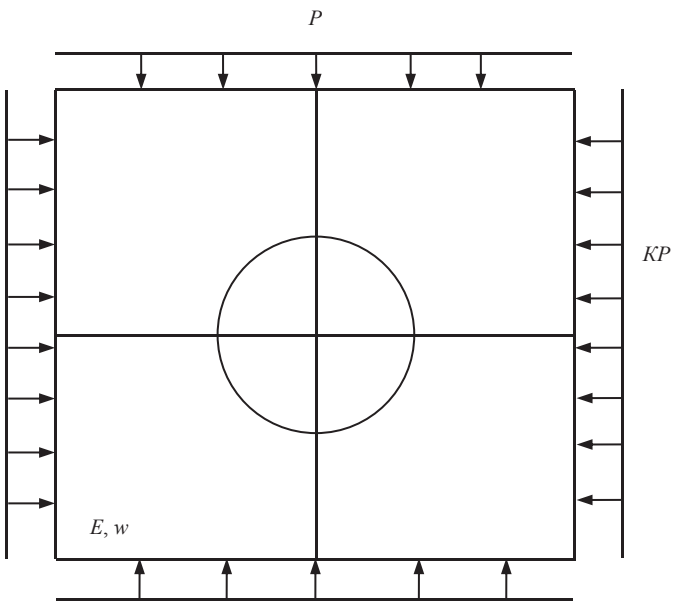


Fig. 1. A calculation scheme determining deformation around a circular excavation taken from [8]
Рис. 1. Расчетная схема по определению деформирования около круговой выработки, заимствованная из [8]

Thus, the system of equations (1), (2) allows considering not only linear but also inverse problems on a consistent and simultaneous basis, reduce the requirements for overdetermination, determine the degree of ill-posedness when the assumptions like “let us assume that” are used, etc., requiring regularization in certain cases. The introduced precise system of equations (1), (2) allows to write to solution for displacement components in quadratures and for stress components in the same fashion, which makes it possible to exclude the process of regularization and propose the method of problem reduction to the procedure of successive approximations converging to correct solution for elastic constants of boundary conditions, and geometry of weakening by their variation.

Research works connected with geomechanical substantiation of technology introduce calculations of stress-strained state whose boundary conditions are ill-posed. By way of example, let us focus on work [4, 5] where boundary conditions are posed groundlessly. In fact, if at the upper boundary of a computational domain constant normal stresses are developed which are determined by the laying depth, then at the lower boundary the condition of zero vertical displacement and absent shearing stresses is laid. For whatever reason at this boundary and at the upper boundary conditions are not laid in a similar way, i. e. in stresses miscellaneous problem is considered instead of the first basic problem. Similar mixed problem is posed for side boundaries as well, and it is even more incomprehensible why it is assumed. The same situation is observed

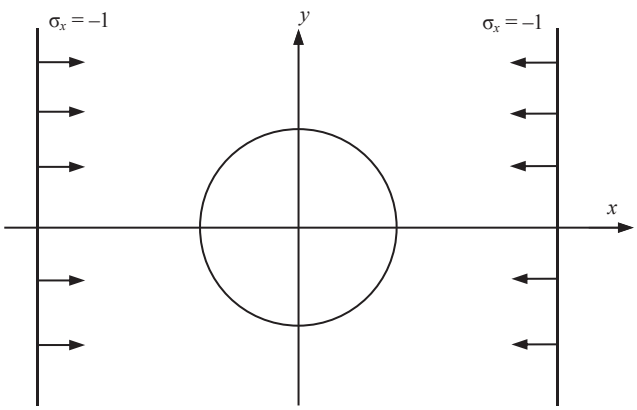


Fig. 2. A calculation scheme of a model problem for a plane with a circular hole subject to infinite compression in *x*-direction
Рис. 2. Расчетная схема модельной задачи для плоскости с круговым отверстием, сжимаемой на бесконечности в направлении оси *x*

in works [7, 8] as well, where unlike [4, 5], first basic problem is being solved but the ill-posedness remains the same. Fig. 1 introduces a calculation scheme of an excavation taken from [8], where *KP* – horizontal force. Classic formulations of similar problems are introduced in [1–3] and reduce to auxiliary problem solution where vertical and horizontal normal stresses are applied at the contour of the excavation taking place in the center of the future excavation, but with the reversed sign; or the latter stresses are posed at the boundaries of the computational domain [4, 5]. FEM where boundary conditions are posed at the boundary of a computational domain (fig. 1) [4, 5, 7, 8] can be regarded “classic”, i. e. frequent for massif stress-strained state calculation, which is unacceptable according to the general theory of equations of mathematical physics [6].

The class of problems under consideration under ill-posed boundary conditions causes large displacements at the boundary of the computational domain which are not observes in practice and that is why an auxiliary problem should be considered, when displacements and stresses reduce as they move away from the excavation. According to [4, 5], excavation shifts as a solid whole towards the boundary where normal displacements are equal to zero. The models of calculation and rock deformation do not coincide, the symmetry is broken.

The class of ill-posed problems if rather big. Let us consider the solution about the plane with a circular hole compressed at infinity by continuous forces. Elastic plane is weakened by the circular excavation with radius *R* and is compressed at infinity by *P* force in the direction of *x*-axis. Proceeding to dimensionless quantities let us attribute quantities

possessing length dimension to R, and quantities possessing stress dimension – to P (fig. 2). Then, the solution to this problem in polar coordinates may have the form of [9]

for stress components:

$$\sigma_r = -\frac{1}{2}\left(1-\frac{1}{r^2}\right)-\frac{1}{2}\left(1-\frac{4}{r^2}+\frac{3}{r^2}\right)\cos 2\theta;$$

$$\sigma_\theta = -\frac{1}{2}\left(1+\frac{1}{r^2}\right)+\frac{1}{2}\left(1+\frac{3}{r^2}\right)\cos 2\theta;$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2}\left(1+\frac{2}{r^2}-\frac{3}{r^2}\right)\sin 2\theta,$$

for displacement components:

$$\nu_r = \frac{1}{8\mu r}\left\{(\kappa-1)r^2+2\left(\kappa+1+r^2-\frac{1}{r^2}\right)\cos 2\theta\right\};$$

$$\nu_\theta = -\frac{1}{4\mu r}\left\{\left(\kappa-1+r^2+\frac{1}{r^2}\right)\sin 2\theta\right\}, \qquad (5)$$

where $\kappa = 3 - 4w$; w – Poisson's ratio; $\mu = \dfrac{E}{2(1+w)}$; E – Young's modulus; r, θ – radius and angle in the polar coordinates system.

The solution is analytical and unambiguous. There is a question: which technical problem is modeled by this solution? Let us focus only on the problems of rock mechanics. Circular excavation in a massif of rock is characterized by displacements and stresses decay as they move away from the excavation – it is a well known and proved fact. Consequently, it is incorrect to use the analytical solution to simulate the stress-strained state. As it was proposed in [1–3], an auxiliary problem should be considered and displacements and stresses should be calculated taking into account the fact that in a virgin massif of rock displacements are identically zero, while in order to obtain total stresses it is sufficient to add the source field of stresses. It should be noted that the definition of the stress-strained state in [4, 5, 7, 8, 12, 13] and other similar works is incorrect.

In all problems of mathematical physics it is not necessarily that a confined body should be considered. It is possible to consider both infinite line, plane, or space, then edge and boundary conditions lose significance. The problem without such conditions is called Cauchy problem with initial conditions, or Cauchy data [6]. There is a number of solutions to the problems for an infinite domain, when non-zero boundary conditions were posed at infinity. This class of problems is assigned to ill-posed, although in a number of cases an unambiguous solution was acquired, the notion of continuous dependence of the solution on the source data was violated. In fact, if in an arbitrary finite domain of an infinite body Cauchy data were posed, they vanish at infinity, i. e. continuously reduce to zero. Otherwise, some components of body deformation take infinitely high values at infinity. The finite elements method considers the finite domain of calculation and as the calculation domain increases, Cauchy data tend to infinity, i. e. the accepted assertion is ill-posed and the obtained calculation is of neither mathematical nor physical sense.

It follows from fig. 2 that at infinity to the left, the main vector of compressive stresses σ_x is infinitely large, the same is with the right one, but in total the main vector

is equal to zero. Under the action of stresses σ_x at infinity (fig. 2), infinite displacements will occur in the direction of *x*-axis. According to (5), there are displacements in the direction of *y*-axis as well growing proportionally to their moving away from the excavation towards the infinity, but with the reverse sign. It is hard to find a real facility which could be simulated by the situation presented at fig. 2, i. e. the analytical solution exists but there is nothing to simulate using it in a real excavation, which testifies to its ill-posedness.

Conclusions. Thus, the work proposes the system of integral equations allowing to solve any of the three basic problems, considering not only linear but also inverse problems on a consistent and simultaneous basis, reduce the requirements for overdetermination, determine the degree of ill-posedness at their formulation when the assumptions like "let us assume that" are used, etc., requiring regularization in certain cases.

The ways of calculating stresses and displacements around excavations using the finite element method are examined, their ill-posedness is stated, and the direction towards their correct solution is proposed.

The research has been carried out with funding from RFBR (project no. 18-05-00533).

REFERENCES

1. Mikhlin S. G. Stresses in rock mass above a coal seam. *Izvestiia AN SSSR. OTN = Proceedings of USSR Academy of Sciences. Engineering Sciences*. 1942; 7–8: 13–28. (In Russ.)

2. Barenblatt G. I., Khristianovich S. A. Roof caving in underground excavations. *Izvestiia AN SSSR. OTN = Proceedings of USSR Academy of Sciences. Engineering Sciences*. 1955; 11: 73–86. (In Russ.)

3. Mirenkov V. E. Ill-posed problems of geomechanics. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 2018; 3: 3–10. (In Russ.)

4. Neverov A. A. Geomechanical assessment of combination geotechnology for thick flat-dipping ore bodies. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 2014; 1: 115–125. (In Russ.)

5. Shaposhnik Iu. N., Neverov A. A., Neverov S. A., Nikolskii A. M. Assessment of influence of voids on phase II mining safety at Artemievsk deposit. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 2017; 3: 524–532. (In Russ.)

6. Sobolev S. L. *Equations of mathematical physics*. Moscow: Nauka Publishing; 1966. (In Russ.)

7. Alam A. K. M. Badrul, Niioka Masaki, Fujii Yoshiaki, Fukuda Daisuke, Kodama Jun-ichi. Effects of confining pressure on the permeability of three rock types under compression. *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci*. 2014; 65: 49–61.

8. Carranza-Torres C., Rysdahe B., Kasim M. On the elastic analysis of a circular lined tunnel considering the delayed installation of the support. *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci*. 2013; 61: 57–85.

9. Muskhelishvili N. I. *Some basic problems of the mathematical theory of elasticity*. Moscow: Nauka Publishing; 1966. (In Russ.)

10. Kolmogorov A. N. *Theory of information and theory of algorithms*. Moscow: Nauka, 1987. (In Russ.)

11. Tikhonov A. N., Arsenin V. Ia. *Methods of solution of ill-posed problems*. Moscow: Nauka Publishing; 1979. (In Russ.)

12. Wrobel M., Mishuris G. Hydraulic fracture revisited: Particle velocity based simulation. *Int. J. Engineering Sci*. 2015; 94: 23–58.

13. Detournoy E., Peirce A. On the moving boundary conditions for a hydraulic fracture. *Int. J. Engineering Sci*. 2014; 84: 147–155.

Received 10 December, 2018

Information about authors:

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

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-22-29

Интегральные уравнения, выявляющие некорректные формулировки задач геомеханики

Миренков В. Е.[1]

[1] Институт горного дела СО РАН, Новосибирск, Россия.

Реферат

Введение. *Класс некорректных задач в геомеханике очень широк, что связано с отсутствием эффективных численных методов и желанием получить аналитические решения.*

Цель работы. *Теория задач математической физики предполагала рассматривать неограниченные тела, выделяя класс задач Коши с начальными условиями, или данными Коши, исчезающими на бесконечности. Нарушение этого условия приводит к некорректным формулировкам задач. Цель работы – предложить систему интегральных уравнений, позволяющую ослабить уровень допущений при решении некоторых задач геомеханики.*

Методология. *Выполнен анализ корректности известных решений ряда задач геомеханики. В этот класс попадают задачи механики горных пород, рассматривающие полуплоскость, плоскость с отверстиями, пространство с плоскостью и, как следствие, возникает необходимость решения дополнительной задачи, согласно определениям Михлина, Христиановича.*

Результаты. *Появление численных методов, например метода конечных элементов, и наличие коммерческих программ привели к другой крайности. При расчете напряженно-деформированного состояния около горных выработок каждый исследователь формулировал свои граничные условия, не заботясь об их совместности. Однако требования теории задач математической физики должны быть выполнены. Анализ показывает, что эта новая крайность привела к увеличению числа некорректных задач.*

Выводы. *В работе предложены интегральные уравнения, позволяющие исключить некорректные задачи еще до решения, и рассмотрен класс таких задач, в том числе для решения проблем механики горных пород.*

Ключевые слова: *горная выработка; смещения; задача Коши; граничные условия; корректность решения.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михлин С. Г. О напряжениях в породе над угольным пластом // Известия АН СССР. ОТН. 1942. № 7–8. С. 13–28.

2. Баренблатт Г. И., Христианович С. А. Об обрушении кровли при горных выработках // Известия АН СССР. ОТН. 1955. № 11. С. 73–86.

3. Миренков В. Е. О некорректных задачах геомеханики // ФТПРПИ. 2018. № 3. С. 3–10.

4. Неверов А. А. Геомеханическая оценка комбинированной геотехнологии при отработке мощной пологой рудной залежи // ФТПРПИ. № 1. 2014. С. 119–131.

5. Шапошник Ю. Н., Неверов А. А., Неверов С. А., Никольский А. М. Оценка влияния накопившихся пустот на безопасность доработки Артемьевского месторождения // ФТПРПИ. 2017. № 3. С. 108–118.

6. Соболев С. Л. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1966. 444 с.

7. Badrul Alam A. K. M., Masaki Niioka, Yoshiaki Fujii, Daisuke Fukuda, Jun-ichi Kodama. Effects of confining pressure on the permeability of three rock types under compression // Int. J. of Rock Mech. and Mining Sciences. 2014. Vol. 65. P. 49–61.

8. Carranza-Torres C., Rysdahe B., Kasim M. On the elastic analysis of a circular lined tunnel considering the delayed installation of the support // Int. J. of Rock Mech. and Mining Sciences. 2013. Vol. 61. P. 57–85.

9. Мусхелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Наука, 1966. 708 с.

10. Колмогоров А. Н. Теория информации и теория алгоритмов. М.: Наука. 1987. 303 с.

11. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 386 с.

12. Wrobel M., Mishuris G. Hydraulic fracture revisited: particle velocity based simulation // Int. J. Engineering Sci. 2015. Vol. 94. P. 23–58.

13. Detournoy E., Peirce A. On the moving boundary conditions for a hydraulic fracture // Int. J. Engineering Sci. 2014. Vol. 84. P. 147–155.

Сведения об авторах:

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

Для цитирования: Миренков В. Е. Интегральные уравнения, выявляющие некорректные формулировки задач геомеханики // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 3. С. 22–29 (In Eng.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-22-29

For citation: Mirenkov V. E. Integral equations revealing ill-posed problems in geomechanics. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 3: 22–29. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-22-29

УДК 624.121.542 DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-30-38

3D geomechanical modeling as the basis for solving complex problems of potassium salt development safety

Iurii A. Kashnikov[1]*, Aleksei O. Ermashov[1], Olesia O. Lebedeva[1]
[1] Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia
e-mail: geotech@pstu.ru

Abstract

Introduction. *Rock mass and surface stress-strain state forecasting is considered a vital problem of mineral development. The problem is connected with displacement process negative impact on the state of the undermined surface and subsurface facilities as well as with water conducting crack formation in the waterproof strata (WPS).*

Research aim. *Rock displacement forecasting based on the 3D geomechanical model.*

Research methodology. *Upper Kama (Verkhnekamskoe) potassium salt deposit (VKMKS) stress-strain state calculations are based on the rheological model of saliferous rock deformation and failure. Analytical description of the model is based on viscoplasticity theory, and its numerical simulation is implemented by finite element method in ANSYS program. The estimate of crack propagation conditions in WPS is realized on the basis of both horizontal tensile deformations distribution (deformational criterion) and Drucker-Prager criterion distribution (force criterion).*

Results. *Presented model was used to solve particular mine and technical problems. The estimate of WPS disturbed state in the area of well no. 69 (SKRU-1) is made. The analysis of deformational processes in the area of interest allowed identifying five potential disturbed zones of WPS.*

Conclusions. Maximum crack propagation criterion is found in the area of local subsidence zone (block 125). Therefore, water conducting crack formation in WPS is most likely to be in this area.

Key words: *stress-strain state; rheological model; 3D geomechanical modeling; surface subsidence; ANSYS.*

Introduction. Rock mass stress-strain state forecasting is considered a vital problem of mineral development. The problem is connected with displacement process negative impact on the state of the undermined surface and subsurface facilities as well as with water conducting crack formation. The problem has gained ground in the recent decade after major accidents at Upper Kama (Verkhnekamskoe) potassium-magnesium salt deposit (VKMKS).

At present the choice of measures for surface facilities and structures protection from the harmful influence of mining at potassium-magnesium mines is made in accordance with the normative documents currently in force: *Directions for flood prevention in mines and undermined facilities protection at Upper Kama (Verkhnekamskoe) potassium-magnesium salt deposit, 2014. 130 p.; Methodological Recommendations to "Directions for flood prevention in mines and undermined facilities protection at Upper Kama (Verkhnekamskoe) potassium-magnesium salt deposit", 2014. 66 p*. The basic method of forecasting surface subsidence at VKMKS recommended by the Directions is the standard curve method. The given method is based on the multi-year instrumental observations. However, it reflects only surface displacements and deformations and does not take into account all the complexity of rheological processes taking place within the saliferous strata.

Research aim. In order to make more comprehensive and reliable forecast of rock mass displacement process it is essential to use 3D geomechanical models which are based on particular models of rock mechanics and reflect saliferous rock deformation

and failure processes. At that, the developed model of rock mechanics can be solved only with numerical methods, particularly the finite element method.

Methodology. The authors of the present research accepted the rheological model of saliferous rock deformation and failure as a basis for VKMKS salt massif stress-strain state calculations. The model allows to consider transient, steady-state, and progressive creep deformations separately and takes into account rock failure and softening when dilatancy occurs [1–3]. The model in use is based on the theory of viscoplastic flow. Increments of viscoplastic deformations are determined in a similar manner to the theory of plasticity through the scalar derivative Q – plasticity potential [4]:

$$\left\{d\varepsilon^{vp} / dt\right\} = \left\{\dot{\varepsilon}^{vp}\right\} = \begin{cases} 0 & \text{under } F \le 0; \\ \dfrac{1}{\eta} F\left\{\partial Q / \partial \sigma\right\} & \text{under } F > 0, \end{cases} \quad (1)$$

where F – flow function, $\dot{\varepsilon}^{vp}$ – viscoplastic deformations velocity.

Expression (1) is widely applied in rock mechanics and is called an equation of viscoplasticity. It can be solved for the conditions when $F > 0$, i. e. when yield stress is exceeded and irreversible deformations occur. Value η denotes rock viscosity.

Table 1. Rheological model creep stages
Таблица 1. Стадии ползучести реологической модели

Transient creep	Steady-state creep	Progressive creep
$F_p = E_p\left[\left(\dfrac{\sigma_{eff}}{E_p}\right)^m - \varepsilon_p^{eff}\right];$	$F_S = p_0\left(\dfrac{\sigma_{eff}}{p_0}\right)^n;$	Drucker-Prager failure criterion: $F_t > 0$; $F_t = \dfrac{1}{3}\cdot\dfrac{3-\sin\varphi_F}{1-\sin\varphi_F}q - \dfrac{2\sin\varphi_F}{1-\sin\varphi_F}p - \sigma_F^*;$ $\sigma_F^* = \sigma_F + M\varepsilon_v^t,$
$Q_p = \sigma_{eff},$	$Q_S = \sigma_{eff},$	$Q_t = \dfrac{1}{6}(3-\sin\psi)q - \sin\psi p;$ $p = \dfrac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z);$ $q = \sigma_{eff},$
where E_p – consolidation modulus; m – exponent at stresses; σ_{eff} – the intensity of stresses; ε_p^{eff} – the intensity of deformations.	where n – exponent at stresses; p_0 – constant.	where σ_F – long-term compressive strength; φ_F – long-term friction angle; M – the softening modulus; ψ – the dilatancy angle; p – the average stress; ε_v^t – volumetric deformations of progressive creep.

The model in use assumes that general deformations of saliferous rock can be presented as a total of individual components:

$$\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{p} + \varepsilon^{s} + \varepsilon^{t},$$

where ε^{el} – elastic deformations, ε^{p}, ε^{s}, ε^{t} – primary (transient), secondary (steady-state), and tertiary (progressive) creep deformations.

According to the authors of the model [1–3], every creep stage complies with its own plasticity potential Q and its own flow function F (table 1).

The use of an equation for the flow function F_t (table 1) corresponds to the Drucker-Prager failure criterion. This equation contains unstable flow boundary σ_F^* which depends on volumetric creep deformations ε_v^t. The given dependence reflects the fact of rock softening when dilatancy occurs and is determined with the help of a softening modulus *M* (Wittke, Doering, Kiehl [1–3]).

The outlined rheological model is realized with the method of initial deformations and implemented into finite element software ANSYS with the help of users' utilities provided with the software [5–8].

Based on the presented rheological model the stress-strain state of VKMKS salt massif was calculated and WPS disturbed state was estimated. For this purpose the methods of forecasting the main stages of displacement process were developed (initial, active, and attenuated) [5–7]. The gist of the methods is to explain the graphs of maximum surface subsidence increase in the course of time using a model and obtain the parameters of the rheological model according to the graphs. The given graphs can be considered as the analogues of the creep curves obtained in rock sample trials except that subsidence increase curves reflect the deformation process of the real pillars and the whole overlying strata [9, 10]. Experts investigating the process of the earth's surface displacement under VKMKS exploitation distinguish three main displacement stages: *I* – initial; *II* – active; *III* – attenuated.

Initial stage corresponds to displacement development from the beginning up to the critical values of interchamber pillars deformation; it is characterized by almost constant velocity of surface subsidence. The given stage is modeled by transient and steady-state creep.

Active stage is characterized by the intensive growth of surface subsidence up to its maximum value, caused by the developing progressive creep deformations and interchamber pillars failure after they have reached critical deformation values. In modeling the given stage is reflected in the rheological model by progressive creep and further shear failure.

Transition from initial to active stage of displacement process is modeled with the effect of rock softening and determined by the softening modulus *M* and the dilatancy angle ψ.

The stage of attenuation is characterized by the surface subsidence velocity decrease from the maximum value down to some critical value, which is connected with the termination of pillars deformation active stage and the beginning of the destructed part of a massif consolidation, or the filling come into effect. The given stage is realized by means of injecting the substitute into the mined-out space which simulates the disturbed massif or chambers filling. The properties of the material are determined by the attenuated branch (*III*) of maximum surface subsidence increase graph.

After the process of salt massif displacement has been modeled, WPS disturbance rate is estimated. For this purpose it is required to determine which layers of WBFZ contain technogenic cracks through which suprasalt fresh water can get into the mined-out space and cause flooding. The estimate of cracks propagation in WPS can be fulfilled based on the analysis of horizontal tensile deformations distribution (deformational criterion) and Drucker-Prager criterion distribution (force criterion) which determines the emergence of progressive creep deformations in saliferous rock. The satisfaction of the Drucker-Prager criterion in the physical sense can be interpreted as the beginning of shear cracks formation in the compression area.

To analyze WPS discontinuity by means of shear cracks formation, Drucker-Prager criterion (table 1) is reduced to:

$$K_t = \frac{q}{[q]} > 0.8, \qquad (2)$$

where q – the intensity of the current stresses, MPa; $[q]$ – limit stresses intensity, MPa:

$$[q] = \left(\frac{2\sin\varphi_F}{1-\sin\varphi_F} p + \sigma_F^* \right) \left(\frac{1}{3} \cdot \frac{3-\sin\varphi_F}{1-\sin\varphi_F} \right)^{-1}.$$

In order to make the calculations more reliable, it is assumed to take $K_t > 0.8$ as a critical value.

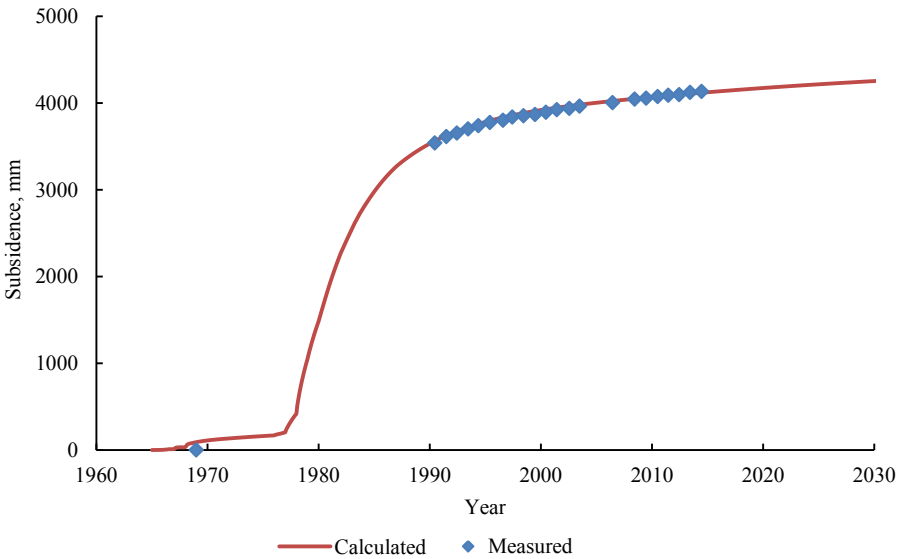


Fig. 1. The graph of maximum surface subsidence increase in the course of time of a bench mark no. 11 of a baseline no. 9
Рис. 1. График нарастания оседаний земной поверхности со временем (репер № 11 профильной линии № 9)

The condition of cracks propagation in WPS based on the analysis of horizontal tensile deformations qualitatively determines the propagation of subvertical cracks in the salt massif. The larger tensile deformations in WPS are the more probable WPS discontinuity and water-conducting crack development are. Average limit value of tensile deformations for saliferous rock (0.1%) is taken as a critical value above which cracks development begins [9]:

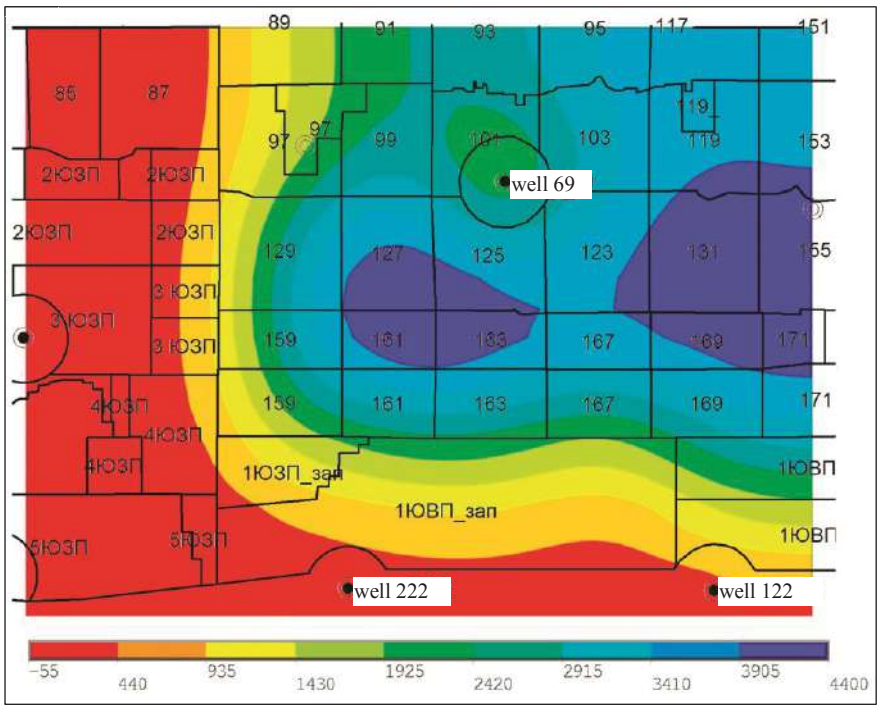
$$\varepsilon_{xp} > 0.1\%. \quad (3)$$

The estimate of WPS failure conditions is made with the account of stress-strain state variation under the development of the process of displacement in the course of time.

Results. Presented methods were used to solve particular mine and technical problems. The estimate of WPS disturbed state in the area of well no. 69 (SKRU-1) is made. The given area is characterized by significant surface subsidence. As of 2015 maximum surface subsidence is 4.15 м (fig. 1). Single extensive subsidence zone is determined at the given section (fig. 2) within which local subsidence zones appear; one of such zones is timed to blocks 125, 127, 129 in the immediate vicinity from the pillar of well no. 69.

Due to the complex mine and technical situation for the forecast of the stress-strain state of the waterproof strata, 3D geomechanical model of the considered section

а



б

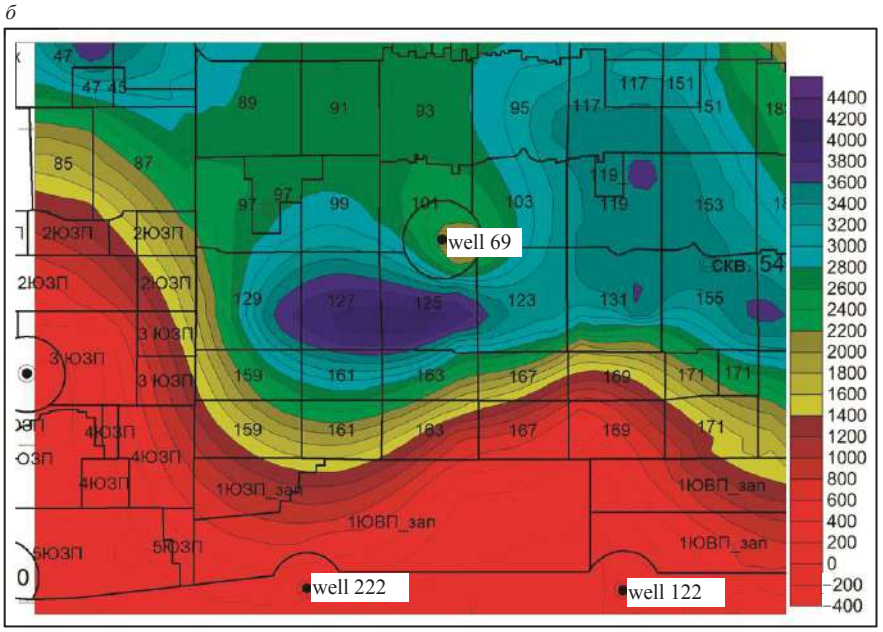


Fig. 2. Surface subsidence, mm, 2015:
а – calculated; *б* – actual
Рис. 2. Оседания земной поверхности, мм, 2015 г.:
а – расчетные; *б* – фактические

SKRU-1 was created taking into account basic geological structure of a salt massif (in sylvinite-carnallite zone the layers of halite and carnallite are distinguished) as well as the parameters of the development system, block (panel) mining period, and chambers filling filling, if any.

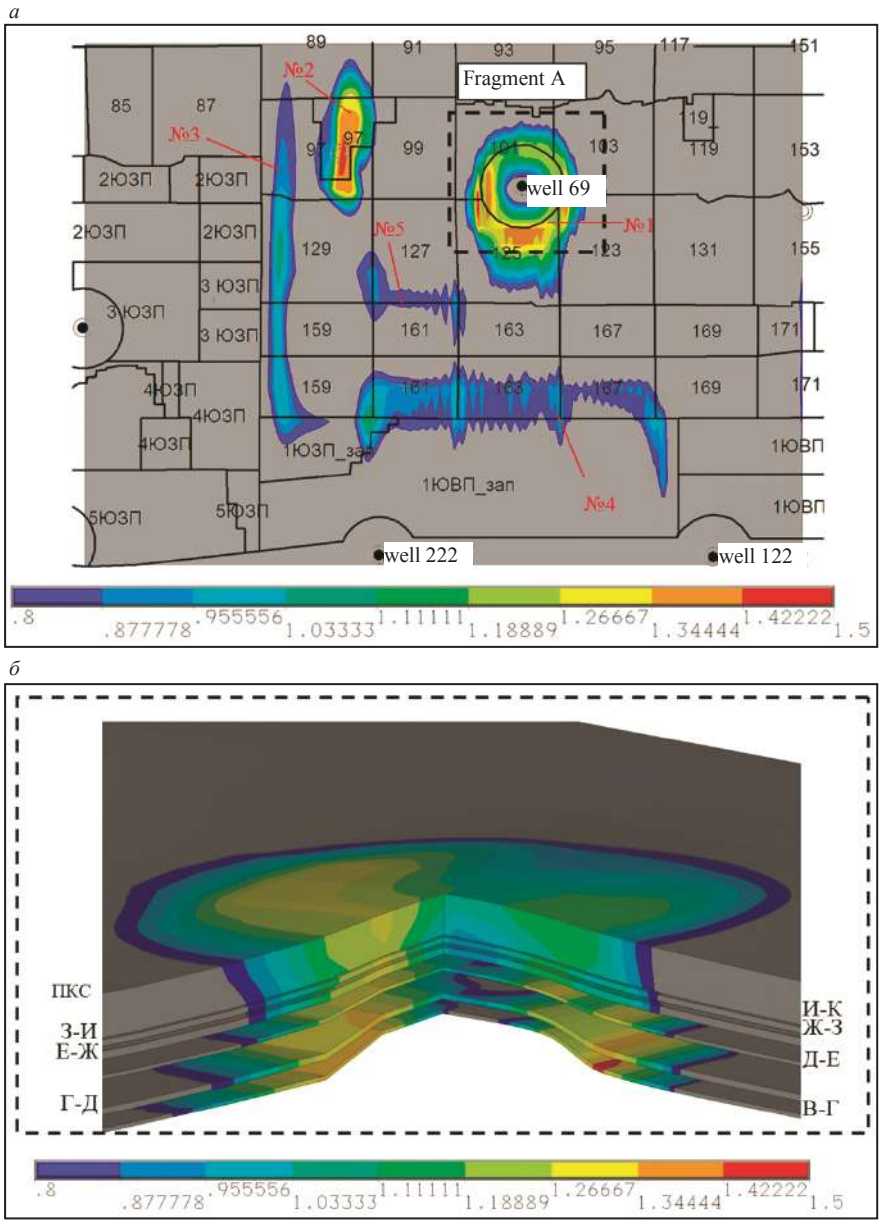


Fig. 3. The distribution of Drucker-Prager criterion K_t, unit fractions:
а – in seams В-Г; *б* – along the whole section of WPS around well no. 69 (fragment A)
Рис. 3. Распределение критерия Друкера-Прагера K_t, доли ед.:
а – в пласте В-Г; *б* – по всему разрезу ВЗТ вокруг скв. 69 (фрагмент А)

The analysis of salt massif stress-strain state was fulfilled for 2030. The results of mathematical modeling were controlled by the actual value of surface subsidence along the surveying baselines. Fig. 2 presents the isolines of surface subsidence obtained in mathematical modeling and built with the use of surveying baselines data (no. 6, 14, 16,

19, 25); fig. 1 presents the graph of maximum surface subsidence increase in the course of time of a bench mark no. 11 of a baseline no. 9.

It follows from the figures that the calculated subsidence reasonably correlate to the field data which makes it possible to objectively forecast the geomechanical situation at the given section.

Fig. 3 presents the distribution of Drucker-Prager criterion Kt at the section for the year 2030. Five possible zones of WPS destruction have been generally distinguished. The main inhomogeneity of the stress field is determined by the presence of a protecting pillar around well no. 69, for which reason at this section the criterion has its maximum value and the first extensive zone of WPS destruction emerges. The second zone with the increased values of K_t criterion is timed to block 97 and is connected with the abandonment of a pillar 65 m width and 300 m length at the horizon КрII, the given pillar is a stress raiser; as a result, in WPS rocks above the abandoned "wide" pillar the shear cracks form [11, 12]. The third and forth zones emerge at the edges of subsidence zones between 2ЮЗП, 3ЮЗП, 4ЮЗП and 97, 129, 159 blocks and between 161, 163, 167, 169 blocks and 1ЮВП and and are connected with the various velocity of the given blocks pillars deformation which leads to significant which leads to significant differential between WPS subsidence zones. The fifth zone is timed to the flat floor of a local subsidence zone in the area of blocks 127, 125, 163, 161.

Table 2. Potentially hazardous WPS failure zones
Таблица 2. Потенциально опасные зоны разрушения ВЗТ

Seam	Thickness, m, of undisturbed layers of WPS halite in potentially hazardous zones									
	Zone no.*									
	1		2		3		4		5	
	Failure criterion (formulae (2) and (3))									
	K_t	ε_{xp}	K_t	ε_{xp}	K_t	ε_{xp}	K_t	ε_{xp}	K_t	ε_{xp}
В-Г	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Г-Д	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Д-Е	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Е-Ж	0	0	0	0	0	0	3,5	0	0	0
Ж-З	0	0	0	0	0	0	1,3	0	0	0
З-И	0	0	0	0	0	0	3,3	0	0	0
И-К	4,5	0	0	2,1	4,9	0	5,8	0	0	0
ПКС	0	0	11,8	20,9	0	0	24,2	0	9,5	18,3
Σ	4,5	0	11,8	23	4,9	0	38,1	0	9,5	18,3

* Zones location is in fig. 3, *a*.

Table 2 presents the thicknesses of undisturbed layers of WPS halite in potentially hazardous zones.

Conclusions. As it has already been said, maximum value of K_t Drucker-Prager criterion emerges around the pillar of well no. 69 from the direction of the local subsidence zone (area of block 125) (fig. 3). Load-bearing strength loss of the pillars of blocks 125, 127, 129 and their transition to progressive creep stage as a result of a process interlayer failure, leads to the emergence of a significant gradient of deformation velocities in the saliferous strata and the emergence of high values of stresses intensity, which is the reason for the processes of WPS failure around the pillar. At the given section, the emergence of water-conducting cracks in WPS is most probable.

Thus, at the section under consideration constant monitoring should be continued over the state of the earth's surface and the mined-out space and operative interference in the negative geomechanical situation should be provided.

REFERENCES

1. Wittke W. *Rock mechanics: theory and applications with case histories*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokio, Hongkong, Barcelona, 1990.

2. Wallner M. *Standsicherheitsberechnungen fuer pfeilerdimensionienmg im salzbergbau. Proc. 5th ISRM Congress. Melbourne*, 1983. D8–D14.

3. Kiehl J. R., Doering T., Erichsen C. Ein raeumliches stoffgesetz fuer steinsalz unter beruecksichtigung von primaeren sekudaeren und tertiaeren kreichen. Dilatanz. Kriech- und zugbruch sowie nachbruchverhalten. *Geotechnik 21*. 1998. Nr. 3. S. 254–258.

4. Perzyna P. *Teoria lepkoplastyczności*. PWN, Warszawa, 1966.

5. Ermashov A. O. *Geomechanical substantiation of surface subsidence calculations when mining potassium-magnesium ore (by the example of Verkhnekamskoe deposit of potassium-magnesium salt)*. PhD in Engineering Dissertation. Perm; 2015. (In Russ.)

6. Ermashov A. O., Kashnikov Iu. A. Usage of salt rock strain rheological model for forecast of ground subsidence in the process of mining of salt formations. *Marksheideriia i nedropolzovanie = Mine Surveying and Subsurface Use*. 2015; 4: 34–37. (In Russ.)

7. Ermashov A. O., Kashnikov Iu. A. Rheological model of saliferous rock deformation and destruction forecasting surface subsidence when mining Verkhnekamskoe deposit of potassium-magnesium salt. *Marksheiderskii vestnik = Mine Surveying Bulletin.* 2014; 4 (102): 50–55. (In Russ.)

8. ANSYS. Online Manuals. Release 11. User Programmable features. 2007.

9. Bariakh A. A., Konstantinova S. A., Asanov V. A. *Saliferous rock deformation*. Ekaterinburg: UB RAS Publishing; 1996. (In Russ.)

10. Bariakh A. A., Telegina E. A., Samodelkina N. A., Deviatkov S. Iu. Prediction of the intensive surface subsidences in mining potash series. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 2005; 4: 26–34. (In Russ.)

11. Konstantinova S. A. Rock and tectonic burst at the Second Solikamsky mine. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2005; 3: 19–24. (In Russ.)

12. Konstantinova S. A., Chernopazov S. A., Guliaev A. A. The estimate of natural stresses in Verkhnekamsk rock mass based on the hierarchical block model. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 2001; 5: 1–9. (In Russ.)

Received 26 December, 2018

Information about authors:

Iurii A. Kashnikov – D. Sc. (Engineering), professor of Mine Surveying, Geodesy and Geoinformational Systems Department, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: geotech@pstu.ru
Aleksei O. Ermashov – PhD (Engineering), lead engineer of Mine Surveying, Geodesy and Geoinformational Systems Department, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: ermashov.pstu@gmail.com
Olesia O. Lebedeva – PhD Student, engineer of Mine Surveying, Geodesy and Geoinformational Systems Department, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: lesli.lebedeva@gmail.com

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-30-38

Трехмерное геомеханическое моделирование как основа решения сложных задач обеспечения промышленной безопасности разработки калийных месторождений

Кашников Ю. А.[1], Ермашов А. О.[1], Лебедева О. О.[1]
[1] Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия.

Реферат

Введение. *Прогноз напряженно-деформированного состояния горных пород и земной поверхности представляет собой весьма актуальную проблему разработки полезных ископаемых, связанную с негативным воздействием процесса сдвижения на подрабатываемые поверхностные и подземные объекты и формированием водопроводящих трещин в водозащитной толще (ВЗТ).*

Цель работы *– прогнозирование сдвижения горного массива на основе использования трехмерной геомеханической модели.*

Методология. *В основу расчетов напряженно-деформированного состояния соляного массива Верхнекамского месторождения калийных солей положена реологическая модель деформирования и разрушения соляных пород. Аналитическое описание модели базируется на теории вязкопластич-*

ности, а численная реализация выполнена методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS. Оценка условий развития трещин в ВЗТ выполнена на основе анализа распределения горизонтальных деформаций растяжения (деформационный критерий) и распределения критерия Друкера–Прагера (силовой критерий).

Результаты. *Предложенная модель применялась для конкретных горнотехнических ситуаций. Производилась оценка нарушенности ВЗТ в районе скв. 69 рудника СКРУ-1. Анализ развития деформационных процессов в исследуемом районе позволил выделить пять зон возможного нарушения ВЗТ.*

Выводы. *Максимальные значения критериев развития трещин возникают со стороны локальной мульды оседания (район 125 блока). Именно на данном участке наиболее вероятно возникновение водопроводящих трещин в ВЗТ.*

Ключевые слова: *напряженно-деформированное состояние; реологическая модель; трехмерное геомеханическое моделирование; оседания земной поверхности; программный комплекс ANSYS.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wittke W. Rock mechanics: theory and applications with case histories. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokio, Hongkong, Barcelona, 1990.

2. Wallner M. Standsicherheitsberechnungen fuer pfeilerdimensionienmg im salzbergbau. Proc. 5th ISRM Congress. Melbourne, 1983. D8–D14.

3. Kiehl J. R., Doering T., Erichsen C. Ein raeumliches stoffgesetz fuer steinsalz unter beruecksichtigung von primaeren sekudaeren und tertiaeren kreichen. Dilatanz. Kriech- und zugbruch sowie nachbruchverhalten. Geotechnik 21. 1998. Nr. 3. S. 254–258.

4. Perzyna P. Teoria lepkoplastyczności. PWN, Warszawa, 1966.

5. Ермашов А. О. Геомеханическое обоснование расчетов оседаний земной поверхности при добыче калийно-магниевых руд (на примере Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей): дис. ... канд. техн. наук. Пермь, 2015. 133 с.

6. Ермашов А. О., Кашников Ю. А. Использование реологической модели деформирования соляных пород для прогноза оседаний земной поверхности при отработке соляных пластов // Маркшейдерия и недропользование. 2015. № 4. С. 34–37.

7. Ермашов А. О., Кашников Ю. А. Реологическая модель деформирования и разрушения соляных пород для прогноза оседаний земной поверхности при разработке Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей // Маркшейдерский вестник. 2014. № 4 (102). С. 50–55.

8. ANSYS. Online Manuals. Release 11. User Programmable features. 2007.

9. Барях А. А., Константинова С. А., Асанов В. А. Деформирование соляных пород. Екатеринбург: УрО РАН, 1996. С. 91–107.

10. Барях А. А., Телегина Е. А., Самоделкина Н. А., Девятков С. Ю. Прогноз нарастания оседаний земной поверхности при отработке свиты калийных пластов // ФТПРПИ. 2005. № 4. С. 26–34.

11. Константинова С. А. Горно-тектонический удар на Втором Соликамском руднике // Горный журнал. 2005. № 3. С. 19–24.

12. Константинова С. А., Чернопазов С. А., Гуляев А. А. Оценка естественных напряжений в породном массиве Верхнекамского региона на основе блочно-иерархической модели // ФТПРПИ. 2001. № 5. С. 1–9.

Сведения об авторах:

Кашников Юрий Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры маркшейдерского дела, геодезии и геоинформационных систем Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: geotech@pstu.ru

Ермашов Алексей Олегович – кандидат технических наук, ведущий инженер кафедры маркшейдерского дела, геодезии и геоинформационных систем Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: ermashov.pstu@gmail.com

Лебедева Олеся Олеговна – аспирант, инженер кафедры маркшейдерского дела, геодезии и геоинформационных систем Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: lesli.lebedeva@gmail.com

Для цитирования: Кашников Ю. А., Ермашов А. О., Лебедева О. О. Трехмерное геомеханическое моделирование как основа решения сложных задач обеспечения промышленной безопасности разработки калийных месторождений // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 3. С. 30–38 (In Eng.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-30-38

For citation: Kashnikov Iu. A., Ermashov A. O., Lebedeva O. O. 3d geomechanical modeling as the complex problem solving assumption of potassium salt development safety. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 3: 30–38. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-30-38

ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА. АЭРОГАЗОДИНАМИКА

УДК 622.831.325 DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-39-47

Исследование реологических характеристик горных пород в условиях воздействия на массив поверхностно-активными веществами

Латышев О. Г.[1], **Казак О. О.**[1]*, **Сынбулатов В. В.**[1]
[1] Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия
e-mail: shs.dep@ursmu.ru

Реферат

Актуальность. *Борьба с такими опасными проявлениями напряженного состояния породных массивов, как горные удары, осуществляется в двух основных направлениях – приведение пород в неудароопасное состояние и снижение напряжений в приконтурном массиве. Эффективным средством снижения напряжений является направленное изменение свойств горных пород поверхностно-активными веществами (ПАВ).*

Цель работы *– исследование закономерностей изменения реологических свойств горных пород под действием поверхностно-активной среды как средства профилактики горных ударов.*

Методология исследования: *лабораторные испытания ползучести горных пород, аналитические исследования процесса с фрактальных позиций, статистический анализ результатов.*

Результаты. *В работе приводятся результаты исследований воздействия ПАВ на реологические характеристики горных пород месторождений Урала и Донбасса. Установлено, что насыщение пород специально подобранными растворами ПАВ приводит к заметному пластифицированию пород, что выводит их из удароопасного состояния, и релаксации напряжений на контуре выработок за счет активизации ползучести пород. Процессы ползучести горных пород наиболее адекватно описываются уравнением Больцмана–Вольтерра со степенным ядром ползучести. Наличие степенной зависимости (скейлинга) свидетельствует о фрактальной природе реологических процессов. Описание ползучести линейными зависимостями в двойных логарифмических координатах позволило выявить две стадии пластической деформации пород под действием ПАВ – межзеренное скольжение и саморазвивающийся процесс развития трещин с последующей миграцией активных молекул. Эти стадии соответствуют закономерностям кинетики насыщения пород активными растворами.*

Выводы. *В результате исследований получены аналитические уравнения, характеризующие развитие под действием ПАВ необратимых деформаций ползучести, что сопровождается снижением напряжений в приконтурном массиве. Это дает возможность использовать поверхностно-активные вещества как средство предотвращения горных ударов при разработке месторождений подземным способом.*

Ключевые слова: *горные породы; реологические характеристики; поверхностно-активные вещества; фрактальные свойства; прогноз.*

Введение. Одним из наиболее опасных динамических проявлений напряженного состояния породных массивов при большой глубине разработки являются горные удары. Борьба с горными ударами осуществляется в двух основных направлениях – приведение пород в неудароопасное состояние и снижение напряжений в приконтурном массиве [1]. Реализация этих направлений может быть

связана с управлением свойствами удароопасных массивов. Эффективным средством направленного изменения свойств и состояния горных пород является использование поверхностно-активных веществ (ПАВ) [2]. Действие ПАВ основано на адсорбционном понижении поверхностной энергии тел (эффект Ребиндера) [3], что сопровождается закономерным изменением практически всего комплекса механических характеристик горных пород [4]. В контексте данных исследований наиболее важным является пластифицирующее действие ПАВ. Для оценки этого эффекта проведена серия экспериментальных исследований горных пород Урала и Донбасса.

Методы исследования. Определение ползучести производилось методом испытаний на изгиб балок прямоугольного сечения при длительной (сотни и тысячи часов) постоянной нагрузке и циклически возрастающей нагрузке. В последнем случае цикл состоит из нагружения балки центральной сосредоточенной нагрузкой в течение 48 ч с последующей разгрузкой (48 ч). Затем цикл повторяют при большей по величине нагрузке. Испытания проводились на образцах в воздушно-сухом состоянии, насыщенных водой и соответствующими растворами ПАВ. Исследовано более 50 литотипов [5].

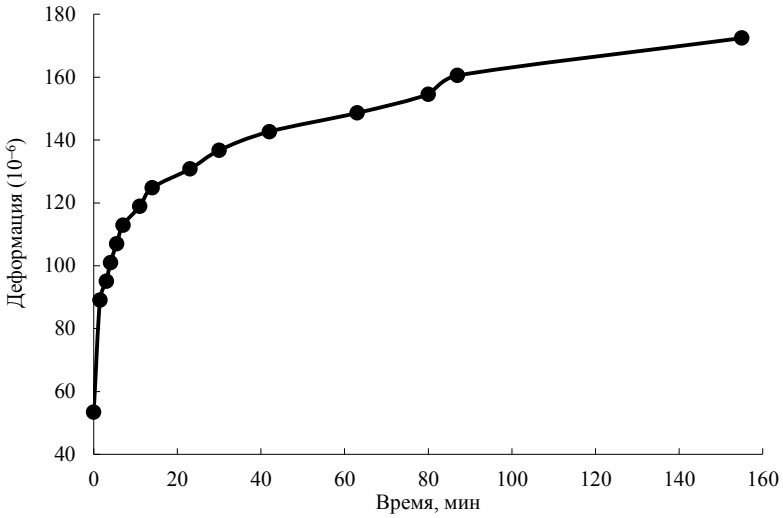


Рис. 1. Деформация известняка
Fig. 1. Limestone deformation

Результаты исследования. Типичный график деформации при испытании пород на ползучесть представлен на рис. 1. Общая деформация горной породы складывается из мгновенного упругого прогиба балки вслед за приложением нагрузки (отрезок по оси ординат) и собственно развивающейся во времени деформации ползучести [6, 7]. Для изучения наследственного характера ползучести проведены испытания горных пород в режиме многократной *нагрузки–разгрузки*. По результатам выполнено построение изохронных кривых, показывающее изменение упругой деформации между циклами нагружений (рис. 2). Здесь по оси ординат для удобства анализа отложена доля напряжений от прочности породы на изгиб. Обращает на себя внимание разный характер деформации исходных пород (в состоянии естественной влажности) и насыщенных раствором ПАВ (в данном случае 0,1 %-ый раствор $MgCl_2$). Для исходной породы график деформации во всем диапазоне ступенчатого нагружения остается линейным (отражающим

закон Гука), т. е. в ходе опытов заметных необратимых изменений в горной породе не происходит. Совершенно иной характер деформирования у образцов, пропитанных раствором ПАВ. Явная нелинейность графика отражает тот факт, что в ходе каждой ступени нагружения за счет развития трещин и пластических подвижек горная порода становится все более ослабленной [8, 9]. За счет уменьшения модуля упругости ее деформирование происходит с опережающим темпом. Кроме того, на графике видно снижение прочности породы, насыщенной раствором ПАВ.

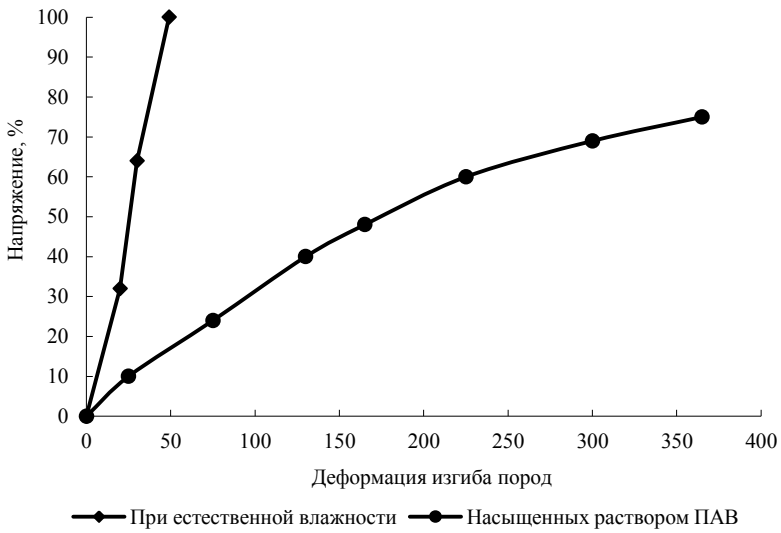


Рис. 2. Упругая деформация известняка (изохронные кривые)
Fig. 2. Elastic deformation of limestone (isochronous curve)

В соответствии с признанными критериями [1] горная порода считается потенциально удароопасной, если при ее нагружении до 80 % от предела прочности доля упругих деформаций превышает 70 % общих или работа упругих деформаций больше работы пластических. Построение по результатам испытаний на ползучесть изохронных кривых деформации показывает, что подавляющее большинство скальных пород Урала по этим признакам относится к категории потенциально удароопасных. Действие поверхностно-активных веществ приводит к существенному (от 10 до 70 %) снижению модуля упругости пород, что сопровождается увеличением мгновенного вслед за приложением нагрузки прогиба балок. Еще более заметно влияние ПАВ на характер последующего деформирования горных пород во времени. Деформации собственно ползучести возрастают от 2 до 7 раз. Пластическое течение пород начинается уже при нагрузках, не превышающих половину предела прочности. Доля упругих обратимых в общих деформациях составляет не более 50 %. Все это выводит горные породы из состояния потенциальной удароопасности.

Для количественного описания поведения скальных горных пород наиболее широко используется математический аппарат, основанный на теории наследственности [10, 11]. Центральная идея данной теории состоит в предположении, что ползучесть различных материалов характеризуется определенной зависимостью деформации в данный момент времени от всей предыдущей истории деформирования этих материалов. Уравнение ползучести в предположении линейного

закона деформирования материалов, обладающих свойством наследственности, было предложено Л. Больцманом и позднее развито В. Вольтерра:

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E}\left[\sigma(t) + \int_0^t L(t,\tau)\sigma(\tau)d\tau\right], \quad (1)$$

где $\varepsilon(t)$ и $\sigma(t)$ – деформация и напряжение, соответствующие рассматриваемому времени t, отсчитываемому от момента начального нагружения тела τ. В данном уравнении функция $L(t, \tau)$, которую можно назвать ядром ползучести, отражает (наследует) влияние единичного напряжения $\sigma(\tau)$, действующего в единичный промежуток времени τ, на деформацию в момент t.

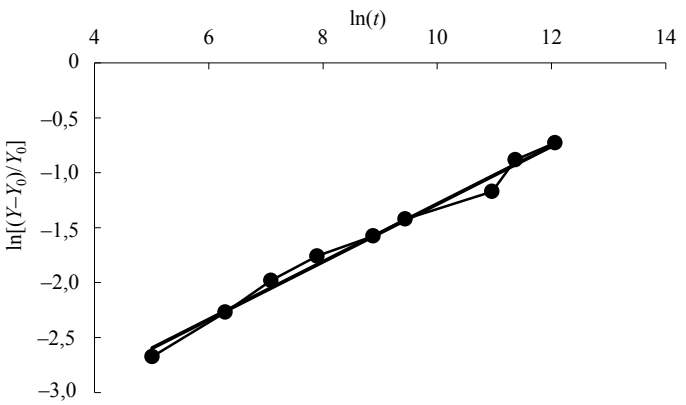


Рис. 3. Характер ползучести известняка (уравнение (3))
Fig. 3. Character of limestone creep (equation (3))

Для количественного описания ползучести достаточно выбрать вид функции ядра ползучести. В практических задачах наибольшее распространение получили экспоненциальные и степенные ядра ползучести [10]. Анализ полученных экспериментальных результатов показал, что наилучшее приближение для изучаемых скальных пород Урала дает степенное ядро ползучести. Функцию ядра обычно принимают в виде:

$$L(t,\tau) = \delta(t-\tau)^{-\alpha}, \quad (2)$$

где α и δ – параметры ядра ползучести.

Интегральный член в уравнении (1) описывает пластическую деформацию (ползучесть). Тогда, с учетом перехода от напряжения к сосредоточенной нагрузке P, получим прогиб балки:

$$Y(t) = \frac{k}{E}\left[P(t) + \int_0^t L(t,\tau)P(\tau)d\tau\right].$$

Подставляя формулу ядра ползучести (2) в данную функцию и учитывая, что при ползучести $P(t)$ = const, получим:

$$Y(t) = Y + Y\frac{\delta}{1-\alpha}t^{1-\alpha}.$$

Таким образом, имеем степенную зависимость деформации от времени (скейлинг), что подразумевает фрактальный характер ползучести горных пород [12]. Для определения параметров ползучести как фрактальных характеристик процесса преобразуем данное уравнение к виду:

$$\frac{\Delta}{Y_0} = \frac{Y(t) - Y_0}{Y_0} = \frac{\delta}{1-\alpha} t^{1-\alpha} = At^{\operatorname{tg}\beta}, \quad (3)$$

где $A = \delta/(1 - \alpha)$; $\operatorname{tg}\beta = 1 - \alpha$.

Таблица 1. Усредненные характеристики ползучести исходных горных пород

Table 1. Average characteristics of initial rock creep

Горные породы	Модуль упругости E, ГПа	Параметры ползучести	
		α	δ
Известняки (СУБР)	14,2	0,81	0,010
Эффузивные породы (СУБР)	18,5	0,69	0,008
Бокситы (СУБР)	9,7	0,82	0,025
Песчаники (Горловка)	25,4	0,79	0,007

Тогда, если в двойных логарифмических координатах опытные данные будут соответствовать линейной зависимости, можно сделать вывод о фрактальной природе процесса ползучести. Большой объем экспериментальных исследований подтверждает это предположение. В качестве примера на рис. 3 представлен график ползучести известняка при нагрузке 80 Н.

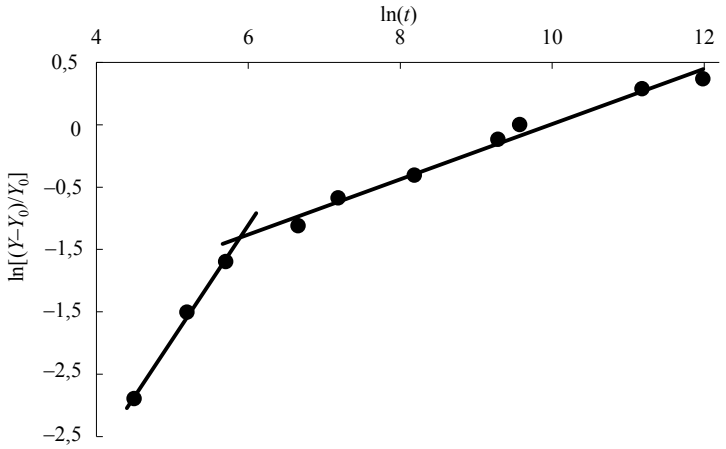


Рис. 4. Двухстадийный характер ползучести горных пород
Fig. 4. Two-stage character of rock creep

Результаты экспериментальных данных показывают, что параметры ядра ползучести α и δ для изученных пород изменяются в очень широком диапазоне. Даже в пределах одной разновидности пород вариация данных параметров может превышать 100 %, что свидетельствует о чрезвычайной чувствительности горных пород к малейшим изменениям их состава и строения. Вместе с тем усредненные значения параметров различных групп пород дают достаточно объективную ин-

формацию об их склонности к ползучести. В табл. 1 приведены характеристики основных типов горных пород Урала и Донбасса.

Такая же процедура анализа ползучести горных пород, насыщенных растворами ПАВ, явно свидетельствует о двухстадийном характере процесса (рис. 4).

Первая стадия, хорошо описанная в литературе [10, 13], представляет собой процесс неустановившейся ползучести. Преобладающим механизмом данной стадии для горных пород является межзеренное скольжение, обусловленное концентрацией напряжений на контактах минеральных зерен различной упругости.

Таблица 2. Усредненные характеристики ползучести горных пород в поверхностно-активной среде
Table 2. Average characteristics of rock creep in surface active medium

Горные породы	Модуль упругости E, ГПа	Параметры ползучести	
		α	δ
Известняки (СУБР)	10,9	0,65	0,034
Эффузивные породы (СУБР)	12,8	0,43	0,011
Бокситы (СУБР)	7,1	0,74	0,019
Песчаники (Горловка)	15,6	0,72	0,014

При превышении этими напряжениями прочности контактового материала он разрушается с образованием межкристаллических трещин, по которым и происходит сдвиг минеральных зерен, обеспечивающий необратимую пластическую деформацию (ползучесть) горных пород. Действие ПАВ приводит к ослаблению межзеренных контактов, что активизирует процесс ползучести. Усредненные данные по первой стадии ползучести горных пород в поверхностно-активной среде приведены в табл. 2.

Таблица 3. Параметры второй стадии ползучести горных пород под действием ПАВ
Table 3. Parameters of the second stage of rock creep under the action of surfactants

Горные породы	Параметры ползучести	
	α	δ
Известняки (СУБР)	0,86	0,054
Эффузивные породы (СУБР)	0,81	0,020
Песчаники (Горловка)	0,90	0,024

Классическая ползучесть со временем затухает или при достаточно больших напряжениях переходит в фазу прогрессирующего течения, заканчивающуюся разрушением горной породы. Наблюдаемая в опытах с образцами, насыщенными растворами ПАВ, вторая стадия ползучести не вписывается в классическую схему. После окончания первой стадии ползучести деформация образцов продолжается, но с гораздо меньшей скоростью. Причем наличие резкой смены характера деформирования («излом» графика на рис. 4) свидетельствует о том, что меняется сам механизм ползучести. Как свидетельствуют результаты исследований фильтрации активных растворов [14], данная стадия ползучести обусловлена саморазвивающимся процессом роста трещин под действием ПАВ и последующего проникновения активного раствора в образующиеся микротрещины. Сводные характеристики второй стадии ползучести горных пород под действием ПАВ приведены в табл. 3.

Эффект использования ПАВ как средства борьбы с горными ударами основан на том, что за счет интенсификации ползучести уровень напряжений в приконтурном массиве снижается. Запасенная удароопасным массивом упругая энергия будет расходоваться на работу по росту трещин и связанную с этим пластическую деформацию, а не на катастрофическое хрупкое разрушение и выброс породы (горный удар). Эта работа определится дополнительным мгновенным деформированием массива за счет его пластифицирования под действием ПАВ (т. е. снижения модуля упругости с величины E_0 до $E_{\text{ПАВ}}$) и собственно деформацией ползучести:

$$A = \frac{\sigma^2}{2E_0}\left[\left(\frac{E_0}{E_{\text{ПАВ}}} - 1\right) + \frac{2E_0}{E_{\text{ПАВ}}}\left(\frac{\delta}{1-\alpha}t^{1-\alpha}\right)\right].$$

Выводы. Таким образом, анализ полученных результатов показывает высокую эффективность использования поверхностно-активных веществ для предотвращения горных ударов. В частности, применительно к условиям изученных горных пород Североуральских бокситовых месторождений насыщение массива на глубине 800–1000 м растворами ПАВ увеличивает работу деформирования пород в среднем с 55 до 76 кДж/м^3, т. е. более чем в 1,4 раза. Интерпретация полученных уравнений с точки зрения релаксации напряжений позволяет предположить, что при тех же условиях и неизменной деформации пород действующие напряжения в приконтурном массиве уменьшаются за 6 ч с 25,0 до 21,8 МПа, за сутки – до 14,6 МПа, за двое суток – до 8,5 МПа, т. е. почти в три раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках / под ред. И. М. Петухова. М.: АГН, 1997. 376 с.

2. Теоретические основы прогноза и управления свойствами геологической среды при подземных техногенных воздействиях / под ред. О. Г. Латышева. Екатеринбург: УГГУ, 2007. 216 с.

3. Горюнов Ю. В., Перцов Н. В., Щукин Е. Д. Эффект Ребиндера. М.: Наука, 1966. 178 с.

4. Латышев О. Г. Разрушение горных пород. М.: Теплотехник, 2007. 672 с.

5. Латышев О. Г. Интенсификация ползучести горных пород под действием поверхностно-активных веществ // Известия вузов. Горный журнал. 1997. № 7–8. С. 1–5.

6. Taylor G. I. The mechanism of plastic deformation of crystals // Theoretical Proc. Soc. A. 1934. No. 855. P. 362–387.

7. Chen W., Baladi G. Y. Soil plasticity: theory and implementation. Elsevier, 1985. 231 p.

8. Lawn B. R. An atomistic model of kinetic crock growth in brittle solids // Journal of Materials Science. 1975. Vol. 10. P. 469–480.

9. Fuller E. R., Lawn B. R., Thomson R. M. Atomic modeling of chemical interactions at crack tips // Acta Metallurgica. 1980. Vol. 28. P. 1407–1414.

10. Ержанов Ж. С. Теория ползучести и ее приложения. Алма-Ата: Наука, 1964. 176 с.

11. Прочность и деформируемость горных пород / Ю. М. Карташов [и др.]. М.: Недра, 1979. 269 с.

12. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы / пер. с нем. М.: ИКИ, 2002. 656 с.

13. Rutter E. N. The influence of temperature, strain rate and interstitial water in experimental deformation of rock // Tectonophisical. 1974. Vol. 22. No. 3/4. P. 311–334.

14. Latyshev O. G. Research of surfactant solutions filtration in hard rock // News of the Higher Institution. Mining Journal. 2018. No. 6. P. 18–27.

Поступила в редакцию 5 декабря 2018 года

Сведения об авторах:

Латышев Олег Георгиевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры шахтного строительства Уральского государственного горного университета.

Казак Ольга Олеговна – кандидат технических наук, доцент кафедры шахтного строительства Уральского государственного горного университета. E-mail: shs.dep@ursmu.ru

Сынбулатов Владимир Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры шахтного строительства Уральского государственного горного университета. E-mail: synbulatov_v@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-39-47

Investigating the rheological characteristics of rocks in the conditions of rock massif saturation with surfactants

Oleg G. Latyshev[1], Olga O. Kazak[1], Vladimir V. Synbulatov[1]
[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Research relevance. *Activities against such hazardous manifestations of rock massifs stress state as mine bumps are implemented in two main directions: bringing rock to the condition safe from mine bumps and reducing stress in the marginal massif. Directed alternation of rock properties using surfactants is an effective means of reducing stress.*

Research aim *is to investigate the regularities in rock rheological properties variation under the action of surface active medium as a means of preventing mine bumps.*

Research methodology *includes rock creep laboratory tests, analytical studies of the process from fractal positions, and statistical analysis of the results.*

Results. *In the present work, the results of the investigation into the influence of surfactants on the rheological characteristics of rock in Ural and Donbass deposits are presented. It has been stated that rock saturation with tailor-made surfactant solutions leads to sizeable plasticization of rock removing them from the bump-hazardous conditions, and relieves stress at the margins of mine workings by means of rock creep activation. Rock creep processes are adequately described by Boltzmann-Volterra equation with the creep kernel. The presence of scaling testifies to the fractal nature of rheological processes. The description of creep by linear dependences in double logarithmic coordinates allowed detecting two stages of plastic deformation of rock under the action of surfactants: intercrystalline slip and spontaneous process of crack propagation with further migration of active molecules. These stages correspond to the regularities in the kinetics of rock saturation with surfactants.*

Summary. *As the results of the research, analytical equations have been obtained characterizing the development of permanent creep deformations under the action of surfactants, which is accompanied by stress reduction in the marginal massif. It makes it possible to use surfactants as a means of rock bump prevention during the underground exploitation of a deposit.*

Key words: *rock; rheological characteristics; surfactants; fractal properties; forecast.*

REFERENCES

1. Petukhov I. M. (ed.) *Mine bumps forecast and prevention*. Moscow: AGN Publishing; 1997. (In Russ.)
2. Latyshev O. G. (ed.) *Theoretical fundamentals of geological medium properties forecast and control during underground technogenic impacts*. Ekaterinburg: UrSMU Publishing; 2007. (In Russ.)
3. Goriunov Iu. V., Pertsov N. V., Shchukin E. D. *The Rehbinder effect*. Moscow: Nauka Publishing; 1966. (In Russ.)
4. Latyshev O. G. *Rock failure*. Moscow: Teplotekhnik Publishing; 2007. (In Russ.)
5. Latyshev O. G. Intensification of rock creep under the action of surfactants. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 1997; 7–8: 1–5. (In Russ.)
6. Taylor G. I. The mechanism of plastic deformation of crystals. *Theoretical Proc. Soc. A*. 1934; 855: 362–387.
7. Chen W., Baladi G. Y. *Soil plasticity: theory and implementation*. Elsevier; 1985. 231 p.
8. Lawn B. R. An atomistic model of kinetic crock growth in brittle solids. *Journal of Materials Science*. 1975; 10: 469–480.
9. Fuller E. R., Lawn B. R., Thomson R. M. Atomic modeling of chemical interactions at crack tips. *Acta Metallurgica*. 1980; 28: 1407–1414.
10. Erzhanov Zh. S. *The theory of creep and its applications*. Alma-Ata: Nauka Publishing; 1964. (In Russ.)
11. Kartashov Iu. M. et al. (ed.) *Rock strength and deformability*. Moscow: Nedra Publishing; 1979. (In Russ.)
12. Mandelbrot B. *Fractal geometry of nature. Translation from German*. Moscow: IKI Publishing; 2002.
13. Rutter E. N. The influence of temperature, strain rate and interstitial water in experimental deformation of rock. *Tectonophisical*. 1974; 22 (3/4): 311–334.
14. Latyshev O. G. Research of surfactant solutions filtration in hard rock. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2018; 6: 18–27.

Received 5 December, 2018

Information about authors:

Oleg G. Latyshev – D. Sc. (Engineering), Professor, professor of Mine Construction Department, Ural State Mining University.
Olga O. Kazak – PhD (Engineering), associate professor of Mine Construction Department, Ural State Mining University. E-mail: shs.dep@ursmu.ru

Vladimir V. Synbulatov – PhD (Engineering), associate professor of Mine Construction Department, Ural State Mining University. E-mail: synbulatov_v@mail.ru

Для цитирования: Латышев О. Г., Казак О. О., Сынбулатов В. В. Исследование реологических характеристик горных пород в условиях воздействия на массив поверхностно-активными веществами // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 3. С. 39–47. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-39-47
For citation: Latyshev O. G., Kazak O. O., Synbulatov V. V. Investigating the rheological characteristics of rocks in the conditions of rock massif saturation with surfactants. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institution. Mining Journal*. 2019; 3: 39–47 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-39-47

УДК 622.275 DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-48-54

Лабораторные исследования применения поверхностно-активных веществ для подземного выщелачивания урана из слабопроницаемых руд

Аликулов Ш. Ш.[1]

[1] Навоийский государственный горный институт, г. Навоий, Республика Узбекистан

e-mail: sharofovich@mail.ru

Реферат

Введение. *Известно, что при подземном выщелачивании (ПВ) урановых руд эффективность процесса ПВ слабопроницаемых глинистых рудоносных пород в естественном залегании в основном зависит от фильтрационных свойств рудного пласта. Проведены лабораторные испытания применения поверхностно-активных веществ для увеличения фильтрационных свойств продуктивного пласта.*

Цель работы *– интенсификация технологических процессов подземного выщелачивания урана из слабопроницаемых руд путем применения поверхностно-активных веществ (ПАВ).*

Методология. *Результаты проведенного лабораторного испытания показали положительный эффект от применяемой технологии при подземном выщелачивании урана, которая позволяет увеличить скорость выщелачивания в слабопроницаемых глинистых породах, при этом скорость выщелачивания не лимитируется скоростью фильтрации растворов, так как вынос урана в раствор осуществляется главным образом за счет его диффузии к поверхности контакта руд с проницаемыми породами.*

Выводы. *В результате проведенных исследований разработан способ отработки урановых месторождений методом подземного выщелачивания в слабопроницаемых рудах с применением различных реагентов (ПАВ на основе поликарбоксилатов), позволяющий улучшить водопроницаемость горных пород и увеличить дебит откачных скважин.*

Ключевые слова: *скважина; вязкость раствора; поверхностно-активные вещества; слабопроницаемые руды; фильтрация; глинистые породы; подземное выщелачивание.*

Введение. Одним из методов повышения коэффициента фильтрации слабопроницаемых руд является снижение вязкости растворов с использованием поверхностно-активных веществ (ПАВ). В мировой практике впервые использовались ПАВ для выщелачивания урана из слабопроницаемых руд. Применение ПАВ позволяет повысить коэффициент фильтрации выщелачивания урана и производительность продуктивных растворов откачных скважин.

Методы и результаты исследования. Разработана методика проведения лабораторных исследований по определению влияния ПАВ на коэффициент фильтрации в слабопроницаемых рудах.

Исследование по изучению влияния ПАВ на коэффициент фильтрации проводилось на слабопроницаемом керновом материале (монолите). Для этого выбран участок уранового месторождения с низкой проницаемостью рудного горизонта и проведено геологоразведочное бурение одной скважины с целью изучения литологического состава земной коры [1]. Глубина геологоразведочной скважины составила 100 м, осуществлен отбор 16 кернов. Проведенная после отбора документация и укладка кернов обеспечила сохранность естественной структуры и влажности кернового материала. Для проведения лабораторных исследований отобрано 14 проб (верх, середина, низ) керна по длине 40 см с рудного горизонта.

После доставки керновых образцов в Центральную научно-исследовательскую лабораторию Навоийского горно-металлургического комбината определена их влажность. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Для проведения лабораторных экспериментов использованы следующие типы ПАВ: Сдж-1, Сдж-2 (на основе поликарбоксилатов), Сдж-3 (на основе фосфорорганических соединений), состав которых разработан в Навоийском государственном горном институте, и полиакриламид.

Проведены опытные работы по установлению оптимального расхода ПАВ и изучению его влияния на вязкость рабочих растворов.

Для проведения исследований в рабочие растворы добавлялся ПАВ с концентрацией 0,1; 0,5; 1; 5; 10 г/л. Вязкость растворов определялась капиллярным вискозиметром марки ВПЖ-2.

Вязкость жидкости определялась по формуле:

$$v = \frac{g}{980,7} T,$$

где v – кинематическая вязкость, сСт (мм^2/с); T – время истечения жидкости, с; g – ускорение свободного падения, м/с^2.

Результаты определения вязкости растворов приведены в табл. 2.

Анализируя полученные данные о вязкости растворов (табл. 2), принимали решение о необходимой оптимальной концентрации ПАВ в растворах. Дальнейшие испытания проводились с учетом полученных результатов с установлением оптимальной концентрации ПАВ в рабочих растворах [2–4].

Таблица 1. Результаты определения влажности керновых образцов
Table 1. Results of drill core samples moisture content determination

Номер образца	Влажность, %	Объемная плотность, г/см^3
1	14	1,18
2	15	1,19
3	17	2,22
4	20	2,47
5	20	2,57

Коэффициент фильтрации определялся с использованием прибора КФ-00М при гидравлическом градиенте $i = 1$.

При определении производительности фильтрации растворов методом налива по этой же методике определен объем продуктивных растворов с заданным соотношением Ж : Т. Растворы подавались на воронку Бюхнера, оснащенную фильтровальной бумагой. Фильтрация проводилась при атмосферном давлении до появления зеркала на фильтре. Измерялись объем фильтрата и время фильтрации.

Производительность фильтрации, м^3/м^2 · ч, определяли по формуле:

$$П_ф = \frac{v_ф \cdot 3600}{F_ф \cdot \tau_п},$$

где $v_ф$ – скорость фильтрации, м/сут; $F_ф$ – площадь поперечного сечения фильтруемого пространства, м^2; $\tau_п$ – время фильтрации, ч.

Изучено влияние ПАВ на выщелачивание металла. Для этого лабораторная колонка заполнялась керновой пробой. Перед исследованиями отобрана средняя проба руды с целью определения влажности и содержания полезного компонента (ПК).

С помощью винтов и резиновых прокладок достигалась плотная герметизация колонки. Отверстие для подачи раствора закрывалось лавсановым фильтром. В процессе загрузки фиксировалась влажность руды.

Во время проведения опыта реагент (рабочий раствор) подавался через нижний штуцер колонки из напорной емкости с момента поступления раствора в колонку.

Осуществлялся отбор проб жидкости для определения содержания извлекаемого компонента, pH, ОВП [5–8]. Анализ проведенных исследований показал, что концентрация ПК в растворе зависит от показателя pH среды и от величины Ж : Т (рис. 1).

Измерение краевых углов смачивания θ производилось гониометрическим методом. Установлен краевой угол смачивания горных пород методом проекции капли.

Таблица 2. Зависимость вязкости растворов от типа и концентрации ПАВ
Table 2. Dependence of solutions viscosity on the type of surfactants concentration

Состав раствора	Концентрация ПАВ, мг/л				Кинематическая вязкость, сСт			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Раствор без добавки ПАВ	–	–	–	–	16,88	16,88	16,88	16,88
Раствор + Сдж-1	5	10	15	20	16,88	16,91	16,81	16,73
Раствор + Сдж-2	5	10	15	20	16,67	16,67	16,70	16,73
Раствор + Сдж-3	5	10	15	20	16,27	16,17	16,40	16,53
Раствор + ПАА производства АО «Навоиазот»	5	10	15	20	16,87	17,00	17,70	17,73
Раствор + ОП-10	5	10	15	20	17,00	16,80	16,75	16,73
Раствор + сульфанол	5	10	15	20	16,00	15,50	15,00	14,00

В примечании фиксировались физико-химические изменения растворов (цвет, механические взвеси, помутнение и т. д.).

Каплю жидкости на горизонтальной исследуемой поверхности проецировали на экран и по фотографии или рисунку определяли угол между касательной к капле в точке соприкосновения трех фаз и поверхностью образца. Точность такого определения оценивалась в 1°–5°. Угол θ определяли по высоте h капли и радиусу площади контакта капли с исследуемой поверхностью $r_к$ (рис. 2), пользуясь формулами:

$$\text{– при } \theta < 90° \qquad \cos\theta = \frac{r_к^2 - h^2}{r_к^2 + h^2};$$

$$\text{– при } \theta > 90° \qquad \cos\theta = 1 - h/r_к .$$

Для капли малого размера, когда можно пренебречь ее деформацией за счет действия гравитации, $\operatorname{tg}\theta = h/r_к$.

Для измерения параметров капли h и $r_к$ использовался микроскоп с горизонтальной оптической осью. Для измерения краевых углов смачивания поверхности использовался гониометр, смонтированный на основе микроскопа МИН-4. Схема гониометра показана на рис. 2.

Процедура измерения угла смачивания состояла в следующем. Исследуемый образец *1* помещался на предметный столик *2* гониометра. На поверхность образца с помощью пипетки капали смачивающую жидкость *3*. При этом учитывали, что радиус капли r не должен превышать капиллярную постоянную для данной жидкости, чтобы свести к минимуму искажение формы капли за счет гравитации:

$$r \le a = \sqrt{\sigma_ж / \rho_ж g},$$

где $\sigma_ж$ и $\rho_ж$ – соответственно поверхностное натяжение и плотность смачивающей жидкости; g – ускорение свободного падения.

При этом учитывали, что для воды $r \leq 3{,}8$ мм (масса капли не более 230 мг, а для глицерина $r \leq 3{,}2$ мм (170 мг).

С помощью винта настройки *4* добивались резкого изображения капли воды и проволочки, натянутой по диаметру вращающегося лимба *5*. Вращая лимб *5* и микрометрический винт *6*, регулирующий высоту предметного столика, совмещали изображение проволочки-диаметра с границей раздела *поверхность образца–воздух*, регистрируя соответствующий этому положению исходный угол поворота угломерного устройства θ_0 и отсчитывая его с помощью шкалы лимба *5* и нониуса *7*. Нониус позволял отсчитывать угол с точностью до 0,1°. Вращая лимб *5* по часовой стрелке и слегка перемещая вправо или влево предметный столик с образцом, устанавливали проволочку-диаметр в положение касательной к поверхности капли в точке соприкосновения трех фаз (твердой, жидкой и газообразной). Отсчитывали соответствующий этому положению лимба угол θ_1.

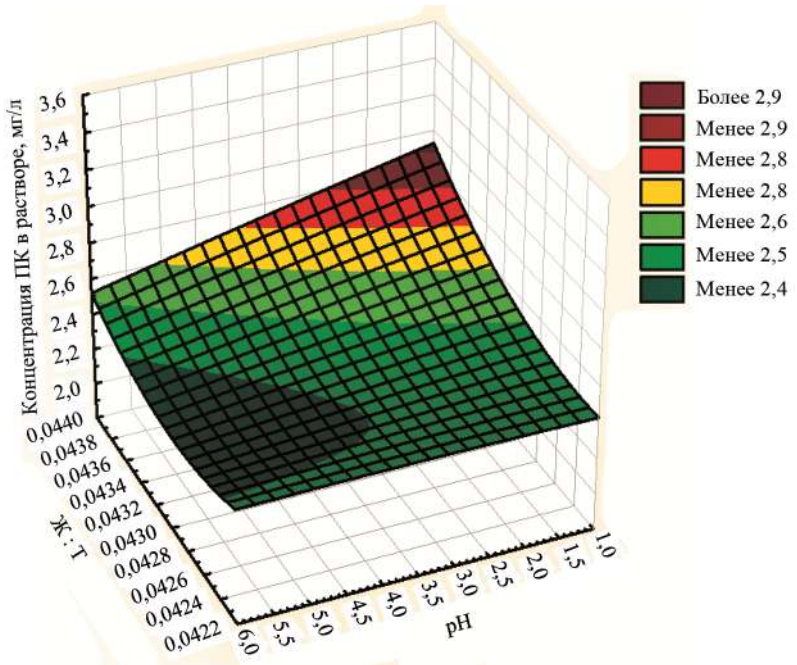


Рис. 1. Зависимость концентрации полезного компонента (ПК) в растворе от показателя pH среды и от соотношения Ж : Т
Fig. 1. Dependence of the concentration of a valuable component in the solution on medium ph and on Ж : T ratio

Результирующий угол смачивания определялся как модуль разности θ_0 и θ_1:

$$\theta = \left|\theta_0 - \theta_1\right|.$$

Результаты опытов показали, что равновесное (стационарное) значение краевого угла смачивания устанавливается не сразу: в течение некоторого времени θ изменяется за счет растекания капли. Время установления стационарного значения угла смачивания для каждой пары *поверхность–жидкость* следует определять экспериментально, измеряя величину θ через определенные промежутки времени после нанесения капли. Кинетика растекания жидкости по поверхности

наряду с равновесным значением θ может быть полезной характеристикой поверхности [9–12].

Для оценки воспроизводимости экспериментальных результатов θ измеряли 5–10 раз на одной и той же поверхности, рассчитывая на основании этих измерений среднее значение θ и границы доверительного интервала θ.

В силу энергетической неоднородности поверхности твердых образцов периметр смачивания заметно отличался от окружности и углы смачивания в разных точках периметра капли были различны.

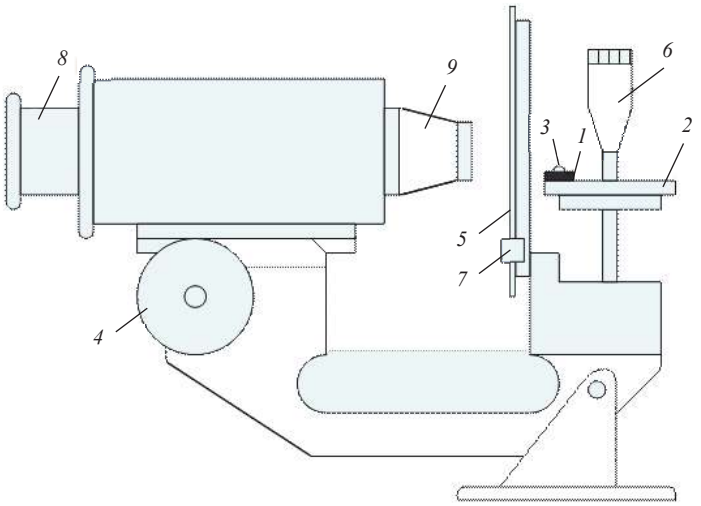
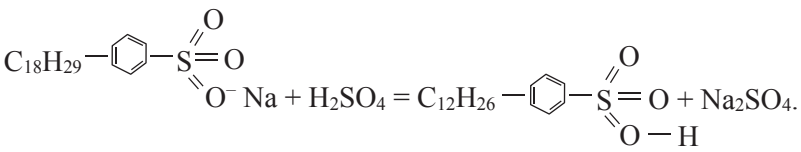


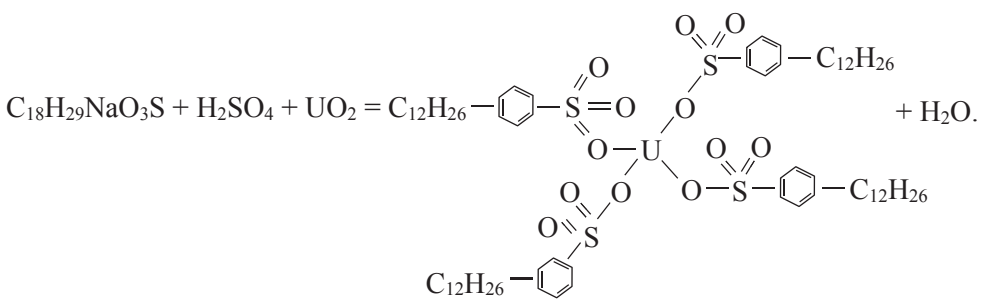
Рис. 2. Схема гониометра на основе микроскопа МИН-4:
1 – образец; *2* – предметный столик; *3* – капля жидкости; *4* – винт настройки резкости изображения; *5* – вращающийся лимб; *6* – микрометрический винт вертикального перемещения столика; *7* – конус; *8* – окуляр; *9* – объектив

Fig. 2. The scheme of a goniometer based on MIN-4 microscope:
1 – sample; *2* – stage; *3* – liquid drop; *4* – focus knob; *5* – adjustable limb; *6* – thumbscrew for stage vertical movement ; *7* – cone; *8* – eyepiece; *9* – objective

Уравнение химической реакции сульфанола ($C_{18}H_{29}NaO_3S$) с серной кислотой (H_2SO_4) выглядит следующим образом:



Уравнение химической реакции двуокиси (UO_2) с выщелачивающими растворами:



Выщелачивание из глинистых руд происходит по диффузионному режиму и описывается уравнением диффузии. Для этого воспользовались решением диффузионного уравнения для выщелачивания урана с одной поверхности пласта мощностью m при следующих граничных условиях: $c = 0$ при $x = 0$ и $t \geq 0$ [13].

Выводы. Проведенное исследование ПАВ показало, что применение сульфанола позволило увеличить коэффициент фильтрации до 2 м/сут.

Предлагаемая методика определения краевого угла смачивания позволяет выявить влияние ПАВ на коэффициент фильтрации при подземном выщелачивании.

В целях повышения эффективности процесса выщелачивания урана из слабопроницаемых руд предлагается провести практические исследования на полигонах ПВ месторождения Кетмончи с применением ПАВ (сульфанола).

При опытно-промышленном выщелачивании урана в слабопроницаемых рудах предполагается увеличить степень отработки запасов с 12–16 % до 22–25 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Геотехнология. Кучное выщелачивание бедного минерального сырья / Л. И. Водолазов [и др.]. М.: МГГА, 1999. 300 с.

2. Амиян В. А., Амиян А. В. Повышение производительности скважин. М.: Недра, 1986. 304 с.

3. Бабичев Н. И. Управление состоянием горных массивов в геотехнологии. М.: МГРИ, 1989. 48 с.

4. Калабин А. И. Добыча полезных ископаемых подземным выщелачиванием и другими геотехнологическими методами. М.: Атомиздат, 1981. 304 с.

5. Комплексы подземного выщелачивания / И. Г. Абдульманов [и др.]. М.: Недра, 1992. 263 с.

6. Абрамов С. К., Бабушкин В. Д. Методы расчета притока воды к буровым скважинам. М.: Госстройиздат, 1955. 285 с.

7. Абрамов С. К., Алексеев В. С. Забор воды из подземного источника. М.: Колос, 1980. 239 с.

8. Малухин Н. Г., Маркелов С. В., Аликулов Ш. Ш. Обоснование рациональной области применения технологии подземного выщелачивания глинистых урановых руд // ГИАБ. 2011. № 10. С. 220–224.

9. Алексеев В. С., Гаврилко В. М., Гребенников В. Т. Рекомендации по восстановлению производительности скважин реагентными методами. М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1975. 94 с.

10. Алексеев В. С., Гребенников В. Т. Восстановление дебита водозаборных скважин. М.: Агропромиздат, 1987. 239 с.

11. Sillen L. G. and Martell A. E. Stability constants of metal ion complexes. Supplement no. 1, part I. Inorganic ligands. The Chemical Society, London, 1971.

12. U. Kyaw Win and Kirwin D. J. Exploration, geology and mineralization of the Monywa copper district, Central Myanmar. (Porter T. M, ed.) Porphuru and hyudrothermal copper and gold deposits – a global perspective: conf. proc., AMF, Adelaide, 1998. P. 61–73.

13. Mullen M. E., Wolf D. C., Ferris F. G., Beveridge T. J., Fleming C. A., Bailey G. W. Bacterial sorption of heavy metals. Appl. Environ. Microbiol. 1989. Vol. 55. No. 12. P. 3142–3149.

Поступила в редакцию 20 августа 2018 года

Сведения об авторах:

Аликулов Шухрат Шарофович – кандидат технических наук, доцент кафедры техники и технологии добычи руд редких и радиоактивных металлов Навоийского государственного горного института. E-mail: sharofovich@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-48-54

Laboratory researches on the application of surfactants of uranium underground leaching from weakly permeable ores

Shukhrat Sh. Alikulov[1]

[1] Navoiy State Mining Institute, Navoiy, Republic of Uzbekistan.

Abstract

Introduction. *In the practice of underground leaching (UL) of uranium ores, it is known that the efficiency of the process of UL of weakly permeable clay ore-bearing rocks in natural occurrence depends, in the main, on the filtration properties of the ore formation. Laboratory research on surfactants application for production strata filtration properties increase have been conducted.*

Research aims *to intensify the technological processes of uranium underground leaching from weakly permeable ores with the use of surfactants.*
Methodology. *The results of the laboratory research showed a positive effect from the technology used for underground uranium leaching, which allows increasing the rate of uranium leaching in weakly permeable clay rocks, the leaching rate is thereby not limited by the rate of solution filtration, because the removal of uranium into the solution is mainly due to its diffusion to the contact surface of ores with permeable rocks.*
Summary. *As a result of the research, a method has been developed for mining uranium deposits by the method of underground leaching in weakly permeable ores with the use of various reagents (surfactants based on polycarboxylates), which makes it possible to improve the permeability of rocks and increase the yield of pumping wells.*

Key words: *well; viscosity of the solution; surfactants; weakly permeable ores; filtration; clay rocks; underground leaching.*

REFERENCES

1. Vodolazov L. I. et al. *Geotechnology. Heap leaching of poor mineral raw material*. Moscow: MSMU Publishing; 1999. (In Russ.)
2. Amiian V. A., Amiian A. V. *Improving the productivity of wells*. Moscow: Nedra Publishing; 1986. (In Russ.)
3. Babichev N. I. *Rock massifs management in geotechnology*. Moscow: MGRI Publishing; 1989. (In Russ.)
4. Kalabin A. I. *Mineral production by the underground leaching and other geotechnological methods*. Moscow: Atomizdat Publishing; 1981. (In Russ.)
5. Abdulmanov I. G. et al. *Underground leaching complexes*. Moscow: Nedra Publishing; 1992. (In Russ.)
6. Abramov S. K., Babushkin V. D. *Methods of calculating well inflows*. Moscow: Gosstroiizdat Publishing; 1955. (In Russ.)
7. Abramov S. K., Alekseev V. S. *Withdrawal of water from the underground source*. Moscow: Kolos Publishing; 1980. (In Russ.)
8. Malukhin N. G., Markelov S. V., Alikulov Sh. Sh. Substantiation of rational area of application of method of underground leaching of uranium from clay ores. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2011; 10: 220–224. (In Russ.)
9. Alekseev V. S., Gavrilko V. M., Grebennikov V. T. *Recommendations on well productivity restoration using chemical reagent treating methods*. Moscow: NII VODGEO Publishing; 1975. (In Russ.)
10. Alekseev V. S., Grebennikov V. T. *Water intake wells yield restoration*. Moscow: Agropromizdat Publishing; 1987. (In Russ.)
11. Sillen L. G. and Martell A. E. *Stability constants of metal ion complexes. Supplement no. 1, part I. Inorganic ligands*. The Chemical Society, London, 1971.
12. U. Kyaw Win and Kirwin D. J. *Exploration, geology and mineralization of the Monywa copper district, Central Myanmar*. (Porter T. M, ed.) Porphuru and hyudrothermal copper and gold deposits – a global perspective: conf. proc., AMF, Adelaide, 1998. P. 61–73.
13. Mullen M. E., Wolf D. C., Ferris F. G., Beveridge T. J., Fleming C. A., Bailey G. W. Bacterial sorption of heavy metals. *Appl. Environ. Microbiol*. 1989; 55 (12): 3142–3149.

Received 20 August, 2018

Information about authors:

Shukhrat Sh. Alikulov – PhD (Engineering), associate professor of the Department of Equipment and Technology for the Production of Rare and Radioactive Metals, Navoiy State Mining Institute. E-mail: sharofovich@mail.ru

Для цитирования: Аликулов Ш. Ш. Лабораторные исследования применения поверхностно-активных веществ для подземного выщелачивания урана из слабопроницаемых руд // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 3. С. 48–54. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-48-54
For citation: Alikulov Sh. Sh. Laboratory researches on the application of surfactants of uranium underground leaching from weakly permeable ores. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 3: 48–54 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-48-54

ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ И НЕФТЕГАЗОВАЯ ГЕОЛОГИЯ, ГЕОФИЗИКА

УДК 553.048 DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-55-63

Система цифрового кодирования генетической классификации видов торфа и ее роль в комплексной оценке запасов торфа по категориям сырья и направлениям использования

Егошина О. С.[1]*, Александров Б. М.[1]
[1] Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия
e-mail: moc-olya@yandex.ru

Реферат

Введение. *Использование торфа в различных отраслях возможно только при существовании единой структуры, учитывающей водно-физические, теплофизические, физико-технические, химические и другие свойства, элементный состав, групповой состав органической и зольной части торфа, классификацию видов торфа и категорию торфяного сырья. Только зная параметры, характеризующие торф как сырье для переработки, можно решать задачу его комплексного использования.*

Предмет исследований *– категории торфяного сырья, их компоненты и возможность использования в составе различных видов продукции.*

Цель работы. *Основываясь на генетической классификации, разработать методику эффективной обработки исходной геологической информации и прогнозирования выбора первоочередного участка по добыче наиболее востребованного вида торфа.*

Методология. *Проведен анализ отечественного и зарубежного опыта по изучению компонентов торфа, их получению и использованию. Для совершенствования методики подсчета запасов использовались возможности Microsoft Excel, способствующие автоматизации определения категорий и состава торфа по данным, полученным в результате детальной разведки, а также 3D-моделирование с использованием горно-геологической информационной системы (ГГИС) Micromine.*

Результаты. *В статье представлены: цифровая кодировка классификации видов торфа, графическое изображение видов торфа, фрагмент таблицы с исходными данными детальной разведки торфяного месторождения Ольческое Свердловской области, поперечный разрез торфяного месторождения Ольческое по степени разложения, выполненный с использованием ГГИС Micromine.*

Выводы. *Результаты работы, изложенные в статье, открывают широкую перспективу в применении современных программ для автоматизированной обработки исходной геологической информации.*

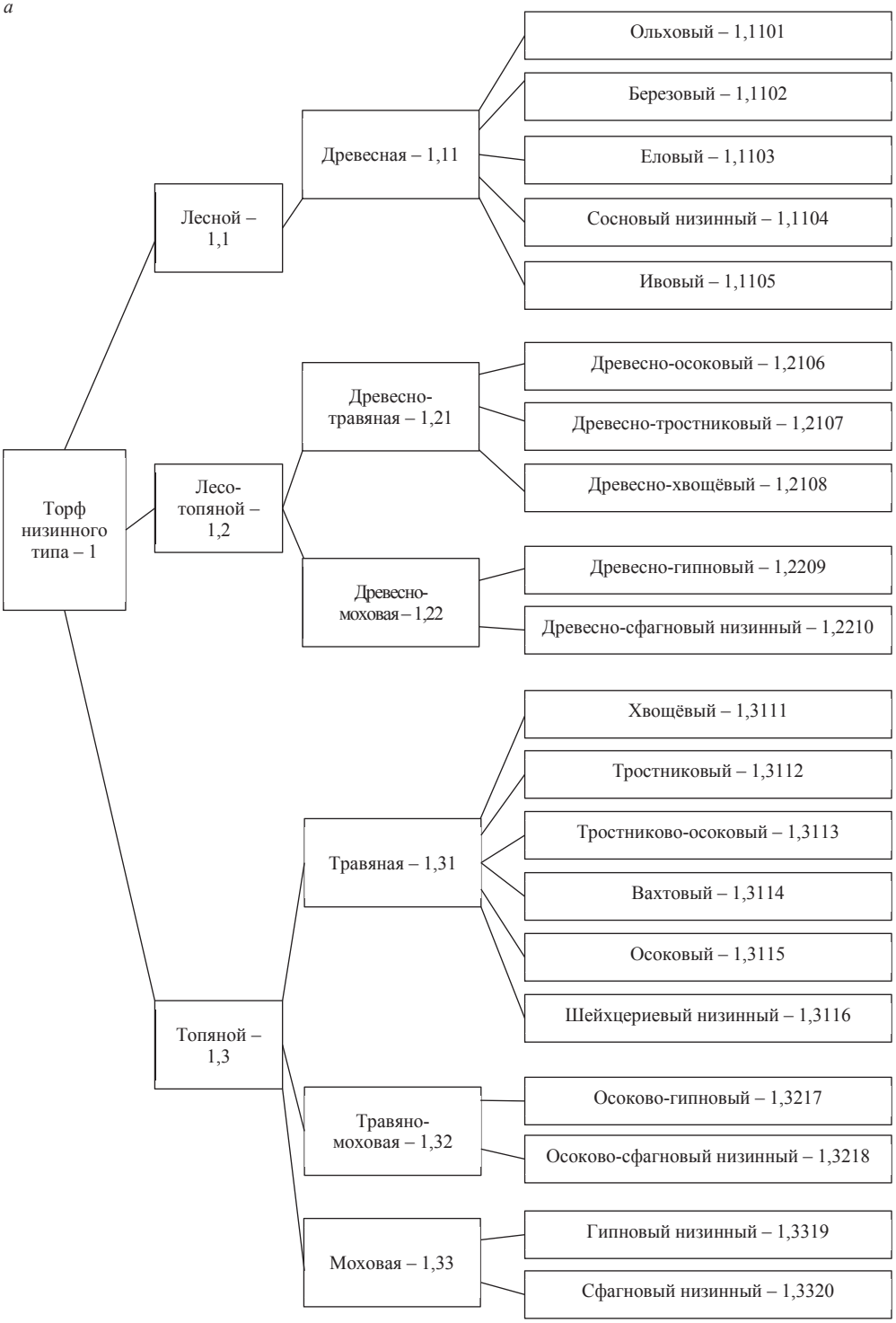
Ключевые слова: *система цифрового кодирования генетической классификации видов торфа; горно-геологические информационные системы; стратиграфический профиль.*

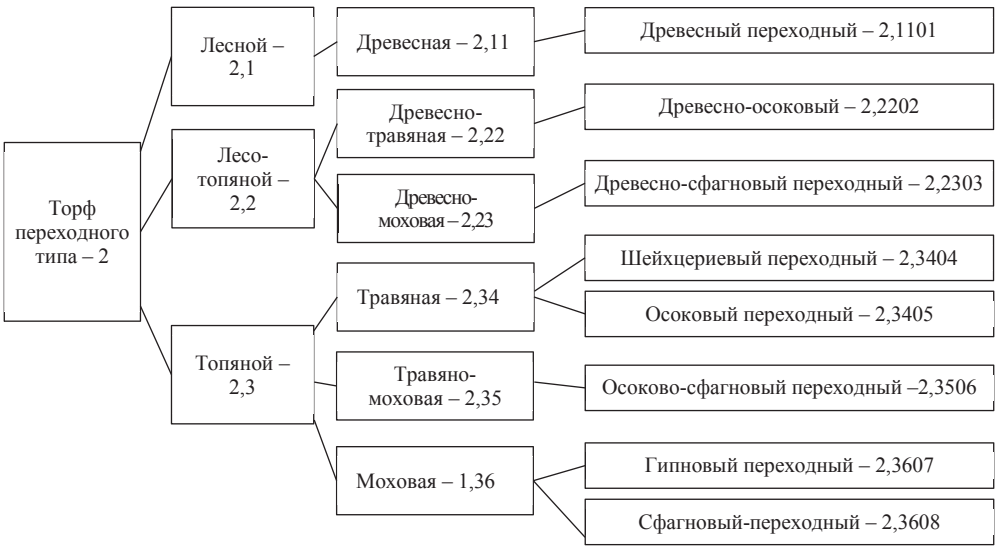
Введение. В настоящее время все острее становится проблема рационального использования природных ресурсов, включая возобновляемые и исчерпаемые органо-минеральные полезные ископаемые, к которым относится торф.

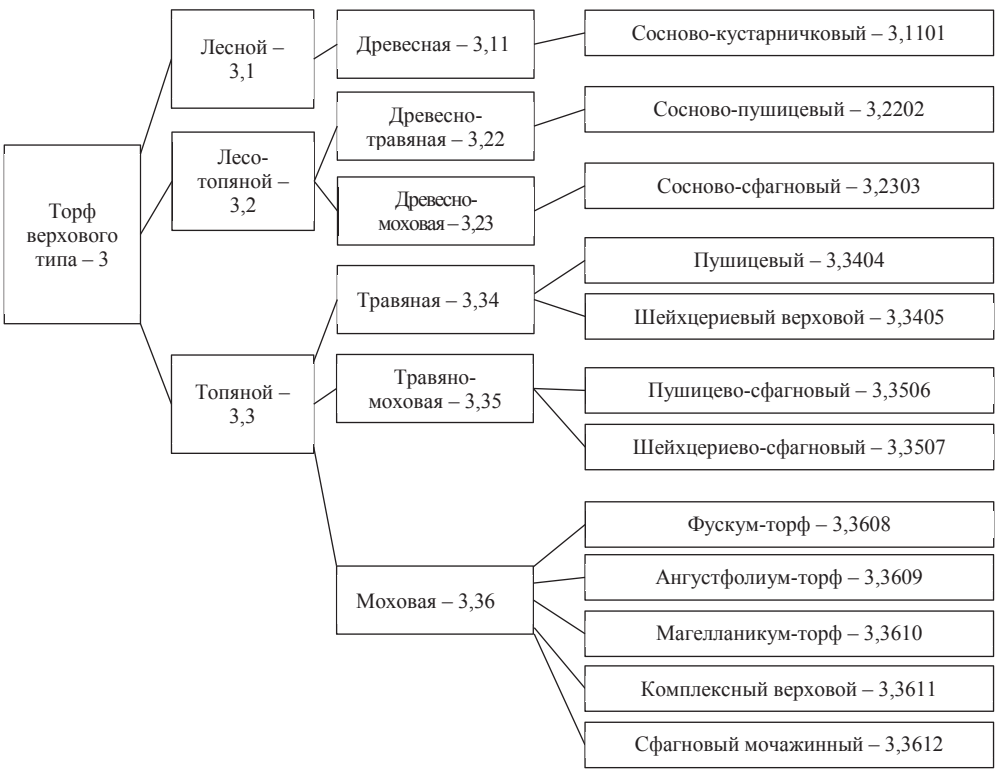
Перед современной торфяной отраслью ставится задача качественной и количественной оценки торфа как сырья для комплексной переработки.

Как полезное ископаемое органического происхождения, торф занимает особое место ввиду сложности состава, неоднородности структур и наличия

а


Торф низинного типа – 1
Лесной – 1,1
Древесная – 1,11
Ольховый – 1,1101
Березовый – 1,1102
Еловый – 1,1103
Сосновый низинный – 1,1104
Ивовый – 1,1105
Лесо-топяной – 1,2
Древесно-травяная – 1,21
Древесно-осоковый – 1,2106
Древесно-тростниковый – 1,2107
Древесно-хвощёвый – 1,2108
Древесно-моховая – 1,22
Древесно-гипновый – 1,2209
Древесно-сфагновый низинный – 1,2210
Топяной – 1,3
Травяная – 1,31
Хвощёвый – 1,3111
Тростниковый – 1,3112
Тростниково-осоковый – 1,3113
Вахтовый – 1,3114
Осоковый – 1,3115
Шейхцериевый низинный – 1,3116
Травяно-моховая – 1,32
Осоково-гипновый – 1,3217
Осоково-сфагновый низинный – 1,3218
Моховая – 1,33
Гипновый низинный – 1,3319
Сфагновый низинный – 1,3320


Торф переходного типа – 2
Лесной – 2,1
Лесо-топяной – 2,2
Топяной – 2,3
Древесная – 2,11
Древесно-травяная – 2,22
Древесно-моховая – 2,23
Травяная – 2,34
Травяно-моховая – 2,35
Моховая – 1,36
Древесный переходный – 2,1101
Древесно-осоковый – 2,2202
Древесно-сфагновый переходный – 2,2303
Шейхцериевый переходный – 2,3404
Осоковый переходный – 2,3405
Осоково-сфагновый переходный –2,3506
Гипновый переходный – 2,3607
Сфагновый-переходный – 2,3608


Торф верхового типа – 3
Лесной – 3,1
Лесо-топяной – 3,2
Топяной – 3,3
Древесная – 3,11
Древесно-травяная – 3,22
Древесно-моховая – 3,23
Травяная – 3,34
Травяно-моховая – 3,35
Моховая – 3,36
Сосново-кустарничковый – 3,1101
Сосново-пушицевый – 3,2202
Сосново-сфагновый – 3,2303
Пушицевый – 3,3404
Шейхцериевый верховой – 3,3405
Пушицево-сфагновый – 3,3506
Шейхцериево-сфагновый – 3,3507
Фускум-торф – 3,3608
Ангустфолиум-торф – 3,3609
Магелланикум-торф – 3,3610
Комплексный верховой – 3,3611
Сфагновый мочажинный – 3,3612

б

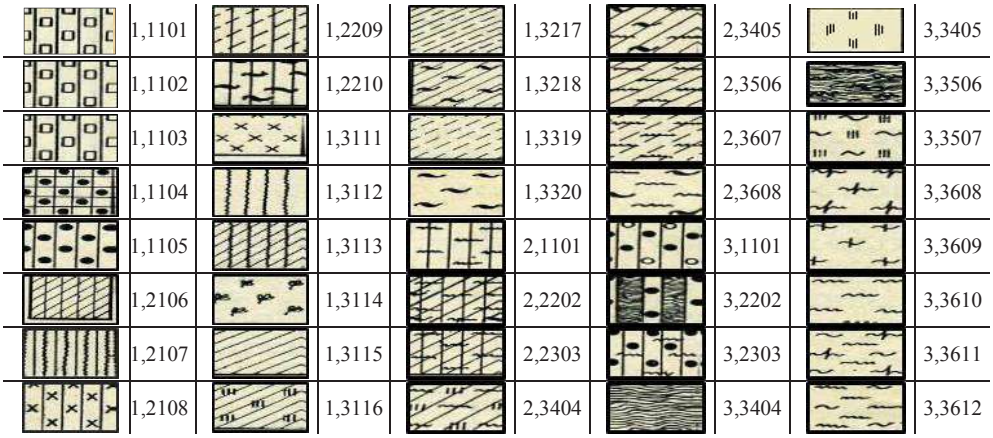


Рис. 1. Классификация видов торфа: *а* – цифровая кодировка; *б* – графическое изображение видов торфа

Fig.1. Peat types classification: *a* – digital coding; *б* – graphical representation of peat types

комплекса органических веществ (битумов, гуминовых кислот и др.), которые могут широко использоваться в химической промышленности, сельском хозяйстве, машиностроении, медицине, металлургии и т. д. В народном хозяйстве могут найти применение химические элементы зольной части торфа, включая микроэлементы.

Растительный покров торфяных месторождений подразделяется на фитоценозы, представляющие собой сочетания видов растений-торфообразователей, сложившиеся в результате взаимодействия с окружающей средой в конкретных природно-климатических условиях, и имеющие определенный состав и структуру. Все виды торфа объединяются в три типа – верховой, переходный, низинный. В основу классификации видов торфа положен генетический принцип, заключающийся в том, что каждый фитоценоз соответствует определенному виду торфа. Согласно существующей классификации [1], в настоящее время выделено 40 видов торфа, из них 20 видов низинного типа, 8 – переходного и 12 – верхового.

Наличие большого количества видов торфа и сложность структурной схемы классификации (рис. 1) вызывает определенные трудности для обработки материалов детальной разведки торфяных месторождений с использованием современных горно-геологических информационных систем (ГГИС) и построения стратиграфических профилей торфяного месторождения.

Цель работы – основываясь на генетической классификации, разработать методику эффективной обработки исходной геологической информации и прогнозирования выбора первоочередного участка по добыче наиболее востребованного вида торфа.

Методология. Для ввода исходной геологической информации, а также для расшифровки информации, содержащейся в стратиграфических профилях торфяного месторождения, была разработана определенная система кодирования.

В 1982 г. была впервые предложена методика цифрового кодирования классификации видов торфа [2], что позволило на ЭВМ того периода (ЕС-1020) построить стратиграфический профиль низинного типа торфа. Суть кодирования заключается в том, чтобы, сохранив структурную схему классификации видов торфа, включая тип торфа, подтип по виду растительности, группу по зольности и т. д., преобразовать ее в форму, приемлемую для работы с использованием ГГИС (рис. 1).

Используя Приложение 4 Методических указаний по опробованию торфяной залежи с применением сборных проб и разделению запасов торфа на категории

сырья при разведке торфяных месторождений [3], автор предлагает форму заполнения исходной геологической информации по материалам детальной разведки торфяных месторождений в следующем виде (фрагмент представлен в таблице).

На современном этапе развитие торфяного производства должно быть связано с расширением областей применения торфа в народном хозяйстве. В свою очередь, развитие технологии добычи и переработки должно базироваться на совершенствовании существующих способов добычи и внедрении принципиально новых, снижающих зависимость результативности производства от неблагоприятных природно-климатических условий. Вскрыть и использовать потенциальные возможности, заложенные в торфе самой природой, на базе разработки новых технологий добычи и переработки – одна из важных задач, стоящих перед учеными и производственниками.

Исходные данные детальной разведки торфяного месторождения Ольческое Свердловской области

Basic data from Olcheskoye peat deposit (Sverdlovsk region) detailed survey

Пункт опробования/ поперечник	Глубина, м	Степень разложения, %	Зольность, %	Влажность, %	Генетический код			Категория торфяного сырья
					тип торфа	подтип, группа	подтип, группа, вид	
1/поп.2	0,25	–	–	–	–	–	–	
	0,50	10,0	1,80	93,0	3,1101	3,11	3,1101	В-0-1
	0,75	15,5	2,0	92,5	3,1101	3,11	3,1101	В-1-(1-2)
	1,00	15,5	2,0	92,5	3,1101	3,11	3,1101	В-1-(1-2)
	1,25	15,5	2,0	92,5	3,1101	3,11	3,1101	В-1-(1-2)
	1,50	15,5	2,0	92,5	3,1101	3,11	3,1101	В-1-(1-2)
	1,75	15,5	2,0	92,5	3,1101	3,11	3,1101	В-1-(1-2)
	2,00	15,5	2,0	92,5	3,1101	3,11	3,1101	В-1-(1-2)
	2,30	30,0	2,9	89,0	2,1101	2,11	2,1101	П-2-(1-2)
2/поп.5	0,25	–	–	–	–		–	
	0,50	15,0	1,9	93,0	2,1101	2,11	2,1101	П-1-(1-2)
	0,75	15,0	1,9	93,0	2,1101	2,11	2,1101	П-1-(1-2)
	1,00	15,0	1,9	11,0	2,1101	2,11	2,1101	П-1-(1-2)
	1,25	15,0	1,9	93,0	2,1101	2,11	2,1101	П-1-(1-2)
	1,40	15,0	1,9	93,0	2,1101	2,11	2,1101	П-1-(1-2)

Однако следует отметить, что решить задачу комплексного использования торфа можно только при объединении в единую структуру общетехнических, водно-физических, теплофизических, химических, физико-химических и других свойств, элементного состава, группового состава органической и зольной части торфа, т. е. классификации видов торфа и категорий торфяного сырья.

В табл. 1–4 [4] представлены следующие характеристики видов торфа и категорий торфяного сырья.

Общетехнические свойства: степень разложения (*R*, %); зольность (*Ac*, %); кислотность (*pH*); теплота сгорания (*Q*, МДж/кг).

Физические свойства: относительная влажность (*w*, %); влагосодержание (*W*, кг/кг); плотность торфа естественного залегания ($\rho_{ест}$, кг/м^3); плотность беспористой сухой массы торфа ($\rho_{тв}$, кг/м^3).

Элементный состав органической массы (в % на сухое вещество): углерод (C, %); водород (H, %); азот (N, %); сера (S, %); кислород (O, %).

Групповой состав органической массы, %: битумы (Б); водорастворимые и легкогидролизуемые компоненты (ВР и ЛГ); редуцирующие вещества (РВ); гуминовые кислоты (ГК); фульвокислоты (ФК); целлюлоза (Ц); лигнин (Л).

Состав зольной части (в % на сухое вещество): SiO_2; CaO; Fe_2O_3; Al_2O_3; P_2O_3; SO_2.

Содержание микроэлементов (в пересчете на сухое вещество), мг/кг: Zn; Cu; Mo; Co; Mn.

При наличии данных о свойствах торфа, которые увязаны с закодированными категориями торфяного сырья, появляется возможность использовать ГГИС при анализе пригодности того или иного вида торфа для комплексного использования. Возможности ГГИС позволяют построить 3D-модели по каждому из показателей в отдельности и по категориям в целом. На рис. 2 представлен поперечный разрез торфяного месторождения Ольческое, на котором отмечено распределение торфа различной степени разложения по глубинам.

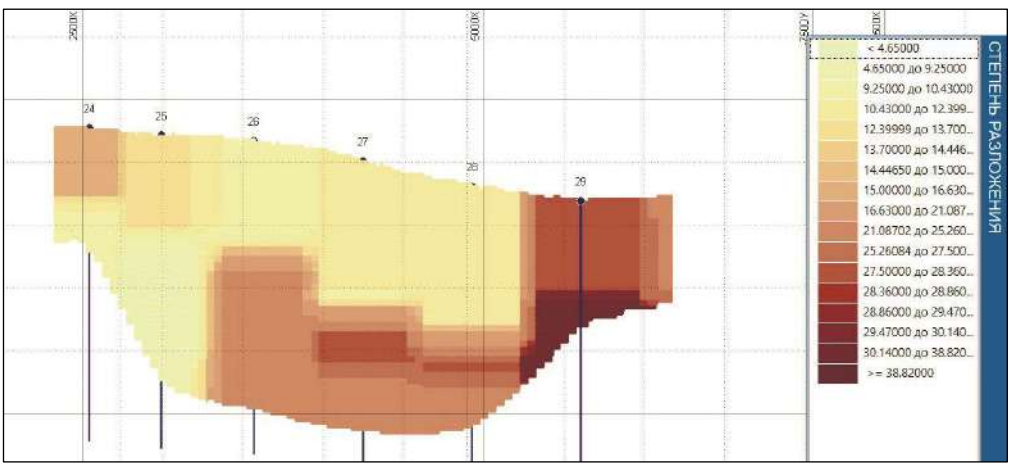


Рис. 2. Поперечный разрез торфяного месторождения Ольческое по степени разложения, %
Fig 2. Cross-section of Olcheskoye peat deposit according to the degree of peat decay, %

Следует отметить, что на современном уровне развития науки и техники требуется совершенствование структуры категорий торфяного сырья, так как степень разложения и зольность, которые заложены в основу классификации категорий торфяного сырья не в состоянии отразить всю гамму свойств торфа и возможностей использования его и продуктов его переработки в народном хозяйстве страны.

Результаты. Изложенное в статье подтверждает реальную возможность построения стратиграфических профилей торфяных месторождений с использованием ГГИС, что открывает широкую перспективу в применении современных программ для автоматизированной обработки исходной геологической информации в процессе изысканий торфяных месторождений и позволяет сократить время обработки этой информации и выбора первоочередного участка.

Для комплексной оценки запасов торфа появляется возможность анализировать строение стратиграфических профилей с применением ГГИС и рассчитывать запасы торфа по категориям сырья заданного качества, а также вести селективную добычу торфа заданного качества по приоритетности и значимости для того или иного региона страны. При проектировании предприятий по добыче торфа появляется возможность прогнозирования выбора первоочередного участка по добыче наиболее перспективного вида торфа для комплексной его переработки [4].

Анализ и обсуждение. Вопросы комплексного использования торфа в народном хозяйстве страны достаточно широко отражены в научной литературе. Аналитический обзор литературы позволяет отметить наиболее перспективные решения, которые могут быть внедрены и внедряются в промышленных масштабах [4–8]. Традиционное направление использования торфа в качестве топлива для энергетических, металлургических и коммунально-бытовых целей сохраняется, хотя объемы его использования невелики, и торф как топливо остается менее востребованным, чем он того заслуживает в современных условиях. Наиболее выгодным видом топлива является торф переходного и низинного типов, лесного и лесо-топяного подтипов, что соответствует категориям торфяного сырья П-3-(1-2) и П-(2-3)-(1-2), Н-3-(2-3), Н-(2-3)-(2-3). Торф данных категорий, содержащий большое количество битумов, гуминовых кислот и негидролизуемый остаток, характеризуется высокой теплотой сгорания 22–24 МДж/кг. Элементный состав включает 58–60 % углерода, 31,3–32,5 % кислорода, 5,8–6,0 % водорода, 2,2–2,6 % азота, 0,3– 0,7 % серы.

В публикациях [9, 10] раскрыта взаимосвязь генетической классификации видов торфа, промышленной классификации категорий торфяного сырья с общетехническими и физико-химическими свойствами торфа на примере торфяного месторождения Сметанинское Пермского края, а также методика расчета компонентов торфа по данным детальной разведки месторождения.

Исследованиям толщины, распределению и качественной оценке торфяных ресурсов Бангладеш посвящена статья [11]. Авторами отмечена зависимость толщины слоя торфа от геоморфологии местности и приводятся подтверждения в виде поперечных профилей, где торф не имеет подразделения на отдельные категории [11].

Использование возможностей ГГИС для изучения запасов торфяного месторождения – это новое направление. Обычно трехмерное изображение геологического строения исследуемого участка не предусматривает деление торфа на отдельные категории, а представляет его единым слоем [12]. Однако таким образом не учитываются все свойства отдельных категорий, которые определяют направление использования торфяного сырья. Именно поэтому важно учитывать общетехнические, физические свойства торфа, компоненты зольной и органической составляющих.

Выводы. Торф как комплексное сырье далеко не исчерпал свои возможности с учетом многообразия его видов, природно-климатических условий его формирования, геологических и гидрологических факторов, фитоценоза и других природных особенностей формирования торфяных месторождений. Предложенная методика, основанная на системе цифрового кодирования и использования ГГИС, позволяет решить задачи селективной выборки категорий торфа по годам с учетом критериев ресурсосбережения и востребованности отдельных видов торфяного сырья, напрямую зависящей от общетехнических и физических свойств торфа, а также от элементного состава органической массы, компонентов зольной составляющей и т. д. Управление свойствами торфяной продукции должно осуществляться путем выбора исходного сырья и способов добычи торфа отдельных категорий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник по торфу / под ред. А. В. Лазарева, С. С. Корчунова. М.: Недра, 1982. 760 с.

2. Александров Б. М. Построение стратиграфического профиля торфяного месторождения на ЭВМ // Известия вузов. Горный журнал.1984. № 2. С. 17–21.

3. Методические указания по опробованию торфяной залежи с применением сборных проб и разделению запасов торфа на категории сырья при разведке торфяных месторождений. М.: Мин. геологии РСФСР, 1979. 80 с.

4. Александров Б. М. Торф как сырье комплексной переработки // Известия вузов. Горный журнал. 1992. № 9. С. 35–44.

5. Косов В. И., Баженова Э. В. Исследование очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов с применением модификаций торфяных сорбентов // Вода и экология: проблемы и решения. 2001. № 1 (6). С. 40–46.

6. Misnikov O. S., Chertkova E. U., Dmitriev O. V. Use of peat ingredients for production of fire-extinguishing powders. Eurasian Mining. 2015. Vol. 1. No. 2. P. 30–34.

7. Александров Б. М. Проектирование торфопредприятий и основы САПР. Свердловск: СГИ, 1989. 104 с.

8. Гамаюнов С. Н., Мисников О. С., Пухова О. В. Перспективные направления использования продукции на основе гранулированного торфа // Горный журнал. 1999. № 10. С. 41–44.

9. Александров Б. М. Аналитические исследования состава зольной составляющей твердой фазы торфа для оценки возможности использования в народном хозяйстве // Агропродовольственная политика России. 2017. № 5. С. 110–116.

10. Егошина О. С., Александров Б. М. Определение группового состава органической массы торфа на основе генетической классификации с учетом данных детальной разведки // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 1. С. 15–21.

11. Maitra M. K., Islam M. A. and Mamun M. A. Thickness, distribution and quality assessment of gopalganj-madaripur peat deposits: a case study of potential economic opportunities in mid-eastern low-lying Bangladesh // International Journal of Geosciences. 2014. No. 5. 943–955.

12. Mohammed Masum, Mohammad Omer Faruk Khan, Md. Nazwanul Haque, Md. Faruk Hasan, Anwar Sadat Md. Sayem, Md. Azhar Hossain Assistant Director. Peat resources, condition of deposition as well as their utilization, Hakaluki Haor, Moulvibazar and Sylhet District, Bangladesh // International Journal of Science, Technology and Society. 2014. Vol. 2. No. 6. P. 210–215.

Поступила в редакцию 14 ноября 2018 года

Сведения об авторах:

Егошина Ольга Сергеевна – старший преподаватель кафедры природообустройства и водопользования Уральского государственного горного университета. E-mail: moc-olya@yandex.ru
Александров Борис Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры природообустройства и водопользования Уральского государственного горного университета. E-mail: ief.pro@m.ursmu.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-55-63

Digital coding system of peat types genetic classification and its role in peat reserves integrated assessment according to raw material categories and uses

Olga S. Egoshina[1], Boris M. Aleksandrov[1]
[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. *The use of peat in various fields is possible only with the presence of a single structure considering hydrophysical, thermophysical, physical-technical, chemical, and other properties, elemental composition and group composition of organic and ash matters of peat, classification of peat types and peat raw material category. Only with the knowledge of the parameters characterizing peat as raw material for processing, it is possible to solve the problem of its complex application.*

Research subject: *categories of peat raw material, their components and the possibility of using various types of products in its composition.*

Research aim. *Building upon the genetic classification, research aims to develop the methods of initial geological information effective processing and forecasting the choice of top-priority sites of top requested peat production.*

Methodology. *Local and foreign experience over the study of peat components, their recipience and application has been analysed. In order to improve reserves calculation methods, Microsoft Excel features were used computerizing the determination of peat categories and composition according to the data obtained as a result of the detailed survey as well as 3D simulation with the use of mining-geological information system (MGIS) Micromine.*

Results. *The article presents the following: digital coding of peat types classification, graphical representation of peat types, a fragment of a table with the basic data from Olcheskoye peat deposit (Sverdlovsk region) detailed survey, cross-section of Olcheskoye peat deposit according to the degree of peat decay made with the use of MGIS Micromine.*

Summary. *Research results, set out in the present article, open prospect of applying modern programs for geological data automated processing.*

Key words: *digital coding system for peat types genetic classification; mining-geological information systems; stratigraphic profile.*

REFERENCES
1. Lazarev A. V., Korchunov S. S. (eds.) *Peat reference*. Moscow: Nedra Publishing; 1982. (In Russ.)
2. Aleksandrov B. M. Building a stratigraphic profile of a peat deposit on the computer. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 1984; 2: 17–21. (In Russ.)
3. *Methodical guidance on peat deposit sampling with the use of composite samples and peat reserves separation into the categories of raw material during peat deposits exploration. RSFSR Ministry of Geology*. Moscow; 1979. (In Russ.)
4. Aleksandrov B. M. Peat as a raw material for integrated processing. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 1992; 9: 35–44. (In Russ.)
5. Kosov V. I., Bazhenova E. V. Study of wastewater treatment of heavy metal ions using a modification of peat sorbent. *Voda i ekologiia: problemy i resheniia = Water and Ecology: Problems and Solutions*. 2001; 1 (6): 40–46. (In Russ.)
6. Misnikov O. S., Chertkova E. U., Dmitriev O. V. Use of peat ingredients for production of fire-extinguishing powders. *Eurasian Mining*. 2015; 1 (2): 30–34.
7. Aleksandrov B. M. *Designing peat enterprises and the fundamentals of CAD*. Sverdlovsk: SSI Publishing; 1989. (In Russ.)
8. Gamaiunov S. N., Misnikov O. S., Pukhova O. V. Promising directions of applying products based on granulated peat. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 1999; 10: 41–44. (In Russ.)
9. Aleksandrov B. M. Analytical study of the composition of ash component of peat solid phase to assess the possibility of using it in national economy. *Agroprodovolstvennaia politika Rossii = Agro-Food Policy in Russia*. 2017; 5: 110–116. (In Russ.)
10. Egoshina O. S., Aleksandrov B. M. The determination of peat organic matter group composition based on genetic classification with the account of the data from the detailed survey. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2018; 1: 15–21. (In Russ.)
11. Maitra M. K., Islam M. A. and Mamun M. A. Thickness, distribution and quality assessment of gopalganj-madaripur peat deposits: a case study of potential economic opportunities in mid-eastern low-lying Bangladesh. *International Journal of Geosciences*. 2014; 5: 943–955.
12. Mohammed Masum, Mohammad Omer Faruk Khan, Md. Nazwanul Haque, Md. Faruk Hasan, Anwar Sadat Md. Sayem, Md. Azhar Hossain Assistant Director. Peat resources, condition of deposition as well as their utilization, Hakaluki Haor, Moulvibazar and Sylhet District, Bangladesh. *International Journal of Science, Technology and Society*. 2014; 2 (6): 210–215.

Received 14 November, 2018

Information about authors:

Olga S. Egoshina – senior lecturer, Department of Environmental Engineering and Water Consumption, Ural State Mining University. E-mail: moc-olya@yandex.ru
Boris M. Aleksandrov – D. Sc. (Engineering), professor of the Department of Environmental Engineering and Water Consumption, Ural State Mining University. E-mail: ief.pro@m.ursmu.ru

Для цитирования: Егошина О. С., Александров Б. М. Система цифрового кодирования генетической классификации видов торфа и ее роль в комплексной оценке запасов торфа по категориям сырья и направлениям использования // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 3. С. 55–63 DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-55-63
For citation: Egoshina O. S., Aleksandrov B. M. Digital coding system of peat types genetic classification and its role in peat reserves integrated assessment according to raw material categories and uses. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 3: 55–63 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-55-63

УДК 550.837 DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-64-71

Электрометрические исследования на Крылатовском руднике

Давыдов В. А.[1], Арзамасцев Е. В.[1], Байдиков С. В.[1]*, Горшков В. Ю.[1]
[1] Институт геофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия
e-mail: badikek@mail.ru

Реферат

Цель работы *– показать возможность изучения электромагнитными методами геофизики процессов, возникающих после затопления подземных выработок, на примере Крылатовского рудника. После закрытия рудника произошло полное затопление подземных выработок с образованием провала. Важная задача заключается в оценке опасности образования новых просадок поверхности земли.*

Методология. *Электромагнитные исследования включали вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ), экспресс-вариант аудиомагнитотеллурических зондирований (АМТЗ) и дистанционные индукционные зондирования (ДИЗ) с вертикальным магнитным диполем. К задачам электрометрии относилось определение характера рыхлых отложений, целостности горных пород и наличия ослабленных зон. Работы методами АМТЗ и ДИЗ выполнены комплектами электроразведочной аппаратуры ОМАР-2м и МЧЗ-8. Работы методом ВЭЗ выполнены аппаратурой АНЧ-3. Количественная интерпретация ВЭЗ, АМТЗ и ДИЗ заключалась в получении согласованных геоэлектрических разрезов с расчетными глубинами слоев и величинами удельных электрических сопротивлений. Данные построения позволяют определить характер изменения электрофизических свойств разреза и выделить локальные аномальные объекты.*

Результаты. *По результатам обработки построены качественные и количественные разрезы электрофизических параметров среды, позволяющие определить характер изменения свойств разреза и выделить локальные аномальные объекты. Проведенные работы показали резкие изменения удельных электрических сопротивлений в верхней части разреза, связанные с разнородным составом техногенных насыпных грунтов на территории Крылатовского рудника. Полученные геоэлектрические разрезы уверенно выделяют положение аномалий пониженных сопротивлений. Результаты разных методов геофизики хорошо согласуются между собой.*

Выводы. *Выявлена обширная область повышенной электропроводности глубиной до 130 м и шириной около 50 м. Она может представлять собой обводненную ослабленную зону повышенной трещиноватости, склонную к дальнейшему разрушению. Это указывает на потенциальную опасность процессов сдвижения в районе затопленных подземных выработок с образованием новой просадки поверхности земли.*

Ключевые слова: *электромагнитные зондирования; геоэлектрический разрез; комплексные геофизические исследования; параметрический профиль; шахтное поле; провал.*

Введение. Рудные месторождения Урала, послужившие в свое время основой экономического развития России, постепенно отрабатываются. Уже закрыто большинство старых рудников, благодаря которым возникли Красноуральск, Нижний Тагил, Кировград, Верхняя Пышма, Дегтярск, Полевской и ряд других городов и поселков. После ликвидации горнодобывающих предприятий появились проблемы, связанные с оставленными горными выработками, в особенности с подземными [1]. К ним, в частности, относятся подтопление территории после остановки откачных насосов и просадка поверхности земли [2]. Статья посвящена изучению данных явлений с помощью электромагнитных методов геофизики на примере Крылатовского рудника. Рудник прекратил свою работу в 2005 году, через год была остановлена откачка воды. В 2008 году произошло полное затопление подземных выработок с выходом шахтных вод на поверхность

земли. Процессы сдвижения в районе шахты «Северная вентиляционная» вызвали образование провала глубиной 40 м. Величина воронки, которая за два года почти до краев заполнилась водой, составила около 25 тыс. м^2. Территория пос. Крылатовский была подтоплена, вплоть до частичного затопления. Чтобы предотвратить катастрофическое развитие событий, в 2012 году был организован частичный водоотлив, поддерживающий допустимый уровень грунтовых вод. В результате уровень водоема существенно понизился, в настоящее время его длина составляет примерно 200 м, ширина 30–50 м. Геофизические исследования на шахтном поле Крылатовского рудника проводились на профиле, расположенном в 200-х м южнее провала. Цель работ заключалась в оценке опасности образования новых просадок поверхности. К задачам электрометрии относилось определение характера рыхлых отложений, целостности горных пород и наличия ослабленных зон.

Объект исследований. Крылатовское золоторудное месторождение известно с 1803 года и расположено в 35 км на юго-запад от г. Екатеринбурга. Оруденение располагается в южной части Новоалексеевского плагиогранитного массива, ограниченного с запада региональным Серовско-Маукским (Дегтярским) разломом, с востока – Крылатовским разрывом. Вмещающие породы представлены порфиритами андезит-базальтового и базальтового состава, а также хлорит-серицитовыми и углисто-кремнистыми сланцами с прослоями кварцитов и известняков. Порфириты и сланцы подверглись региональному метаморфизму зеленосланцевой фации, а плагиограниты – многостадийному гидротермальному воздействию. Новоалексеевский массив формировался в тектонически активной зоне, что подтверждается развитием в нем многочисленных разрывных нарушений и мощных зон рассланцевания. В рудной зоне выделяются кварцево-сланцевые залежи, сланцево-кварцевые линзы и кварцевые жилы. Крылатовское месторождение представляет собой серию минерализованных кварцевых жил, залегающих в кварц-серицитовых метасоматитах (сланцеватых березитах) [3]. Известны несколько крупных золотоносных жил, вытянутых в меридиональном направлении, длиной до 2 км и мощностью 3–6 м, шахтную отработку которых проводил Крылатовский рудник. Золото связано с сульфидной минерализацией, представленной в основном пиритом. Из-за неравномерного содержания оно отрабатывалось только на первом этапе освоения месторождения. В дальнейшем руды использовались в качестве золотоносных кварцевых флюсов на медеплавильных заводах. На руднике функционировали несколько шахт, отрабатывающих горизонты с 40 по 490 м. Общий объем пустот на момент ликвидации составлял 288,5 тыс. м^3, выше горизонта 130 м – 71,6 тыс. м^3 [4].

Методика работ. Электромагнитные исследования включали вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ), экспресс-вариант аудиомагнитотеллурических зондирований (АМТЗ) и дистанционные индукционные зондирования (ДИЗ) с вертикальным магнитным диполем. Работы методом ВЭЗ выполнены комплектом электроразведочной аппаратуры низкой частоты АНЧ-3 (НПО «Рудгеофизика», г. Ленинград) на частоте 4,88 Гц по стандартной методике [5]. Использовалась симметричная 4-электродная установка Шлюмберже (AMNB) с полуразносом питающей линии $AB/2$ до 150 м с логарифмическим шагом. Измерения проводились при стабилизированном токе 10 мА или 31,6 мА. Аппаратура АНЧ-3 обеспечивает высокую частотную избирательность измеряемого сигнала. На рабочей частоте полоса пропускания измерителя составляет 0,5 Гц. Входное сопротивление позволяет производить измерения при сопротивлении приемной линии *MN* до 100 кОм. Динамический диапазон аппаратуры позволяет производить измерение сигналов от единиц микровольт до 10 В. Количественная интерпретация ВЭЗ выполнена в рамках одномерной модели по программам Камин-

ского (ZondIP) и Бобачева (IPI2Win). В результате получен согласованный геоэлектрический разрез с расчетными глубинами слоев и величинами удельных электрических сопротивлений (УЭС).

Аудиомагнитотеллурические зондирования проводились с помощью 2-канальной приемно-регистрирующей аппаратуры ОМАР-2м (ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург), обеспечивающей усиление, аналого-цифровое преобразование и запись широкополосных геофизических сигналов в реальном времени. Измерения велись в частотном диапазоне 100–10 000 Гц скоростным способом на стелющуюся 10-метровую незаземленную линию E_y и магнитный датчик с линеаризованной амплитудно-частотной характеристикой H_x. Время измерения на точке составляло около двух минут.

Камеральная обработка аудиомагнитотеллурических (АМТ) данных включала:

– фильтрацию промышленных помех;

– получение частотных спектров на основе быстрого преобразования Фурье [6];

– восстановление истинных амплитуд сигналов с учетом амплитудно-частотной характеристики измерительных каналов;

– расчет продольного импеданса среды $Z = E_y / H_x$;

– расчет кажущегося сопротивления (КС) и получение частотного псевдоразреза $\rho_к(f)$;

– трансформацию частотной зависимости $\rho_к(f)$ в глубинный разрез КС $\rho_т(h)$ с помощью преобразования АМТ – данных с учетом априорной информации о верхней части разреза [7];

– пересчет и построение глубинного разреза эффективной продольной проводимости $S_{эф}(h) = h/\rho_т(h)$.

Дистанционные индукционные зондирования выполнялись аппаратурой МЧЗ-8 (ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург) с микропроцессорным управлением. В состав аппаратуры входит генератор переменного тока с излучателем типа вертикального магнитного диполя и измерительный блок с приемником индукционного типа [8]. Зондирования выполнялись на двух фиксированных частотах: 10 и 40 кГц. Это позволило получить дополнительный параметр среды – коэффициент частотной дисперсии электрического сопротивления. Методика измерений заключалась в последовательной регистрации двух взаимно перпендикулярных компонент переменного магнитного поля H_z и H_r на каждом разносе [9]. При этом приемник оставался на месте, а генератор последовательно относился на расстояние от 10 до 80 м по линии профиля с переменным шагом. Точка записи отнесена к месту расположения приемника, эффективная глубина исследований принимается равной четверти разноса [10]. Кажущееся удельное электрическое сопротивление рассчитывалось по формуле для низкочастотной асимптотики [11]:

$$\rho_к = 2Dfr^2 H_z / H_r ,$$

где D – нормирующий параметр, зависящий от волнового числа; f – частота генератора, Гц; r – расстояние между генератором и приемником, км; H_z – вертикальная компонента переменного магнитного поля; H_r – горизонтальная (осевая) компонента поля.

Коэффициент частотной дисперсии (КЧД) для пары частот рассчитывался по модифицированной формуле с логарифмической нормализацией значений [12]:

$$К_f = \left(\rho_к^{нч} - \rho_к^{вч}\right) \Big/ \left(\rho_к^{нч} \ln\left(f^{вч} / f^{нч}\right)\right),$$

где $\rho_к^{нч}$ – кажущееся сопротивление (КС) на нижней частоте; $\rho_к^{вч}$ – КС на верхней частоте; $f^{нч}$ – нижняя частота (10 кГц); $f^{вч}$ – верхняя частота (40 кГц).

По итогам камеральной обработки ДИЗ строились качественные разрезы КС и КЧД. Данные построения позволяют определить характер изменения электрофизических свойств разреза и выделить локальные аномальные объекты.

Результаты исследований. Работы на объекте показали, что верхняя часть разреза (ВЧР) неоднородна по электрическим свойствам как по вертикали, так и по горизонтали. По результатам ВЭЗ геоэлектрический разрез состоит из 4–5 слоев. В пределах всего профиля наблюдаются резкие изменения удельных электрических сопротивлений ВЧР, в том числе в пределах одного слоя. Скорее всего это связано с разнородным составом насыпных грунтов и разной степенью обводненности пород на территории рудника. На всех точках исследуемого профиля выделяется верхняя кромка толщиной до 5 м, характерная для зоны аэрации. На пикетах ПК10 и ПК15 находится «карман» пониженного сопротивления со значениями 50–60 Ом · м, связанный с заброшенной горной выработкой.

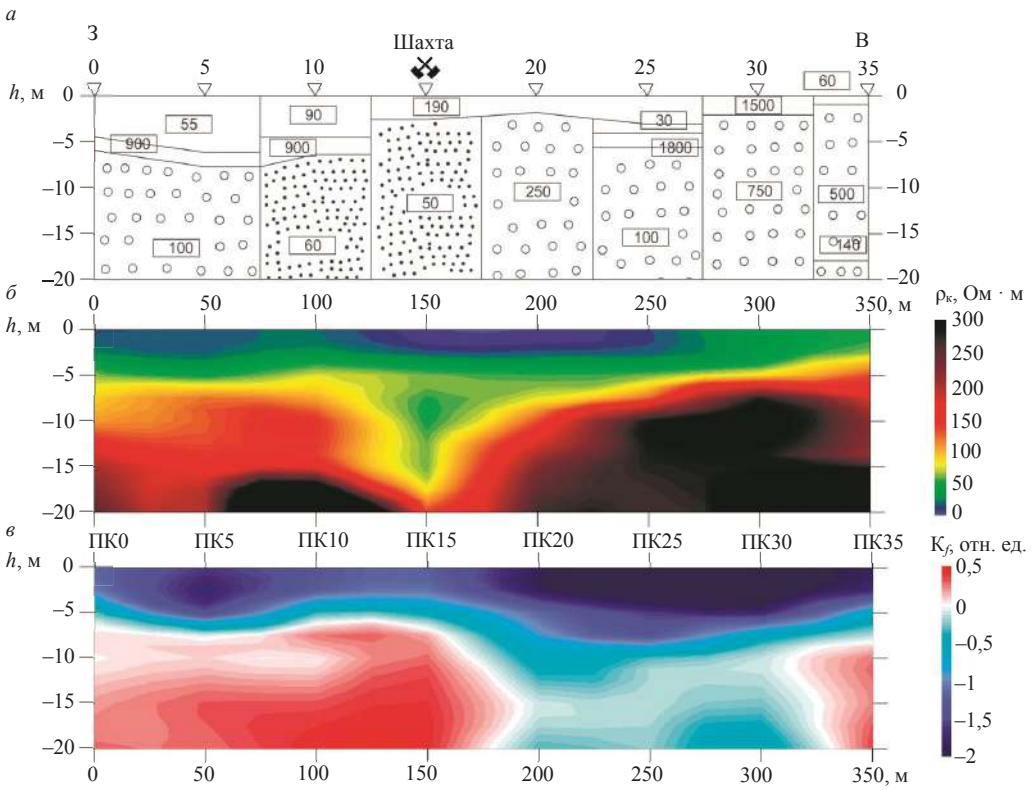


Рис. 1. Характер верхней части разреза на профиле Крылатовского рудника:
а – геоэлектрический разрез ВЭЗ (в рамках – значения УЭС); *б* – разрез кажущихся сопротивлений ДИЗ; *в* – коэффициент частотной дисперсии

Fig. 1. Nature of the upper part of the section on Krylatovskii mine profile:
а – geoelectric section of VES (with limits of resistivity values in frames); *б* – section of apparent resistances of RIS; *в* – frequency dispersion coefficient

В целом горизонтальная неоднородность слоев разреза определяется переслаиванием рыхлых отложений с различным гранулометрическим составом, отличающихся значениями УЭС. Общая мощность поверхностных техногенных грунтов составляет более 20 м, что не позволило индукционным зондированиям отбить кровлю высокоомных коренных пород (рис. 1).

Тем не менее ДИЗ довольно уверенно выделяет положение ликвидированной шахты № 10 в районе ПК15 аномалией пониженных сопротивлений и положи-

тельными значениями КЧД. Подобное поведение электрометрических параметров характерно для железобетонных фундаментов и элементов конструкций. Отрицательные значения коэффициента частотной дисперсии указывают на присутствие глинистой фракции в рыхлых отложениях глубиной 7–8 м в пределах всего профиля, а на участке ПК20–ПК32 – до глубины более 20 м. Это согласуется с результатами ВЭЗ на больших разносах и аудиомагнитотеллурическими зондированиями. Согласно полученным данным, в районе ПК20 располагается тектоническое нарушение, после которого увеличивается общая мощность низкоомных (более глинистых) отложений. На геоэлектрическом разрезе ВЭЗ

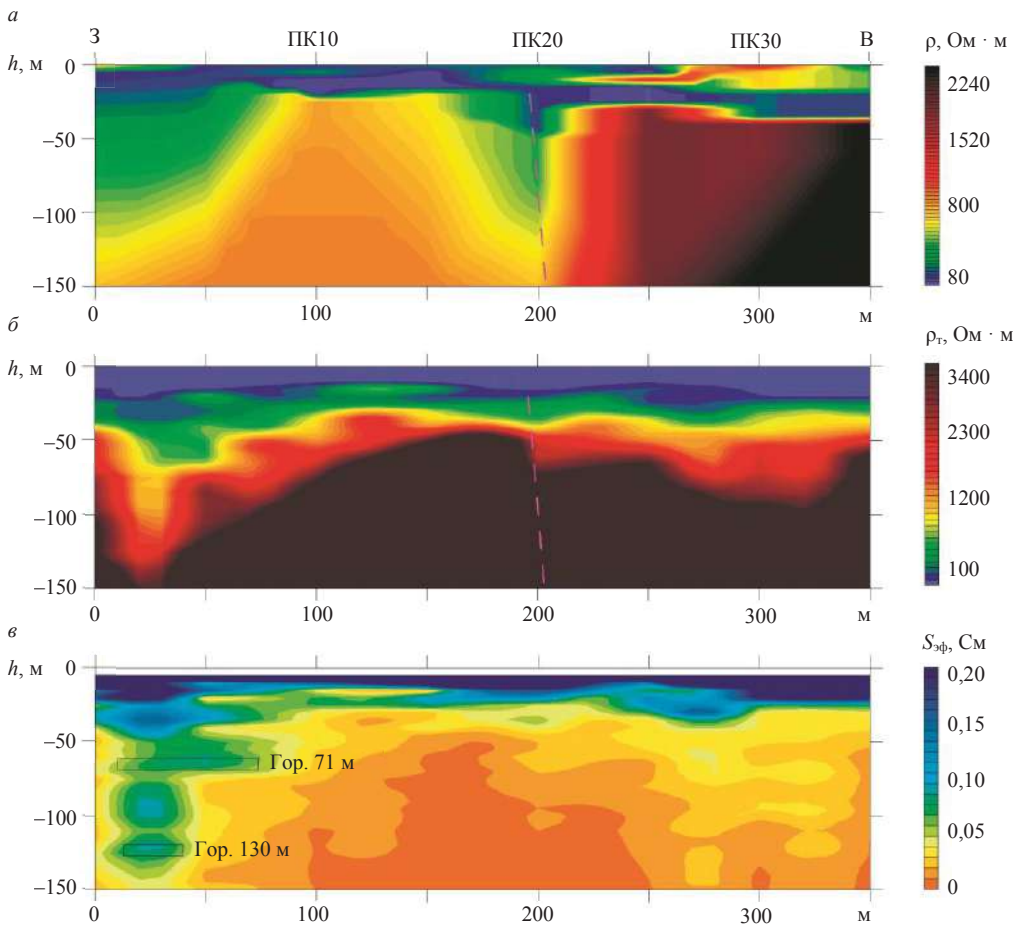


Рис. 2. Глубинные разрезы электрофизических параметров на профиле Крылатовского рудника:
а – геоэлектрический разрез ВЭЗ; *б* – трансформированный разрез АМТЗ; *в* – эффективная продольная проводимость

Fig. 2. Depth sections of electrophysical parameters on Krylatovskii mine profile:
а – geoelectric section of VES; *б* – transformed section of AMTS; *в* – effective longitudinal conductivity

разлом выделяется характерной депрессией сопротивлений до глубины более 100 м. Кроме того, коренные породы по обе стороны нарушения отличаются разными значениями УЭС. Удельные электрические сопротивления основания разреза в интервале пикетов ПК0–ПК20 составляют 600–800 Ом · м, а после ПК20 они возрастают до 1000–2000 Ом · м и выше (рис. 2, *а*). На трансформированном разрезе АМТЗ разлом отмечается в виде ступенчатого перепада электрических сопротивлений (рис. 2, *б*).

В начале профиля (ПК0–ПК5) присутствует мощная область пониженных сопротивлений, связанная с обводнением пород в районе подземных выработок. С помощью разреза эффективной продольной проводимости можно более подробно рассмотреть структурные особенности этой зоны, вплоть до идентификации затопленных горизонтов 71 и 130 м (рис. 2, *в*). Кроме того, в зоне существуют участки повышенной проводимости, не связанные с шахтной отработкой, например на глубинах 40 и 90 м. Они могут представлять собой сильно трещиноватые породы, склонные к дальнейшей дезинтеграции. Полученные результаты указывают на потенциальную опасность новой просадки поверхности земли в районе затопленных подземных выработок (ПК1–ПК7).

Выводы. Результаты исследований свидетельствуют о сложном характере геоэлектрического строения пород на территории нефункционирующего Крылатовского рудника. Проведенные работы показали резкие изменения удельных электрических сопротивлений в верхней части разреза, связанные с разнородным составом техногенных насыпных грунтов на территории рудника. Выявлена обширная область повышенной электропроводности глубиной до 130 м и шириной около 50 м. Она может представлять собой обводненную ослабленную зону повышенной трещиноватости, склонную к дальнейшему разрушению. Это указывает на потенциальную опасность процессов сдвижения в районе затопленных подземных выработок с образованием новой просадки поверхности земли.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта фундаментальных исследований № 18–5–5–38 комплексной программы УрО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Dubinski J., Turek M. Mining problems of underground coal gasification – reflections based on experience gained in experiment conducted in KHW SA Wieczorek coal mine // Mining Science. 2016. Vol. 23. 14 p.

2. Yin S., Zhang J., Liu D. A study of mine water inrushes by measurements of in situ stress and rock failures // Natural Hazards. 2015. Vol. 79. No. 3. P. 1961–1979.

3. Сазонов В. Н., Огородников В. Н., Коротеев В. А., Поленов Ю. А. Месторождения золота Урала. Екатеринбург: УГГГА, 1999. 570 с.

4. Елохина С. Н., Арзамасцев В. А., Борич С. Э., Сотова Е. М., Щапов В. А. Зонирование природно-техногенных гидрогеологических систем (на примере Крылатовского рудника) // Известия вузов. Геология и разведка. 2010. № 1. С. 57–66.

5. Инструкция по электроразведке. Л.: Недра, 1984. 352 с.

6. Walker J. S. Fast fourier transforms. CRC Press, 2017. Vol. 24. 464 p.

7. Давыдов В. А. Способ преобразования аудиомагнитотеллурических данных с учетом априорной информации // Геофизические исследования. 2016. Т. 17. № 4. С. 57–66.

8. Байдиков С. В., Человечков А. И. Аппаратура для высокочастотных индукционных зондирований МЧЗ-8 // Уральский геофизический вестник. 2011. № 1. С. 4–8.

9. Davydov V. A., Baidikov S. V., Gorshkov V. Y., Malikov A. V. Geophysics methods in electrometric assessment of dams // Power Technology and Engineering. 2016. Vol. 50. Issue 2. P. 168–175.

10. Титлинов В. С., Журавлева Р. Б. Технология дистанционных индуктивных зондирований. Екатеринбург: Наука, 1995. 58 с.

11. Вешев А. В., Ивочкин В. Г., Игнатьев Г. Ф. Электромагнитное профилирование. Л.: Недра, 1971. 216 с.

12. Давыдов В. А., Байдиков С. В., Астафьев П. Ф. Изучение поляризационных эффектов индукционными методами электроразведки на примере Чусовского месторождения // Разведка и охрана недр. 2017. № 8. С. 39–44.

Поступила в редакцию 11 января 2019 года

Сведения об авторах:

Давыдов Вадим Анатольевич – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геофизики УрО РАН. E-mail: davyde@yandex.ru

Арзамасцев Евгений Владимирович – аспирант, младший научный сотрудник Института геофизики УрО РАН. E-mail: brigan88@yandex.ru

Байдиков Сергей Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института геофизики УрО РАН. E-mail: badikek@mail.ru

Горшков Виталий Юрьевич – младший научный сотрудник Института геофизики УрО РАН. E-mail: vitalaa@yandex.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-64-71

Electrometric studies in Krylatovskii mine

Vadim A. Davydov[1], Evgenii V. Arzamastsev[1], Sergei V. Baidikov[1], Vitalii Iu. Gorshkov[1]
[1] Institute of Geophysics UB RAS, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Research aims *to show the possibility of studying the processes occurring after underground workings flooding by electromagnetic methods of geophysics by the example of Krylatovskii mine. After mine closure underground workings were completely flooded and caved in. An important task is to assess the risk of new surface subsidence formation.*

Research methodology. *Electromagnetic surveys included vertical electrical soundings (VES), an express version of audio magnetotelluric soundings (AMTS), and remote induction soundings (RIS) with a vertical magnetic dipole. Electrometry tasks included the determination of loose sediments nature, rocks integrity, and weakened zones presence. AMTS and RIS works were carried out with the sets of electrical survey equipment OMAR-2m (ОМАР-2м) and MFS-8 (МЧЗ-8). VES works were carried out with LFE-3 (АНЧ-3) equipment. VES, AMTS and RIS quantitative interpretation included the realization of consistent geoelectrical sections with calculated layer depths and electrical resistance values. These compositions make it possible to determine the nature of changes in the electrical properties of the section and identify local anomalous objects.*

Results. *According to the results of processing, quantitative and qualitative sections of the electrophysical parameters of the medium were constructed, allowing to determine the nature of changes in the properties of the section and identify local anomalous objects. The performed work showed sharp changes of resistivity in the upper part of the section, associated with heterogeneous composition of technogenic bulk soils on the territory of Krylatovskii mine. The obtained geoelectrical sections reliably distinguish the position of low resistance anomalies. The results of different geophysical methods agree well with each other.*

Conclusions. *An extensive area of increased electrical conductivity with depth up to 130 m and width about 50 m has been revealed. It may be a flooded weakened zone of increased fracturing, prone to further destruction. This indicates potential danger of displacement processes in area of submerged underground workings with formation of new subsidence of the earth's surface.*

Key words: *electromagnetic sounding; geoelectrical section; combined geophysical studies; parametric profile; mine field; cave-in.*

Acknowledgements: Research has been carried out with support from the project no. 18-5-5-10 of UB RAS Program for basic research.

REFERENCES

1. Dubinski J., Turek M. Mining problems of underground coal gasification – reflections based on experience gained in experiment conducted in KHW SA Wieczorek coal mine. *Mining Science*. 2016; 23: 14.
2. Yin S., Zhang J., Liu D. A study of mine water inrushes by measurements of in situ stress and rock failures. *Natural Hazards*. 2015; 79 (3): 1961–1979.
3. Sazonov V. N., Ogorodnikov V. N., Koroteev V. A., Polenov Iu. A. *Gold deposits of the Urals*. Ekaterinburg: UrSMU Publishing, 1999. (In Russ.)
4. Elokhina S. N., Arzamastsev V. A., Borich S. E., Sotova E. M., Shchapov V. A. Zoning of natural-technogenic hydrogeological systems (using Krylatovskii mine as an example). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geologiia i razvedka = News of the Higher Institutions. Geology and Exploration*. 2010; 1: 57–66. (In Russ.)
5. *Electrical sounding manual*. Leningrad: Nedra Publishing; 1984: 352. (In Russ.)
6. Walker J. S. Fast Fourier Transforms. *CRC Press*. 2017; 24. 464 p.
7. Davydov V. A. Audio magnetotelluric data transformation using a priori information. *Geofizicheskie issledovaniia = Geophysical Research*. 2016; 17 (4): 57–66. (In Russ.)
8. Baidikov S. V., Chelovechkov A. I. Equipment for frequency sounding. *Uralskii geofizicheskii vestnik = Ural Geophysical Bulletin*. 2011; 1: 4–8. (In Russ.)
9. Davydov V. A., Baidikov S. V., Gorshkov V. Y., Malikov A. V. Geophysics Methods in Electrometric Assessment of Dams. *Power Technology and Engineering*. July 2016; 50 (2): 168–175.
10. Titlinov V. S., Zhuravleva R. B. *Technology of remote induction soundings*. Ekaterinburg: Nauka Publishing; 1995. (In Russ.)
11. Veshev A. V., Ivochkin V. G., Ignatiev G. F. *Electromagnetic profiling*. Leningrad: Nedra Publishing; 1971. (In Russ.)
12. Davydov V. A., Baidikov S. V., Astafiev P. F. Study polarization effects through induction methods of electrical prospecting on the example Chusovskoy deposit. *Razvedka i okhrana nedr = Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2017; 6: 39–44. (In Russ.)

Received 11 January, 2019

Information about authors:

Vadim A. Davydov – PhD (Geology and Mineralogy), senior researcher, Institute of Geophysics UB RAS. E-mail: davyde@yandex.ru
Evgenii V. Arzamastsev – PhD student, junior researcher, Institute of Geophysics UB RAS. E-mail: brigan88@yandex.ru
Sergei V. Baidikov – PhD (Engineering), senior researcher, Institute of Geophysics UB RAS. E-mail: badikek@mail.ru
Vitalii Iu. Gorshkov – junior researcher, Institute of Geophysics UB RAS. E-mail: vitalaa@yandex.ru

Для цитирования: Давыдов В. А., Арзамасцев Е. В., Байдиков С. В., Горшков В. Ю. Электрометрические исследования на Крылатовском руднике // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 3. С. 64–71. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-64-71
For citation: Davydov V. A., Arzamastsev E. V., Baidikov S. V., Gorshkov V. Iu. Electrometric studies in Krylatovskii mine. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 3: 64–71 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-64-71

УДК 622.7.09:620.113 DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-72-80

Sample weights homogeneity assessment and measurement procedure errors in the analysis of ore and mineral processing products

Vladimir Z. Kozin[1]*, Aleksei S. Komlev[1], Ekaterina V. Stupakova[2]
[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia
[2] Irkutsk State Institute of Rare Metals, Irkutsk, Russia
e-mail: gmf.dek@ursmu.ru

Abstract

Introduction. *Homogeneity of sample weights and measurement procedure in analyses is usually determined by means of ad hoc conducted experiments.*

Research aim *is to reveal the features of dependences between analysis errors and mass fractions, and the possibility of using them in order to assess measurement procedures errors and sample weights homogeneity.*

Methodology. *The comparison between experimental dependences and formulae for analysis sample weights homogeneity assessment.*

Results. *Experimentally deduced dependences between analysis relative errors and components mass fractions make it possible to determine both sample weights homogeneity and measurement procedure errors without auxiliary experiments. With mass fractions being more than 0.1%, these dependences mainly describe measurement procedure errors. It has been stated that in standard analysis conditions, measurement procedure relative errors constitute 0.7% for copper, 0.9% for lead, and 1.4% for zinc. With mass fractions being less than 0.1%, these dependences mainly describe sample weights homogeneity. It has been stated that sample weights homogeneity is described by the dependence where mass fraction of a component in the determinator has degree 0.5. The assessment of the measurement procedure relative error for mass fractions less than 0.1% is possible by the difference between the squares of analysis relative errors and the calculated inhomogeneity error, but with errors in experimental and calculated estimates it is unreliable.*

Summary. *If analysis conditions correspond to the conditions of obtaining the dependences between analysis relative errors and mass fractions, then in order to assess sample weights inhomogeneity and measurement procedure there is no need in ad hoc experiments.*

Key words: *analysis error; sample weight homogeneity; procedure error.*

Standard (experimental) approach to the assessment of analysis sample weights homogeneity. In metal ore mining industry a number of ore and mineral processing products analyses are carried out with the use of sample weights the mass of which is predetermined by the conditions of the analysis. In most cases this mass is referred to in the testing standards of some products, for instance, the mass of sample weights for non-ferrous metals analysis is 1 g, 0.5 g or 0.25 g, and for precious metals – 50 g, 25 g, etc. However, in most cases this mass is not predetermined, namely, in X-ray fluorescence analysis and spectrum analysis, in particular, the analysis in the sampled massif (analysers settled at a conveyor or a pipeline, ore-controlling stations, etc.)

Spectrum and X-ray fluorescence methods differ in that the mass of the sample weight to be analysed is unknown in the course of the analysis. This includes the mass directly forming the analysis result. The burnt mass at spectrum analysis [1] makes up

20–50 mg, while the mass analysed in a cell with the use of X-ray fluorescence method is about 10–20 mg. The amount of grains of the material containing the analyte in these cases may be small, and the random error in such analyses grows quickly with the reduction of the mass fraction.

Margin of random error of the analysis in the form of the confidence interval with the 95% probability is usually declared; it is presented in the form of the margin of discrepancy between two (three) parallel analyses $\Delta\alpha_{доп}$. As long as sample weight collection is included in the procedure of any analysis, the error of sample weight collection $\Delta\alpha_{н}$ is included in the margin of error together with measurement procedure error (МВИ) $\Delta\alpha_{МВИ}$

$$\left(\Delta\alpha_{доп}\right)^2 = \left(\Delta\alpha_{н}\right)^2 + \left(\Delta\alpha_{МВИ}\right)^2.$$

In most cases these two errors are not divided and the share of both errors in $\Delta\alpha_{доп}$ is unknown [2].

Direct assessment of both errors is covered by the development of standard samples of the analysed products including quality control samples (QCS).

The assessment of analysis sample weight collection random error is covered by *GOST 8.531-2002. State system for ensuring the uniformity of measurements. Reference materials of composition of solid and disperse materials. Ways of homogeneity assessment*.

The difference between the sample weights in this standard is characterized by the notion of "homogeneity" meaning RMS deviation of the results obtained at the set of sample weights except RMS deviation caused by МВИ.

In the standard the certified value of the confidence interval in the course of the analysis is proposed to be determined using the formula:

$$\Delta\alpha_{доп} = \sqrt{\left(\Delta\alpha_{МВИ}\right)^2 + \left(2S_{н}\right)^2}.$$

Quantity $S_{н}$ is proposed to be determined experimentally. Single-factor analysis of variance is mathematically applied (one factor is assessed, which is the difference between the sample weights, i. e. their homogeneity characterized by $S_{н}$).

However, the scheme of the analysis of variance is not quite clear. The thing is that in order to assess error $S_{н}$ connected with the mass of the sample weight, a set of parallel measurements should be carried out at one and the same sample weight (to eliminate $\Delta\alpha_{МВИ}$). But it is impossible in case the sample weight breaks under single measurement (chemical analysis), or ambiguous in case the sample weight does not break but reloads in the measuring instrument (X-ray fluorescence analysis). In order to solve this problem, chemical analysis proposes to transform sample weights into solution with further multiple analysis of the solution; in analysis methods which do not break the sample weight, the homogeneity of the analysed part is not even examined.

Thus, according to the procedure proposed in the standard, sample weight collection error will include either error connected with resolution, or error connected with cell reload.

Besides, experimental approach has critical disadvantages beyond the use of measuring techniques:

– high labour intensity, cost, and duration of the experiment; according to the standard, the analysis of 20–30 samples should be fulfilled 10 times, i. e. 200–300 measurements;

– the analysis of variance has errors of its own depending on the number of the analysed samples; for 20 samples, experimental variance possesses relative random

error of its own of more than 30%, relative random error of variances difference (and this is the way homogeneity error is determined according to the standard) may reach 100%.

Computational method of assessing the homogeneity of sample weights. At the present time, modern theory of sampling allows not to carry out technically complex and labour intensive experiment of determining the constituents of analysis random error due to the existing formulae calculating sample weights homogeneity errors.

Sample weights homogeneity error $S_н$ can be determined by formula [3]:

$$S_н^2 = 2K_и f S_{кн}^2 \rho \left(\bar{d}_н\right)^3 \Big/ q_н ,$$

where $K_и$ – the coefficient of the executors' performance; f – the coefficient of a form; $S_{кн}^2$ – size variance of a sample weight; ρ – sample density; $\bar{d}_н$ – mean size; $q_н$ – sample weight mass.

Size variance for a sample weight [3]

$$S_{кн}^2 = \frac{\rho_м}{\rho_п} \alpha\beta_м ,$$

where $\rho_м$ and $\rho_п$ – the density of the mineral containing the analyte, and rock density; α – mass fraction of the analyte in the analysed sample weight; $\beta_м$ – mass fraction of this component in the mineral.

As a result, the formula for sample weights homogeneity error under $\rho_п = \rho$ is written as

$$S_н^2 = 2K_и f \rho_м \alpha\beta_м \left(\bar{d}_н\right)^3 \Big/ q_н . \quad (1)$$

This formula leads to new opportunities in assessing the homogeneity of analysis sample weights.

The dependences between analysis error and mass fractions of the components. Techniques and standards of component analysis in ore and mineral processing products necessarily contain information about margin of random error of analysis. As a rule, these errors depend on the mass fraction of the component. Dependences between relative random errors of the analysis and the mass fraction of the analyte are typical and stable.

Fig. 1 presents relative errors P_α of lead, zinc, and copper analyses in the function of a mass fraction α, which have been specified by the standards.

In fig. 1 on the *x*-axis, the mass fraction of analyte α is plotted; on the *y*-axis, relative error P_α of the analysis is plotted. It is determined by formula

$$P_\alpha = \frac{2S_\alpha}{\alpha} \cdot 100\ \%,$$

where S_α – RMS error of the analysis.

The presented dependences have been obtained by multiple determinations of mass fraction with the use of standard techniques; they are included into all techniques of ore and mineral processing products analyses in the form of margin of error tables for various ranges of mass fractions.

According to formula (1), let us find sample weight collection error $S_н$ for copper analysis as a function of mass fraction having accepted the typical conditions $d_н$ = 0.1 mm; $q_н = 1$ g; $\beta_м = 34.6\%$ (chalcopyrite); $\rho_м = 4100$ kg/m^3; $f = 0.4$; $K_и = 2$; $S_н^2 = 55{,}6 \cdot 10^{-6}$ %^{2}.

Relative error

$$P_{н} = \frac{2S_{н}}{\alpha} \cdot 100 = \frac{1,5}{\sqrt{\alpha}}, \ \%.$$

Let us plot dependence $P_{н} = f(\alpha)$ on fig. 2 together with function $P_{\alpha} = f(\alpha)$.

Comparing dependences P_{α} and $P_{н}$ at fig. 2 we observe that under large copper mass fractions the error of $P_{н}$ sample weight collection is smallish, while the error of the analysis is predetermined by measurement procedure error $P_{МВИ}$. It follows from fig. 2 that error of industrially applied chemical measurement procedures for copper $P_{МВИ}$ = 0.7%. According to similar dependences for lead $P_{МВИ}$ = 0.9%; for zinc $P_{МВИ}$ = 1.4%.

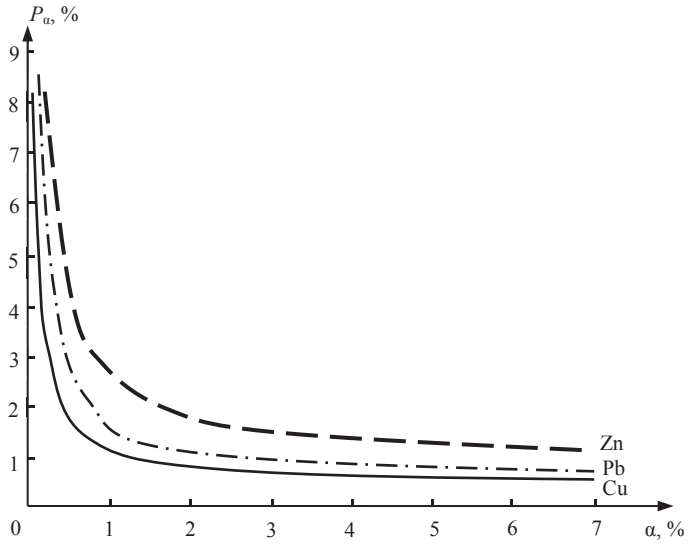


Fig. 1. Relative errors of chemical methods of analysis
Рис. 1. Относительные погрешности химических методов анализа

As long as dependences at fig. 1 are based on analysts' performance results of a number of laboratories, sample weights inhomogeneity error follows directly from these dependences for small mass fractions. Thus, for copper mass fraction α = 0.5%; $P_{н}$ = 6%.

Executors' performance quality. In accordance with the international standards, Russian standards (*GOST R ISO 5725-1-2002. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 1. Rosstandart; 2009. 28 p.; GOST 15934.10-82. Copper concentrates. Methods for determination of gold and silver. Moscow: Standart Publishing; 1999. 10 p.*) and techniques currently cite two analysis error: repeatability error (denoted as *d*) and reproducibility error (denoted as *D*). They differ in that reproducibility error includes error introduced by various operators and equipment whilst performing same functions in accordance with the same technique.

The ratio *D/d* under smallish mass fractions produces the quantity which characterizes the operator's performance quality under sample weight collection.

For copper, ratio *D/d* is within the range of 1.2–1.4. For gold and silver, ratio *D/d* is within the range of 1.5–1.6.

In the formula of sample weights homogeneity variance these quantities are raised to the second power, $K_{и} = (D/d)^2 = 1.5–2.5$. As long as these assessments are approximate, all calculation accept $K_{и} = 2$.

Dependences between P_α and α for mass fractions less than 0.1%. Small mass fractions are determined for precious metals and value a little less than 0.1% for ores and concentrates, that is why the conditions of their determination change but the behaviour of relative random errors of the analysis is retained.

Experts all over the world have been analyzing ore and mineral processing products for centuries. A lot of information has been collected which is not easy to estimate as long as the features of both the analysed products and the techniques of sampling and preparing samples as well as the analysis itself result in deviations from the expected results, which are sometimes quite significant [4–8].

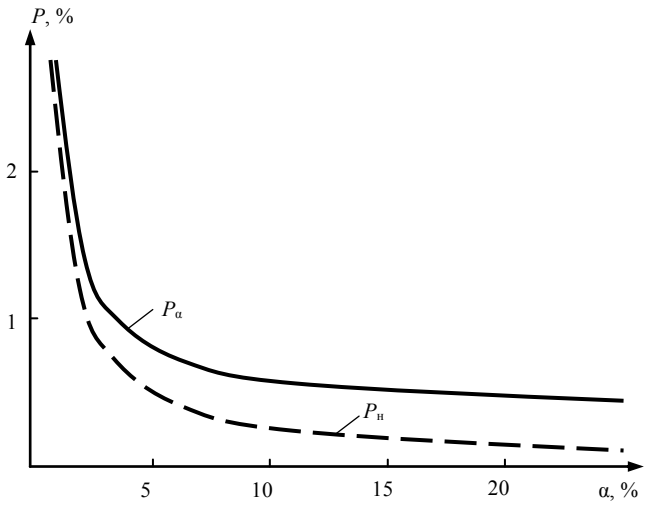


Fig. 2. Dependences between P_α and $P_н$ and the mass fraction of copper in a sample
Рис. 2. Зависимости P_α и $P_н$ от массовой доли меди в пробе

However, the regularities of mass assaying for gold have been revealed. Connection between relative random error of assaying and mass fraction of gold in a sample has been stated. Let us reduce this connection according to the monograph by N. V. Karpenko [9] for the range of gold mass fraction up to 20 g/t (fig. 3) which corresponds to the norms for mass fraction from 5 to 50 g/t which have been "confirmed in the field" when analyzing by assay with spectrum or atomic absorption finish. Verging towards *y*-axis and after reaching 1 g/t, the function sharply rises.

At that, as it can be seen in fig. 3, relative error of gold in sample weights does not fall below 10%. The lower limits of the determined mass fractions constitute 0.4 g/t in sample weights of 25 g and 0.1 g/t in sample weights of 100 g. This is the possibility boundary of assaying. Margin of error for α = 0.6–1 g/t is 0.4 g/t. With even smaller mass fractions the deviation can reach 200% [9].

Similar dependences can be obtained by other normative documents, standards, techniques, etc., which introduce margin of errors of multiple analyses (*GOST 15934.10-82. Copper concentrates. Methods for determination of gold and silver. Moscow: Standart Publishing; 1999. 10 p.*)

Work [10] introduces experimental determination of error constituents of gold ore analysis. 24 sample weight have been collected, 2 solution duplicates for each sample weight, each duplicate has been analysed using the atomic adsorption method. Test conditions: mass fraction of gold – 8.36 g/t; gold grain size – from 0.1 to 0.2 mm; mass of sample weight – 20 g. It has been determined that the coefficient of variation of

sample weight collection is 18.04%; the coefficient of variation of solutions duplicates preparation – 2.22%; the coefficient of variation of atomic adsorption measuring method – 1.53%. The conclusion has been made in the research that the main contribution into analysis error is made by sample weight collection.

For sample weights containing uncrushable material inclusions (native gold, etc.) the formula of sample weights homogeneity error $S_н$ changes a little. It uses not the mean size of a sample weight but the maximum one, and gold grain shape factor f_{Au}:

$$S_н^2 = K_и f_{Au} \rho_м d_{max}^3 \alpha \beta_м / q_н .$$

As long as the function $P_\alpha = f(\alpha)$ in fig. 3 corresponds to $S_н$, i. e. $P_н = P_\alpha$, let us determine gold grain shape factor by formula

$$f_{Au} = \frac{\alpha q_н P_н^2 \cdot 10^{-4}}{4 K_и \rho_м \beta_м \left(d_{max}\right)^3}.$$

According to fig. 3 for α = 5 g/t $P_н = P_\alpha$ = 30%. The remaining quantities: $q_н$ = 50 g; $K_и$ = 2; d_{max} = 0.1 mm; $\rho_м$ = 18 000 kg/m^3; $\beta_м = 0.9 \cdot 10^6$ g/t. Then f_{Au} = 0.17.

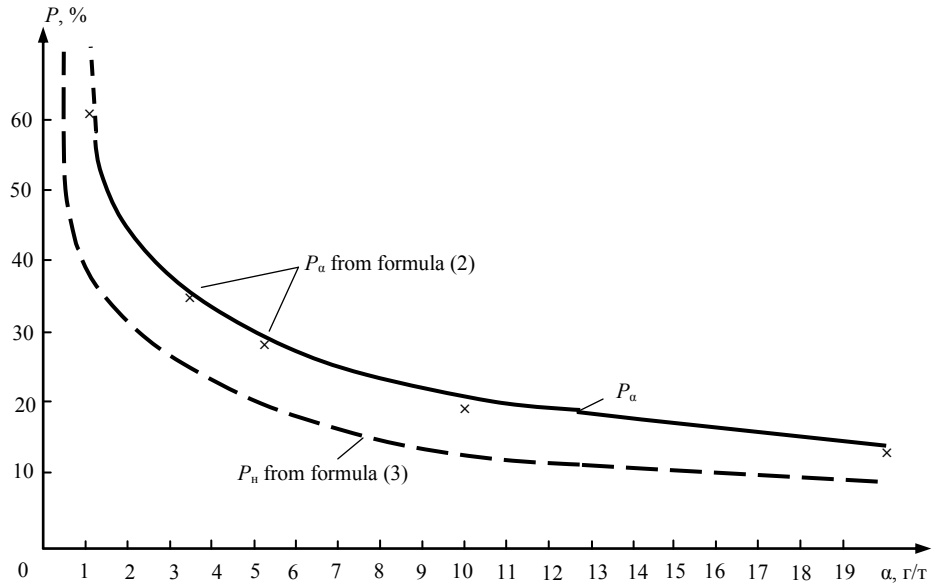


Fig. 3. Dependence between analysis relative error P_α and the mass fraction of gold in a sample and sample weight collection error $P_н$

Рис. 3. Зависимость относительной погрешности анализа P_α от массовой доли золота в пробе и погрешности отбора навесок $P_н$

The dependence between $P_н$ and mass fraction in this case under f_{Au} = 0.17 is as follows:

$$P_н = \frac{66}{\sqrt{\alpha}}, \qquad (2)$$

where $P_н$ is measured in percentage, and α is measured in g/t.

The results of calculation by formula (2) will be shown by crosses in fig. 3. It can be seen that formula (2) exactly describes function $P_\alpha = f(\alpha)$.

As long as at the present time sample weights material size is aimed to be made smallish, in particular $d_{max} = 0.071$ mm [8], we can obtain a formula for this case:

$$P_н = \frac{45}{\sqrt{\alpha}} \quad (3)$$

and show this dependence by a dotted line in fig. 3.

Some advantages of the calculation method are the following:

– single measurements of several quantities entering into the calculation formula; in the case under consideration it is the mass of the sample weight, mass fraction of the analyte in the sample weight and in the mineral, granulometric composition of the sample weight, sample weight density, and sample weight grain shape factor;

– sample weight parameters errors are usually small, which predetermines smaller error of sample weights homogeneity calculated values as compared to the experimental method;

– sample weight homogeneity can be calculated (recalculated) under any sample weight parameter deviations from the initial ones.

Despite almost natural regularities and formulae, analysis sample weight collection error calculation is not generally accepted and is not included in standards and techniques neither in routine analyses, not at the preparation, certification, and application of standard samples. Until now it is usual to proceed from experimental methods of determining errors based on different variants of the analysis of variance [11, 12].

The present research estimates opportunities of experimental and computational methods of analysis sample weights inhomogeneity error calculation as well as measurement techniques.

Analysis random error S_α consists of two components: sample weight collection error $S_н$ and measurement procedure error $S_{МВИ}$:

$$S_\alpha^2 = S_н^2 + S_{МВИ}^2.$$

In accordance with the standard (*GOST 8.531-2002. State system for ensuring the uniformity of measurements. Reference materials of composition of solid and disperse materials. Ways of homogeneity assessment*) it is proposed to find one quantity, in particular $S_н$, by the difference

$$S_н^2 = S_\alpha^2 - S_{МВИ}^2. \quad (4)$$

If $S_н^2$ is small compared to $S_{МВИ}^2$, then the assessment of $S_н^2$ using formula (4) is unreliable. $S_н^2$ often gets the negative value, which is unacceptable.

The procedure of calculating $S_н^2$ eliminates this unreliability.

Summary. Experimentally deduced dependences between analysis relative errors and components mass fractions make it possible to determine both sample weights homogeneity and measurement procedure errors without auxiliary experiments. With mass fractions being more than 0.1%, these dependences mainly describe measurement procedure errors. It has been stated that in standard analysis conditions, measurement procedure relative errors constitute 0.7% for copper, 0.9% for lead, and 1.4% for zinc.

With mass fractions being less than 0.1%, these dependences mainly describe sample weights homogeneity. It has been stated that sample weights homogeneity

is described by the dependence where mass fraction of a component in the determinator has degree 0.5.

The assessment of the measurement procedure relative error for mass fractions less than 0.1% is possible by the difference between the squares of analysis relative errors and the calculated inhomogeneity error, but with errors in experimental and calculated estimates it is unreliable.

If analysis conditions correspond to the conditions of obtaining the dependences between analysis relative errors and mass fractions, then in order to assess sample weights inhomogeneity and measurement procedure there is no need in ad hoc experiments.

REFERENCES

1. Kustanovich A. A. *Spectrum analysis*. Moscow: Vysshaia shkola Publishing; 1970. (In Russ.)

2. Kubantsev I. A. Determination of Au, Pt and Pd in the standard samples of ore composition: results of interlaboratory experiment in the USA. *Ruda i metally = Ore and Metals*. 2009; 3: 76–78.

3. Kozin V. Z. *Mineral raw material sampling*. Ekaterinburg: UrSMU Publishing; 2011. (In Russ.)

4. Glazatov A. N., Tsemekhman L. Sh., Spitsyn N. K., Kazakov A. M., Novikov M. N., Sokolov S. V. The Kolskaya Mine-and-Mill Concentrating Plant classification section overflow sampling techniques improvement. *Obogashchenie Rud = Mineral Processing*. 2010; 3: 35–38. (In Russ.)

5. Kozin V. Z., Komlev A. S. On the use of Richards-Chechott equations for the determination of the outlined sample mass. *Obogashchenie Rud = Mineral Processing*. 2016; 3: 47–51. (In Russ.)

6. Prokopieva S. V., Stupakova E. V. Standard samples for the control of technological processes and the quality of finished goods. *Zolotodobycha = Gold Mining*. 2013; 7: 5–6. (In Russ.)

7. Cleary P. W., Robinson G. K. Sampling of cohesive bulk materials by falling stream cutters. *Chemical Engineering Science*. 2011; 66 (17): 3991–4003.

8. Reddi G. S., Rao C. R. M. Analytical techniques for the determination of precious metals in geological and related materials. *Analyst*. 1999; 124: 1531–1540.

9. Karpenko N. V. *Sampling and ore processing products quality control*. Moscow: Nedra Publishing; 1987. (In Russ.)

10. Baryshnikov I. F. (ed.) Sampling and analysis of precious metals. Moscow: Metallurgiia Publishing; 1978. (In Russ.)

11. Cabri L. J., McMahon G. SIMS analysis of sulfide minerals for Pt and Au: methodology and Relative Sensitivity Factors (RSF). *Canadian Mineralogist*. 1995; 33: 349–359.

12. Australasian code for reporting of exploration results, mineral resources and ore reserves. *Joint ore reserves committee of the Australasian institute of mining and metallurgy, Australian institute of geoscientists and minerals council of Australia (JORC)*. 2004 Edition, 63 p.

Received 25 January, 2019

Information about authors:

Vladimir Z. Kozin – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of Mineral Processing Department, Ural State Mining University. E-mail: gmf.dek@ursmu.ru
Aleksei S. Komlev – PhD (Engineering), senior researcher of Mineral Processing Department, Ural State Mining University. E-mail: tails2002@inbox.ru
Ekaterina V. Stupakova – Head of Metrological Assurance for Quantitative Chemical Analysis Department, Irkutsk State Institute of Rare Metals. E-mail: stupakova@irgiredmet.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-72-80

Оценка однородности навесок и погрешности метода выполнения измерений при анализе руд и продуктов обогащения

Козин В. З.[1], Комлев А. С.[1], Ступакова Е. В.[2]
[1] Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.
[2] Иркутский государственный институт редких металлов, Иркутск, Россия.

Реферат

Введение. *Однородность навесок и метода выполнения измерений при анализах обычно определяют путем специально организованных экспериментов.*

Цель работы. *Показать особенности зависимостей погрешностей анализа от массовых долей и возможности их использования для оценок погрешностей методов выполнения измерений и однородности навесок.*

Методология. *Сопоставление экспериментальных зависимостей с формулами для расчета однородности навесок для анализа.*
Результаты. *Установленные экспериментально зависимости относительных погрешностей анализа от массовых долей компонентов позволяют определить как однородность навесок, так и погрешности метода выполнения измерений без дополнительных экспериментов. При массовых долях более 0,1 % эти зависимости описывают в основном погрешности метода выполнения измерений. Установлено, что при стандартных условиях анализа относительные погрешности метода выполнения измерений составляют при анализах на медь 0,7 %, на свинец – 0,9 %, на цинк – 1,4 %. При массовых долях менее 0,1 % эти зависимости описывают в основном однородность навесок. Установлено, что однородность навесок описывается зависимостью, в которой массовая доля компонента в знаменателе имеет степень 0,5. Оценка относительной погрешности метода выполнения измерений для массовых долей менее 0,1 % возможна по разности квадратов относительных погрешностей анализа и рассчитанной погрешности неоднородности, но в связи с наличием погрешностей экспериментальных и расчетных оценок ненадежна.*
Выводы. *Если условия анализа соответствуют условиям получения зависимостей относительных погрешностей анализа от массовых долей, то для оценок однородности навесок и метода выполнения измерений нет необходимости выполнения специальных экспериментов.*

Ключевые слова: *погрешность анализа; однородность навески; погрешность метода.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кустанович А. А. Спектральный анализ. М.: Высшая школа, 1970. 256 с.
2. Кубанцев И. А. Определение Au, Pt и Pd в стандартных образцах состава руд: результаты межлабораторного эксперимента в США // Руда и металлы. 2009. № 3. С. 76–78.
3. Козин В. З. Опробование минерального сырья. Екатеринбург: УГГУ, 2011. 316 с.
4. Глазатов А. Н., Цемехман Л. Ш., Спицын Н. К., Казаков А. М., Новиков М. Н., Соколов С. В. Совершенствование методики опробования сливов классификации на обогатительной фабрике ОАО «Кольская ГМК» // Обогащение руд. 2010. № 3. С. 35–38.
5. Козин В. З., Комлев А. С. Об использовании формулы Ричардса–Чечотта для определения массы представленной пробы // Обогащение руд. 2016. № 3. С. 47–51.
6. Прокопьева С. В., Ступакова Е. В. Стандартные образцы для контроля технологических процессов и качества готовой продукции // Золотодобыча. 2013. № 7. С. 5–6.
7. Cleary P. W., Robinson G. K. Sampling of cohesive bulk materials by falling stream cutters // Chemical Engineering Science. 2011. Vol. 66. Iss. 17. P. 3991–4003.
8. Reddi G. S., Rao C. R. M. Analytical techniques for the determination of precious metals in geological and related materials // Analyst. 1999. Vol. 124. P. 1531–1540.
9. Карпенко Н. В. Опробование и контроль качества продуктов обогащения руд. М.: Недра, 1987. 216 с.
10. Пробоотбирание и анализ благородных металлов: справочник / под ред. И. Ф. Барышникова. М.: Металлургия, 1978. 432 с.
11. Cabri L. J., McMahon G. SIMS analysis of sulfide minerals for Pt and Au: methodology and Relative Sensitivity Factors (RSF) // Canadian Mineralogist. 1995. No. 33. P. 349–359.
12. Australasian code for reporting of exploration results, mineral resources and ore reserves // Joint ore reserves committee of the Australasian institute of mining and metallurgy, Australian institute of geoscientists and minerals council of Australia (JORC). 2004 Edition, 63 p.

Сведения об авторах:

Козин Владимир Зиновьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой обогащения полезных ископаемых Уральского государственного горного университета. E-mail: gmf.dek@ursmu.ru
Комлев Алексей Сергеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры обогащения полезных ископаемых Уральского государственного горного университета. E-mail: tails2002@inbox.ru
Ступакова Екатерина Владимировна – начальник отдела метрологического обеспечения количественного химического анализа Иркутского государственного института редких металлов. E-mail: stupakova@irgiredmet.ru

Для цитирования: Козин В. З., Комлев А. С., Ступакова Е. В. Оценка однородности навесок и погрешности метода выполнения измерений при анализе руд и продуктов обогащения // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 3. С. 72–80 (In Eng.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-72-80
For citation: Kozin V. Z., Komlev A. S., Stupakova E. V. Sample weights homogeneity assessment and measurement procedure errors in the analysis of ore and mineral processing products. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 3: 72–80. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-72-80

УДК 622.33:621.31(100) DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-81-89

Значение угольной промышленности на современном и перспективном этапах развития мировой и российской энергетики

Трушина Г. С.[1]
[1] Кузбасский государственный технический университет, г. Кемерово, Россия
e-mail: lilia.au@mail.ru

Реферат

Цель исследования *заключается в определении роли угля в перспективном развитии мировой и российской энергетики среди конкурирующих энергоресурсов мира.*

Методология. *Анализ значимости российского угля в мировой энергетике.*

Результаты исследования. *Показана зависимость развития мировой и российской энергетики от наличия запасов и добычи угля и взаимозаменяемых первичных энергоресурсов по странам мира в текущем периоде и в перспективе. Выявлена роль угля, в том числе российского, в развитии мировой и российской энергетики. Рассмотрены различные сценарии перспективного развития мировой энергетики и добычи взаимозаменяемых первичных энергоресурсов. Отражены возможные проблемы участия угольной промышленности России в развитии мировой энергетики в странах ЕС и России. В целях сохранения экспортных поставок российского угля на европейские рынки обоснована необходимость изменения законодательства Российской Федерации по недропользованию при добыче угля в соответствии с европейскими стандартами способов добычи, рекультивации и восстановления нарушенных земель.*

Область применения. *Результаты исследования можно использовать при разработке перспективных стратегий развития угольной промышленности бассейнов и угольных компаний Российской Федерации.*

Выводы. *В перспективе до 2040 г. уголь останется одним из основных энергетических ресурсов мира и российский уголь будет пользоваться спросом на мировом угольном рынке. Для сохранения и увеличения поставок российского угля необходимо учитывать, что многие потребители, в особенности из европейских стран, отдают предпочтение предприятиям-поставщикам, добывающим уголь в соответствии с европейскими стандартами и имеющим международный сертификат экологического менеджмента. С целью повышения конкурентоспособности российского угля необходимо совершенствование законодательства РФ по недропользованию при добыче угля в соответствии с европейскими стандартами способов добычи, рекультивации и восстановления нарушенных земель.*

Ключевые слова: *развитие; мировая энергетика; мировые энергоресурсы; запасы; роль угольной промышленности; проблемы; природопользование; охрана окружающей среды; рекультивация; совершенствование законодательства.*

Введение. В связи с ростом мирового производства энергии и спроса на энергоресурсы на мировых рынках в настоящий период наблюдается жесткая конкуренция между странами, добывающими и экспортирующими взаимозаменяемые энергоресурсы, в том числе и уголь. Так как угольная промышленность России является экспортно-ориентированной, то для разработки Программ развития угольной промышленности России, в том числе и угольных бассейнов, необходима прежде всего оценка возможностей их участия в развитии мировой энергетики.

В связи с этим исследования по определению значимости российского угля в мировой энергетике являются актуальными.

Анализ структуры потребления энергоресурсов по странам мира. Развитие цивилизации и рост численности населения в мире сопровождается ежегодным ростом потребления энергоресурсов и производства электроэнергии. Так, в 1970 г. население мира составляло 3 692 492 тыс. чел., а на 01.08.2017 г. 7 515 284 тыс. чел., и увеличилось более чем в два раза. Прирост населения в 2017 г. составил 1,11 % [1, 2]. В целом по миру производство электроэнергии за период 2006–2016 гг. увеличилось на 29,7 % и составило 24 816,4 ТВт · ч [3]. Наибольший прирост наблюдался в Китае – 114,3 %, Индии – 88,3 % и Индонезии – 87 %. На долю Китая и США в 2016 г. приходилось 42,3 % от общего производства электроэнергии в мире. Следует ожидать значительного увеличения производства электроэнергии в перспективе, так как по производству электроэнергии на душу населения Китай в 2016 г. существенно уступал многим странам, Индия уступала Китаю в 4,1 раза.

Потребление по видам энергоресурсов в странах мира отражено в табл. 1. Наибольшая доля потребления приходится на Китай и США – 40 %. Уголь среди потребляемых энергоресурсов в 2016 г. занимал второе место, нефть – первое, газ – третье.

Таблица 1. Потребление энергоресурсов по странам мира в 2016 г., млн т н. э. [3]
Table 1. Energy consumption in the countries of the world in 2016, MMTOE [3]

Страна	Нефть	Газ	Уголь	АЭС	ГЭС	ВИЭ	Всего	Доля, %
Китай	579,0	189,3	1888,0	48,0	263,0	86,0	3053,0	23,0
США	863,2	716,3	358,4	192,0	59,2	83,8	2272,7	17,0
Россия	148,0	351,8	87,3	44,5	42,2	0,2	674,0	5,0
Австралия	47,8	37,0	43,8	0	4,0	5,4	138,0	1,0
Турция	41,2	37,9	38,4	0	15,2	5,2	137,9	1,0
Тайвань	46,7	17,2	38,6	7,2	1,5	1,0	112,2	0,8
Германия	113,0	72,4	75,3	19,1	4,8	37,9	322,5	2,4
Казахстан	13,2	12,0	35,6	0	2,1	0,1	63,0	0,5
Индия	212,7	45,1	411,9	8,6	29,1	16,5	723,9	5,4
Индонезия	72,6	33,9	62,7	0	3,3	2,6	175,1	1,3
Всего в мире	4418	3204	3732	592	910	420	13276	100

Наиболее высокий уровень потребления угля в структуре потребления энергоресурсов в 2016 г. у Китая (61,8 %), Индии (56,9 %), Казахстана (56,5 %).

В России, несмотря на огромные запасы угля, доля угля в потреблении энергоресурсов составляла в 2016 г. всего 13 %. Из-за низких внутрироссийских цен на газ уголь постепенно вытесняется газом на внутреннем рынке, но российские угли, особенно кузнецкие, пользуются спросом на мировом угольном рынке [4]. На современном этапе угольная промышленность России переориентировалась на экспортные поставки угля. Несмотря на снижение цен на уголь в период 2012–2016 гг. на мировом рынке, объем добычи угля в РФ ежегодно увеличивается. На экспорт в 2016 г. отправлено 49,6 % от общей добычи угля, на 11,3 % больше уровня поставок 2011 г. (38,3 %), доля угля, идущего на внутренний рынок, составила 50,4 % [4]. Перспективное развитие угольной промышленности России зависит прежде всего от изменения конъюнктуры рынка конкурирующих и взаимозаменяемых энергоресурсов мира [5]. Основными конкурентами угля на мировом рынке среди взаимозаменяемых энергоресурсов в настоящий период являют-

ся нефть и газ. Среди стран, экспортирующих уголь – Австралия, Индонезия, Россия, ЮАР.

Мировые запасы и производство конкурирующих взаимозаменяемых энергетических ресурсов. Мировые запасы угля по данным, отраженным в табл. 2, в 2016 г. составляли 1 139 331 млн т. Первое место по запасам угля занимали США (251 582 млн т, или 22,1 %), второе – Китай (244 010 млн т, или 22,4 %), третье – Российская Федерация (193 300 млн т, или 17 %). На 10 стран приходилось 91,4 % от мировых запасов угля (1 041 469 млн т).

В 2016 г. добыча угля в мире составила 3656,4 млн т н. э. и снизилась по сравнению с 2011 г. на 6,2 %. В Китае добыча угля составила 46,1 % от общей мировой добычи, в США – 10,0 %, Индии – 7,9 %, Австралии – 8,2 %, Индонезии – 7 %, России – 5,3 % (6-е место в мире). По оценке [7], в 2016 г. мировая добыча составляла 7460,4 млн т и снизилась относительно уровня 2012 г. на 4,7 %, по оценке [8] – 7 268,6 млн т. Добыча угля в России составляла 385,7 млн т [6], это 5-е место в мире после Китая (3242,5 млн т), Индии (707,6 млн т), США (671,8 млн т), Австралии (503,3 млн т) и Индонезии (707,6 млн т).

Таблица 2. Запасы и добыча угля основных угледобывающих стран на 01.01.2017 г. [3, 6]
Table 2. Coal reserves and coal mining in the main coal-mining countries as of 01 January, 2017 [3, 6]

Страны	Запасы угля по странам мира, млн т	Доля запасов угля в мировых запасах, %	Добыча угля в 2011 г., млн т н. э.	Добыча угля в 2016 г., млн т н. э.	Доля добычи угля в общем объеме мировой добычи, %	Добыча угля в 2016 г. по отношению к 2011 г., %
США	251 582	22,1	600,9	364,8	10,0	60,7
Китай	244 010	21,4	1851,7	1685,7	46,1	91,0
Россия	193 300	17,1	157,6	192,8	5,3	122,3
Австралия	144 818	12,7	245,1	299,3	8,2	122,1
Индия	94 769	8,3	250,8	288,5	7,9	115,0
Германия	36 212	3,2	46,7	39,9	1,1	85,4
Украина	34 375	3,0	36,3	17,1	0,5	47,1
Казахстан	25 605	2,2	49,8	44,1	1,2	88,6
Индонезия	25 573	2,2	208,2	255,7	7,0	122,8
Польша	24 161	2,1	55,7	52,3	1,4	93,9
Всего в мире	1 139 331	100	3897,3	3656,4	100	93,8

Мировые разведанные запасы нефти (основного конкурента угля) на 01.01.2017 г. составляли 240,7 тыс. млн т [3]. Сосредоточены они в основном в Венесуэле (17,6 %), Саудовской Аравии (15,6 %), Канаде (10,0 %), Иране (9,3 %), Ираке (9,0 %), России (6,4 %), Кувейте (5,9 %), ОАЭ (5,7 %), США (2,8 %). По запасам нефти Россия занимала шестое место в мире. Мировая добыча нефти в 2016 г. составляла 4382,4 млн т [3] с наибольшим объемом добычи в Саудовской Аравии (13,4 %), России (12,6 %) и США (12,4 %), в Ираке и Канаде – по 5 %. По добыче Россия занимала второе место в мире после Саудовской Аравии.

Разведанные мировые запасы природного газа, конкурирующего с углем и вытесняющего его с рынка, на конец 2016 г. составляли 186,6 трлн м^3 [3]. Первое место в мире занимал Иран (18 %), Россия – второе место (17,3 %), Катар – третье (13 %), Туркмения – четвертое (9,4 %), США – пятое (4,7 %), Саудовская Аравия – шестое (4,5 %), ОАЭ – седьмое (3,3 %), Китай – восьмое (2,9 %), Нигерия – девятое (2,8 %), Алжир – десятое (2,4 %).

Мировая добыча природного газа в 2016 г. составляла 3551,6 млрд м^3 [3] и увеличилась относительно уровня добычи 2011 г. на 7,9 %. Первое место в мире по добыче газа занимали США (21,1 %), Россия – второе место (16,03 %), Иран – третье (5,7 %), Катар – четвертое (5,1 %), Канада – пятое (4,3 %), Китай – шестое (3,9 %).

Производство атомной энергии существенного влияния на конкуренцию и вытеснение угля не оказывает. На долю производства энергии атомными станциями на 01.01.2017 г. приходилось лишь 4,46 % от мирового производства энергии. Мировое потребление возобновляемых источников энергии (ВИЭ) имеет тенденцию к росту (в 2006 г. – 93,2 млн т н. э., в 2016 г. – 419,6 млн т н. э. [3]), но доля потребления незначительна: в 2014 г. – 2,41 %, в 2016 г. – 3,1 %. В ближайшей перспективе заменить использование источников первичной энергии, в том числе и угля, с помощью ВИЭ, по мнению автора, невозможно.

Оценка прогноза мирового производства энергии и потребления энергоресурсов. Дальнейший рост населения мира, в основном за счет ожидаемого большого прироста населения Индии и Китая и развития экономики в странах Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР), в перспективе будет сопровождаться увеличением потребления энергии и энергоресурсов.

Вопросами перспективного развития мировой энергетики до 2040 г. занимаются ведущие научные организации мира: МЭА, WEO-2017, WOO-2017 и IEO-2017, ИНЭИ РАН и другие, которые учитывают различные сценарии развития мировой энергетики. Отмечается, что в настоящий период пик максимального потребления угля достигнут в США, Китае, Италии, Австралии; потребления нефти – в США, Германии, Франции, Италии, Великобритании; энергопотребления – в США, Италии, Германии, Великобритании, Франции, Японии; электропотребления – в Великобритании, Италии, Японии. В странах Европы ожидается снижение спроса на энергоресурсы на 10 % [9]. В целом по миру потребление первичных энергоресурсов в 2040 г. может составить 17,5 млрд т н. э. и увеличиться на 4 млрд т н. э. или до 30 % относительно уровня 2015 года, в основном за счет Китая и Индии (более 50 % мирового прироста). В перспективе предполагается увеличение добычи сланцевого газа, особенно в странах АТР.

По прогнозу Международного энергетического агентства, к 2040 г. в структуре потребления энергоресурсов доли нефти, газа, угля, низкоуглеродных источников могут составить примерно по 25 %. Половина прироста мировой добычи газа может быть обеспечена за счет добычи сланцевого газа. В результате к 2040 г. Китай может увеличить добычу газа в 2,5 раза, а США – более чем на 40 %. Это повлияет на снижение спроса на уголь. Газ в структуре потребления энергоресурсов может вытеснить уголь со второго на третье место.

По сценариям WEO-2017 и IEO-2017, объем потребления нефти к 2040 г. может увеличиться от 12 до 19 %, но в структуре энергобаланса доля нефти может уменьшиться.

В вероятном сценарии ИНЭИ РАН к 2040 г. рост мирового электропотребления может составить 52–62 %. В электроэнергетике развивающихся стран, где доминирует потребление угля, угольная генерация может сохраниться на уровне 31–32 %. В Китае, где в 2016 г. до 62 % энергии вырабатывалось на угле, уголь в ближайшие десятилетия, по мнению автора, останется основным энергоресурсом. Доля атомной генерации в выработке электроэнергии может увеличиться с 11 % в 2015 г. до 12 % в 2040 г. Китай, в связи с сокращением запасов угля, может увеличить производство атомной энергии в 5 раз и занять первое место по ее производству, США – второе, Франция – третье, Южная Корея – четвертое, Россия – пятое. Количество стран, производящих электроэнергию на АЭС, будет расти при одновременном снижении производства в странах Европы с 15 до 27 % [10].

Таким образом, в целом по миру в долгосрочной перспективе доля угля в первичном потреблении энергоресурсов может сократиться с 28 % в 2015 г. до 20–23 % в 2040 г., но в абсолютном выражении снижения потребления угля не предполагается, уголь будет являться одним из основных энергетических ресурсов мира. Российский уголь будет пользоваться спросом на мировом угольном рынке [4, 11]. Учитывая то, что запасы природных ресурсов ежегодно истощаются, при условии сохранения годовой добычи в мире на уровне 2016 г. мировых разведанных запасов угля, без учета открытия новых месторождений, может хватить в среднем на 150 лет, в России – до 500 лет, в США – до 370 лет, в Китае – до 75, Австралии – 288, Индии – 133, Индонезии – 36 лет. Газа, без учета открытия новых месторождений, может хватить лишь на 53 года, нефти, соответственно, на 55 лет. Поэтому уголь и в дальнейшей перспективе будет занимать лидирующее положение в развитии энергетики.

Основные пути сохранения спроса на российский уголь на мировых угольных рынках. Экспортные поставки российского угля ежегодно растут, в 2017 г. они составили 186,3 млн т, или 45,6 % от общего объема добычи угля (408,9 млн т). Наибольшая доля поставок угля приходится на основной Кузнецкий угольный бассейн – 75,5 % (140,7 млн т). С целью увеличения экспортных поставок добыча угля в Кузбассе с 2007 по 2017 г. увеличилась на 32,9 %, преимущественно за счет более дешевого способа добычи угля открытым способом (64,8 %) и составила 241,5 млн т. Уголь поставлялся в 61 страну мира [12]. В перспективе предполагается существенное увеличение добычи угля в России и экспортных поставок российского, и прежде всего кузнецкого, угля (в проекте Стратегии развития Кемеровской области до 2035 г. предусматривается рост добычи угля в Кузбассе с 241,5 млн т (2017 г.) до 375 млн т, или на 155,3 %).

Для сохранения и увеличения поставок российского угля необходимо учитывать то, что многие потребители, в особенности из европейских стран, отдают предпочтение предприятиям-поставщикам, добывающим уголь в соответствии с европейскими стандартами и имеющим международный сертификат экологического менеджмента. Также необходимо учитывать назревающую проблему с экспортными поставками в европейские страны. В настоящий период в прессе Англии наблюдаются призывы к предприятиям об отказе российским поставщикам угля, так как способы добычи и восстановления нарушенных земель в РФ не соответствуют европейским стандартам сохранения ландшафта и биоразнообразия территорий, ущемляют интересы и права местных общин коренных малочисленных народов [13, 14]. Эти призывы могут способствовать потере существенной части европейского угольного рынка. Для предотвращения потерь рынка сбыта угольным компаниям целесообразно своевременно переходить на европейские стандарты добычи и восстановления нарушенных земель, сохранения фауны и флоры в регионах, осуществляющих добычу угля.

На примере функционирования угледобывающих предприятий Кузбасса можно отметить, что в целях получения большего размера прибыли не все предприятия выполняют требования по рекультивации нарушенных земель, хотя на пластах пологого падения при открытом способе добычи угля возможно осуществлять добычу одновременно с рекультивацией и восстановлением нарушенных земель. Десятилетиями при отработке запасов в области сохраняются отвалы и огромные площади территорий с нарушенным ландшафтом.

На ухудшение экологии населенных пунктов угольных регионов в значительной степени влияет то, что по федеральным нормам расстояние от угледобывающих предприятий до населенных пунктов составляет всего 1 км, от отвалов – 500 м, что позволяет без нарушения закона вести взрывные работы, добычу, складирование, погрузку и транспортировку угля в непосредственной близости от жилых

массивов. Выбросы угольной пыли и других токсически вредных веществ способствуют возникновению заболеваний легочных путей [15] и других заболеваний. Низкий размер штрафов за нарушение нормативов по охране окружающей среды и сложность своевременного определения органами надзора предприятий-нарушителей, особенно при скученности угольных разрезов на одной территории, способствуют тому, что над населенными пунктами зачастую нависает смог (например, с. Каракан Беловского района, которое окружают участки шести разрезов). Отсутствие своевременного контроля объясняется тем, что закон РФ № 294 разрешает плановую проверку предприятий один раз в три года, внеплановый контроль возможен лишь при наличии заявления от жителей (организаций) территории с последующим получением разрешения на проверку предприятий от прокуратуры.

В целях сохранения мировых угольных рынков, восстановления ландшафта нарушенных территорий, обеспечения экологической и продовольственной безопасности регионов, сохранения местных общин коренных малочисленных народов в РФ, по мнению автора, необходимо:

– в законодательной форме определить порядок отведения недр с учетом интересов не только государства, но и территорий; Министерству природных ресурсов и экологии РФ необходимо согласовывать выдачу лицензий на добычу угля с территориальными властями;

– Правительству РФ целесообразно поручить Министерству природных ресурсов и экологии РФ разработать и представить к утверждению в Государственную Думу закон о рекультивации нарушенных земель, предусматривающий одновременную добычу угля на пластах пологого падения открытым способом и рекультивацию нарушенных земель; пересмотреть сроки выполнения и виды работ по рекультивации нарушенных земель в соответствии с европейскими стандартами [16–18]; учитывая распространение угольной пыли на многие километры и ее влияние на ухудшение здоровья населения [15], пересмотреть федеральные нормы по санитарно-защитной зоне от разрезов, отвалов, складов до населенных пунктов в сторону их значительного увеличения;

– Правительству РФ целесообразно внести предложение Государственной Думе о внесении поправки в закон РФ № 294 «О защите прав юридических лиц и индивидуальных предпринимателей при осуществлении государственного контроля (надзора) и муниципального контроля», разрешающей работникам Росприроднадзора и Ростехнадзора круглосуточно и беспрепятственно осуществлять проверки промышленных предприятий в случаях превышения норм выбросов загрязняющих веществ в атмосферу в примыкающих к ним населенных пунктах.

В текущих, стратегических и перспективных планах угольных компаний необходимо предусматривать стратегические направления по внедрению экологически чистой технологии добычи, обогащения угля и рекультивации земель [19].

Выводы. В перспективе до 2040 г. уголь останется одним из основных энергетических ресурсов мира и российский уголь будет пользоваться спросом на мировом угольном рынке. Для сохранения и увеличения поставок российского угля необходимо учитывать то, что многие потребители, особенно из европейских стран, отдают предпочтение предприятиям-поставщикам, добывающим уголь в соответствии с европейскими стандартами и имеющим международный сертификат экологического менеджмента. С целью повышения конкурентоспособности российского угля необходимо совершенствование законодательства РФ по недропользованию при добыче угля в соответствии с европейскими стандартами способов добычи, рекультивации и восстановления нарушенных земель.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Численность населения в мире по годам. URL: http://total-rating.ru/1919-chislennost-naseleniya-v-stranah-na-2017 god.html (дата обращения: 08.06.2018).
2. Численность населения в мире по годам. URL: http://total-rating.ru/1918-chislennost-naseleniya-v-mire-po-godam.html (дата обращения: 01.06.2018).
3. BP Statistical Review of World Energy June 2017. URL: http://bergminer.blogspot.ru/2017/06/world-coal-production-2016.html (дата обращения: 01.07.2017).
4. Трушина Г. С. Основные пути эффективного развития предприятий угольной промышленности Кузбасса // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 6. С. 25–30.
5. Трушина Г. С., Присташ Я. В. Экономическая оценка потенциала угледобывающего предприятия. Кемерово: КузГТУ, 2003. 132 с.
6. Таразанов И. Г. Итоги работы угольной промышленности России за январь–декабрь 2016 года // Уголь. 2017. № 3. С. 36–50. DOI: 10.18796/0041-5790-2017-3-36-50
7. Mining engineer unit. Bergmann Miner 1.8.12, 1.2.17. URL: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CoalInformation 2017 Overview.pdf (дата обращения: 01.07.2018).
8. Coal international energy agency. URL: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CoalInformation 2017 Overview.pdf (дата обращения: 01.07.2018).
9. Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 г., ИНЭИ РАН. URL: https://www.eriras.ru/files/prognoz-2040.pdf (дата обращения: 13.06.2018).
10. PRoAtom – Перспективы атомной энергетики в мире и России. URL: http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=7295 (дата обращения: 29.06.2018).
11. Трушина Г. С. Анализ перспективы угольной промышленности Кузбасса // ТЭК и ресурсы Кузбасса. 2013. № 4. С. 42.
12. Власти Кузбасса подвели итоги работы угольной отрасли за 2017 год. URL: http://толк42.рф/show2/3407/ (дата обращения: 15.06.2018).
13. Копытов А. И., Манаков Ю. А., Куприянов А. Н. Развитие угледобычи и проблемы сохранения экосистем в Кузбассе // Уголь. 2017. № 3. С. 72–77. DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2017-3-72-77
14. Манаков Ю. А., Куприянов А. Н., Копытов А. И. Добыча каменного угля в Кузбассе в аспекте устойчивого развития региона // Уголь. 2018. № 9. С. 89–94. DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2018-9-89-94
15. Мун С. А., Ларин С. А., Глушков А. Н. Влияние роста добычи угля на загрязнение атмосферы и заболеваемость раком легкого в Кемеровской области // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 1. URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=8406 (дата обращения: 01.07.2018).
16. Jason Hayes. Returning mined land to productivity through reclamation. Winter 2015, Cornerstone. Vol. 3. No. 4. URL: http://www.worldcoal.org (дата обращения: 05.06.2018).
17. Warrick J. & Mufson S. (2015, August 3). Enemies of the net-plan air rules multi-faceted battle // Washington Post. URL: http://www.washingtonpost.com/national/health-science/opponents-lay: the Foundation for state control of pollutants-borders. 2015/08/03/ (дата обращения: 15.06.2018).
18. Miller C. G. Financial assurance for mine closure and reclamation. Ottawa, Canada. February 2005. URL: http://www.icmm.com/website/publications/pdfs/mine-closure/282.pdf (дата обращения: 15.06.2018).
19. Трушина Г. С. Экономическая оценка стратегии функционирования угледобывающего предприятия // Уголь. 2017. № 3. С. 52–55. DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2017-3-52-55

Поступила в редакцию 21 сентября 2018 года

Сведения об авторах:

Трушина Галина Семеновна – доктор экономических наук, профессор кафедры производственного менеджмента Кузбасского государственного технического университета. E-mail: lilia.au@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-81-89

The significance of coal industry at the modern and future stages of global and Russian energy sector development

Galina S. Trushina[1]
[1] Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia.

Abstract

Research aims *to determine the role of coal industry in the future development of global and Russian energy sectors among rival energy resources of the world.*
Metodology. *The analysis of Russian coal significance in global energy sector.*
Research results. *The article shows the dependence of global and Russian energy sectors on reserves and coal mining availability as well as interchangeable primary energy resources in the countries of the world*

in the current period and in the near future. The role of coal, including Russian coal, in the development of global and Russian energy sector has been determined. Different scenarios of global energy sector future development and the production of competing interchangeable primary energy resources have been considered. The article reveals possible problems concerning Russia's coal industry participation in the development of global energy sector in European countries and in Russia. To maintain the export delivery of Russian coal to European markets, the need for the modification of RF subsoil use legislation has been substantiated in accordance with the European standards of mining with the simultaneous recultivation and reclamation of the disturbed areas.

Scope. *Research results can be useful when working out future strategies of developing coal industry of basins and coal companies in the Russian Federation.*

Summary. *By 2040, coal will remain one of the main energy resources in the world, and Russian coal will be in request on the world market. To maintain and increase Russian coal export it should be taken into account that the majority of consumers, in European countries in particular, prefer the supplier plants which mine the coal in accordance with the European standards and have international certificate of environmental management. With the purpose of increasing the competitiveness of Russian coal it is essential to improve the subsoil use legislation of the Russian Federation in terms of coal mining in accordance with the European standards of production with the simultaneous recultivation and reclamation of the disturbed areas.*

Key words: *development; global energy sector; global energy resources; reserves; the role of coal industry; problems; subsoil use; environmental protection; recultivation; legislation improvement.*

REFERENCES

1. Total-rating. *World population by year*. Available from: http://total-rating.ru/1919-chislennost-naseleniya-v-stranah-na-2017 god.html [Accessed 8th June 2018]. (In Russ.)
2. Total-rating. *World population by year*. Available from: http://total-rating.ru/1918-chislennost-naseleniya-v-mire-po-godam.html [Accessed 8th June 2018]. (In Russ.)
3. BP Statistical Review of World Energy June 2017. Available from: http://bergminer.blogspot.ru/2017/06/world-coal-production-2016.html [Accessed 1st July 2017].
4. Trushina G. S. The basic ways of efficient development of Kuzbass coal mining enterprises. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2017; 6: 25–30. (In Russ.)
5. Trushina G. S., Pristash Ia. V. *Economic evaluation of the potential coal mines*. Kemerovo: KuzSTU Publishing; 2003. (In Russ.)
6. Tarazanov I. G. Russia's coal industry performance for January–December, 2016. *Ugol = Coal*. 2017; 3: 36–50. DOI: 10.18796/0041-5790-2017-3-36-50 (In Russ.)
7. International energy Agency. *Mining engineer unit. Bergmann Miner 1.8.12, 1.2.17*. Available from: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CoalInformation 2017 Overview.pdf [Accessed 1st July 2017].
8. International energy Agency. *Coal international energy agency*. Available from: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CoalInformation 2017 Overview.pdf [Accessed 1st July 2017].
9. The Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences. *Global and Russian energy outlook up to 2040*, ERI RAS. Available from: https://www.eriras.ru/files/prognoz-2040.pdf [Accessed 13th June 2018]. (In Russ.)
10. PRoAtom. *The prospects of the nuclear power in the world and in Russia*. Available from: http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=7295 [Accessed 29th June 2018]. (In Russ.)
11. Trushina G. S. Analysing the prospects of Kuzbass coal industry. *TEK i resursy Kuzbassa = Energy Industry and Resources of Kuzbass*. 2013; 4: 42. (In Russ.)
12. Tolk42. *Kuzbass government has summarized the work of the coal industry for 2017*. Available from: http://толк42.рф/show2/3407 [Accessed 15th June 2018]. (In Russ.)
13. Kopytov A. I., Manakov Iu. A., Kupriianov A. N. Coal mining and issues of ecosystem preservation in Kuzbass. *Ugol = Coal*. 2017; 3: 72–77. DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2017-3-72-77 (In Russ.)
14. Manakov Iu. A., Kupriianov A. N., Kopytov A. I. Kuzbass coal mining for the region stable development. *Ugol = Coal*. 2018; 9: 89–94. DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2018-9-89-94 (In Russ.)
15. Mun S. A., Larin S. A., Glushkov A. N. The influence of mining on atmosphere contamination and lung cancer in the Kemerovo region. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia = Modern Problems of Science and Education*. 2013; 1. Available from: https://science-education.ru/ru/article/view?id=8406 [Accessed 1st July 2018]. (In Russ.)
16. Jason Hayes. Returning mined land to productivity through reclamation. Winter 2015, Cornerstone. Vol. 3. No. 4. Available from: http://www.worldcoal.org [Accessed 5th June 2018].
17. Warrick J. & Mufson S. (2015, August 3). Enemies of the net-plan air rules multi-faceted battle // Washington Post. Available from: http://www.washingtonpost.com/national/health-science/opponents-lay: the Foundation for state control of pollutants-borders. 2015/08/03/ [Accessed 15th June 2018].
18. Miller C. G. *Financial assurance for mine closure and reclamation*. Ottawa, Canada. February 2005. Available from: http://www.icmm.com/website/publications/pdfs/mine-closure/282.pdf [Accessed 15th June 2018].

19. Trushina G. S. Economic evaluation of coal mine operation strategy. *Igol = Coal*. 2017; 3: 52–55. DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2017-3-52-55 (In Russ.)

Received 21 September, 2018

Information about authors:

Galina S. Trushina – D. Sc. (Economics), professor of Industrial Management Department, Kuzbass State Technical University. E-mail: lilia.au@mail.ru

Для цитирования: Трушина Г. С. Значение угольной промышленности на современном и перспективном этапах развития мировой и российской энергетики // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 3. С. 81–89. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-81-89
For citation: Trushina G. S. The significance of coal industry at the modern and future stages of global and Russian energy sector development. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 3: 81–89 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-81-89

УДК 622.44 DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-90-96

Градиент давления по высоте лопаток в шахтных осерадиальных вентиляторах с конической проточной частью

Афанасьев А. И.[1], Казаков Ю. М.[1], Копачев В. Ф.[1]*
[1] Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия
e-mail: u1331@yandex.ru

Реферат

Цель работы. *Исследование основных закономерностей изменения аэродинамических параметров по высоте лопаток в шахтных осерадиальных вентиляторах с конической проточной частью с целью определения их рациональных конструктивных соотношений, позволяющих создавать шахтные вентиляторы с высокими показателями давления и производительности.*

Методика проведения исследований. *На основании расчетной схемы конической проточной части проведен анализ изменения градиента давления по высоте лопаток осерадиального вентилятора для различных значений углов конусности его втулки и корпуса. Для математического исследования приведены теоретические зависимости влияния основных геометрических и кинематических параметров на значение градиента давления по высоте лопатки рабочего колеса осерадиального вентилятора.*

Результаты и их анализ. *Методом численного интегрирования решено уравнение, связывающее степень закрутки воздушного потока, радиус кривизны тока и градиент давления по высоте лопатки. Предложен закон закрутки воздушного потока в вентиляторе на основании показателя степени, характеризующего закономерность изменения скорости закручивания потока воздуха по высоте лопатки. Осуществлена проверка адекватности предложенной методики расчета путем сравнения полученных результатов с расчетными показателями, выполненными по известным зависимостям. Результаты расчетов, приведенные в статье, показывают, что среднее давление по высоте лопаток осерадиальных вентиляторов имеет более благоприятный характер, чем у осевых машин с радиальным равновесием потока. При этом исключаются отрицательные значения теоретического давления, что позволяет использовать в вентиляторе втулки значительно меньшего диаметра.*

Выводы и область применения результатов. *Существенное влияние на эффективность работы осерадиального вентилятора оказывает закон закручивания потока. Изменение углов конусности втулки и корпуса в исследуемом диапазоне на эффективность работы вентилятора влияет в меньшей степени. Установленные зависимости открывают широкие возможности для создания более совершенных конструкций шахтных вентиляторов местного, вспомогательного и главного проветривания, а также вентиляторов, которые могут использоваться в системах струйного проветривания камер горных выработок.*

Ключевые слова: *вентилятор; аэродинамический расчет; циркуляция; осерадиальный вентилятор; высоконапорный вентилятор; математическое моделирование; вентиляция; схемы вентиляторов.*

Цель работы. Расчет энергоэффективных схем вентиляторов является приоритетной задачей современных исследований. В последнее время приобретают все большее значение методы оптимизации существующих конструкций вентиляторов, а не создание новых типов машин [1, 2]. Конструкции современных вентиляторов разрабатываются исходя из существенных факторов, влияющих на ре-

жимы и условия их работы, с учетом заданных ограничений по безопасности в эксплуатации применения в сложных условиях промышленных и горных предприятий [3, 4]. Определение и теоретический расчет оптимальных конструктивных параметров турбомашин основываются на обработке значительного количества экспериментального материала и методах численного моделирования [5, 6] с учетом заданных краевых условий.

В статье приведены результаты исследования основных закономерностей изменения аэродинамических параметров по высоте лопаток в шахтных осерадиальных вентиляторах с конической проточной частью с целью определения их рациональных конструктивных соотношений, позволяющих создавать шахтные вентиляторы с высокими показателями давления и производительности.

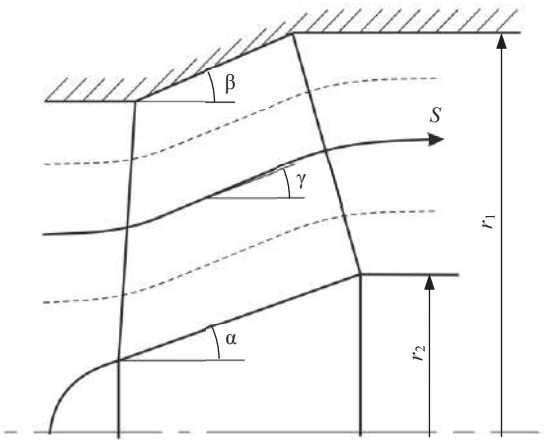


Рис. 1. Расчетная схема конической проточной части осевого вентилятора
Fig. 1. Calculation scheme of an axial fan flare blade section

Методика проведения исследований. В середине XX в. ученики и последователи Н. Е. Жуковского в работах [7–10] сделали вывод, что в одноступенчатых вентиляторах, рассчитанных на высокое давление, рационально иметь переменную циркуляцию потока по радиусу. В настоящее время при расчетах параметров осевых вентиляторов используются определенные законы закручивания воздушного потока: постоянство произведения скорости закручивания на радиус (вентилятор типа НЕЖ) или закон постоянства степени реактивности колеса. В работах Центрального аэрогидродинамического института им. Н. Е. Жуковского [7, 11] отмечается, что в общем виде скорость закручивания можно записать в виде

$$C_u = Ar + (B/r),$$

где A, B – постоянные величины; r – радиус лопатки вентилятора.

Изменяя A и B, можно получить промежуточные законы между законом постоянной реактивности и законом постоянной циркуляции. Это позволяет исследовать характеристики турбомашин вентиляторов и на этой базе создавать более высоконапорные и производительные шахтные вентиляторы. К ним относятся осевые вентиляторы с конической проточной частью. В таком вентиляторе линия тока воздуха S в конической проточной части будет иметь осесимметричное криволинейное направление (рис. 1).

В соответствии с приведенной схемой угол наклона γ касательной к линии тока определяется из уравнения

$$\gamma = k_1 r + k_2,$$

где $k_1 = (\beta - \alpha)/(r_1 - r_2)$; $k_2 = (-r_2\beta + r_1\alpha)/(r_1 - r_2)$; α – угол наклона втулки; β – угол наклона кожуха; r_2 – внутренний радиус лопатки на выходе; r_1 – внешний радиус лопатки на выходе.

Расчетные значения параметров вентиляторов с конической и цилиндрической проточной частью и разными законами закрутки
Calculation values of the parameters of fans with flare and cylindrical blade section and different air swirl rules

Углы конусов		n	N	C_u, м/с		$H_т$, кПа		$(H_{тг2}+H_{тг1})/2$
α	β			r_2 = 0,375 м	r_1 = 0,75 м	r_2 = 0,375 м	r_1 = 0,75 м	
0	0	1	30	79,9	39,9	1,55	4,5	3,1
			40	106,6	53,2	0,32	5,5	2,9
			50	112,5	66,5	–1,70	6,3	2,6
11	29	–0,25	90	70,4	83,8	5,65	7,2	6,4
			110	86,1	102,4	4,50	7,6	6,0
		–0,33	95	68,7	86,7	5,21	6,7	6,0
			115	83,2	104,6	3,05	7,0	5,0
		–0,50	100	61,2	86,7	6,04	6,7	6,4
			120	73,5	104,0	6,19	7,0	6,6
11	20	–0,25	90	70,4	83,8	4,87	6,6	5,7
	11		90			4,77	6,6	5,7
	5		90			4,95	6,6	5,8
	20		110	86,1	102,4	3,23	7,6	5,4
	11		110			2,45	7,6	5,0
	5		110			3,42	7,6	5,5
	20	–0,33	105	76,0	95,5	4,28	6,9	5,6
	11		105			3,70	6,9	5,3
	5		105			3,70	6,9	5,3

Теория вентиляторов с конической проточной частью изложена в [12]. Расчетное уравнение градиента давления в конической ступени вентилятора имеет вид

$$\frac{dH^*}{dr} = \frac{0,5dw^2}{dr} + \frac{C_u^2}{r} - r\omega^2 + w_s^2\left(\frac{\cos^2\gamma\left(2r^2\right)^{-1}d\left(r\mathrm{tg}\gamma\right)^2}{dr} - \frac{\cos^{-1}\gamma\partial\gamma}{\partial S}\right), \qquad (1)$$

где H^* – изоэнтропический напор заторможенного потока; w – относительная скорость; ω – угловая скорость колеса; w_s – скорость воздуха вдоль линии тока.

Решение этого уравнения требует знания одного замыкающего условия – закона закрутки и радиуса кривизны потока. В [12] показано, что радиус кривизны существенно больше, чем радиус лопаток ($\partial S/\partial\gamma >> r$), поэтому уравнение (1) можно записать в виде

$$\frac{dH^*}{dr} = \frac{0,5dw^2}{dr} + \frac{C_u^2}{r} - r\omega^2 + w_s^2\left(\frac{\cos^2\gamma\left(2r^2\right)^{-1}d\left(r\mathrm{tg}\gamma\right)^2}{dr}\right). \quad (2)$$

Преобразуем уравнение (2), учитывая, что $w^2 = C_a^{\,2} + (u - C_u)^2$; $w_s^{\,2}\cos^2(\gamma) = w^2$ (C_a – осевая скорость воздуха; u – окружная скорость лопатки на радиусе r), и учтем влияние закона закрутки воздушного потока на градиент давления.

В общем виде закон закрутки воздушного потока представляем в виде:

$$C_u r^n = N = \mathrm{const}, \quad (3)$$

где n – показатель степени, характеризующий закономерность изменения скорости закручивания потока воздуха по высоте лопатки.

Окончательно имеем:

$$\frac{dH^*}{dr} = \left(n-1\right)N\omega r^{-n} + N^2 r^{-1-2n}\left(1-n\right) + \\ + \left(\left(\omega r\right)^2 - 2N\omega r^{1-n} + N^2 r^{-2n} + C_a^2\right)\left(r^{-1}\mathrm{tg}^2\gamma + k_1\mathrm{tg}^3\gamma + k_1\mathrm{tg}\gamma\right). \quad (4)$$

Результаты и их анализ. Аналитического решения уравнение (4) не имеет, поэтому используем метод численного интегрирования. Проверка адекватности математической модели проведена путем сравнения результатов расчета давления по предлагаемой методике и известной формуле, приведенной в [7, 10].

При $n = 1$ и углах конусности, равных нулю, получается «классический» вентилятор типа НЕЖ [13].

Теоретическое значение давления у осевого вентилятора с цилиндрической проточной частью [7, 10]

$$H_\text{т} = \rho C_u\left(u - 0,5C_u\right), \quad (5)$$

где ρ – плотность воздуха. В результате вычислений получено $H_\text{т} = 6330$ Па.

Производная теоретического давления по радиусу

$$\frac{dH_\text{т}}{dr} = -\rho N^2 r^{-2n-1}. \quad (6)$$

Проинтегрируем уравнение (6) и определим постоянную интегрирования из условия, что известно давление на радиусе 0,75 м:

$$H_\text{т} = -0,5\rho N^2 r^{-2n} + D. \quad (7)$$

Постоянная интегрирования $D = 8996$ Па ≈ 9,0 кПа.

Подставим это значение D в уравнение (7) и определим давление на минимальном радиусе $r_2 = 0,375$. Это давление оказывается равным –1,7 кПа, что совпадает с расчетным значением давления, определенным по формуле (5). Таким образом, зная производную давления по радиусу, можно определить давление по высоте лопаток.

В таблице приведены значения параметров вентиляторов с конической и цилиндрической проточной частью и разными законами закрутки.

Выводы и область применения результатов. Результаты расчетов, приведенные в таблице, показывают, что среднее давление по высоте лопаток для осерадиальных вентиляторов ($n < 0$) имеет более благоприятный характер, чем у осевых машин с радиальным равновесием потока ($n = 1$). При этом исключаются отрицательные значения $H_т$, что позволяет использовать втулки значительно меньшего диаметра. Это открывает широкие возможности для создания более совершенных конструкций шахтных вентиляторов местного, вспомогательного и главного проветривания и общепромышленного назначения и может использоваться в системах струйного проветривания камер горных выработок [14].

Определение значений C_u на основании показателя n, найденного решением уравнения (3), может быть положено в основу методики аэродинамического расчета и построения профилей лопаток рабочих колес шахтных вентиляторов для различных значений r по высоте лопаток от втулки до корпуса машины, позволяющей создавать осевые и осерадиальные вентиляторы новых эффективных конструктивных решений.

Выводы. Таким образом, определено, что существенное влияние на эффективность работы осерадиального вентилятора оказывает закон закручивания потока. Изменение углов конусности втулки корпуса в исследуемом диапазоне влияет на эффективность работы осерадиального вентилятора в меньшей степени.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Замолодчиков Г. И. Профилирование осевого рабочего колеса вентилятора с высокой аэродинамической нагруженностью // Молодежный научно-технический вестник. 2014. № 1. С. 6.

2. Desai D., Zhou J. Optimization design of an axial-flow fan used in local ventilation in mining industry. ASME 2011. Proc. International Mechanical Engineering Congress and Exposition. IMECE 2011. 2011. Vol. 1. P. 879–883.

3. Казаков Б. П., Левин Л. Ю. К вопросу выбора вентиляторов главного проветривания рудников // Горное эхо. 2014. № 1 (54). С. 29–33.

4. Gamble G. A., Ray Jr. R. E. Differences in design considerations for tunnel vs. mine ventilation fan systems. Proc. SME Annual Meeting and Exhibit and CMA's 111th National Western Mining Conference. 2009. № 1. P. 366–371.

5. Пикущак Е. В., Миньков Л. Л. Метод расчета аэродинамического коэффициента полезного действия осевого вентилятора // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2016. № 1 (39). С. 90–101.

6. Поташев А. В., Поташева Е. В. Проектирование рабочих колес турбомашин на основе решения обратных краевых задач // Ученые записки Казанского университета. Сер. Физико-математические науки. 2015. Т. 157. № 1. С. 128–140.

7. Брусиловский И. В. Аэродинамика осевых вентиляторов. М.: Машиностроение, 1984. 240 с.

8. Кампсти Н. Аэродинамика компрессоров / пер. с англ. М.: Мир, 2000. 688 с.

9. Ушаков К. А., Поликовский В. И., Невельсон М. И., Татаринов М. П. Рудничные вентиляторные установки. М.: ГОНТИ НКТП, 1938. 205 с.

10. Ушаков К. А., Брусиловский И. В., Бушелев А. Р. Аэродинамика осевых вентиляторов и элементы их конструкции. М.: ГНТИ, 1960. 419 с.

11. Брусиловский И. В. Аэродинамические схемы и характеристики осевых вентиляторов ЦАГИ: справ. пособие. М.: Недра, 1978. 198 с.

12. Холщевиков К. В., Емин О. Н., Митрохин В. Т. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. М.: Машиностроение, 1986. 428 с.

13. Жуковский Н. Е. Вихревая теория гребного винта. М.-Л.: Госуд. изд. техн.-теор. литер., 1950. 239 с.

14. Drenda J., Domagała L., Musioł D., Pach G., Różański Z. An analysis of selected jet fans used in chambers of KGHM mines with respect to the air stream range. Tunnelling and Underground Space Technology. 2018. Vol. 82. P. 303–314.

Поступила в редакцию 10 декабря 2018 года

Сведения об авторах:

Афанасьев Анатолий Ильич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической механики Уральского государственного горного университета. E-mail: gmf.tm@m.ursmu.ru

Казаков Юрий Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры технической механики Уральского государственного горного университета. E-mail: gmf.tm@m.ursmu.ru

Копачев Валерий Феликсович – кандидат технических наук, доцент, декан факультета городского хозяйства, доцент кафедры технической механики Уральского государственного горного университета. E-mail: u1331@yandex.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-90-96

Pressure gradient by the height of blades in mine axial-radial fans with a flare blade section

Anatolii I. Afanasiev[1], Iurii M. Kazakov[1], Valerii F. Kopachev[1]
[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Research aims *to study the main alternation regularities in aerodynamic parameters by the height of blades in mine axial-radial fans with a flare blade section in order to determine their rational structural correlations allowing to create mine fans with high pressure indicators and high productivity.*

Research methodology. *Based on the calculation scheme of a flare blade section, pressure gradient alternation by height of blades in mine axial-radial fan has been analysed for different cone angles values of its bushing and body. For mathematical investigation, theoretical dependences of main geometrical and kinematic parameters influence on pressure gradient value by the height of axial-radial fan impellor blade.*

Results and their analysis. *An equation is solved with a numerical quadrature method connecting air flow swirl degree, current curvature radius, and pressure gradient by the height of a blade. The rule of air flow swirl in a fan has been proposed based on the indicator of a power index characterizing the regularity of air flow swirl rate change by the height of a blade. Adequacy of the proposed methods of calculation has been checked by means of comparing the obtained results and the calculated indicators performed across the known dependences. Calculation results, set out in the present article, show that medium pressure by the height of blades of axial-radial fans is more favourable than that of axial machines with flow radial equilibrium. Besides, negative values of theoretical pressure are excluded, it allows using bushings of a significantly smaller diameter in a fan.*

Summary and scope of results. *Significant influence on the effectiveness of axial-radial fan operation is made by a rule of flow swirl. Bushing and body cone angles alteration in the investigated range influences the effectiveness of a fan's operation to a lesser degree. The discovered dependences open up possibilities to create more refined designs of mine fans for local, auxiliary, and mail ventilation as well as fans which can be used in the systems of mine chambers jet ventilation.*

Key words: *fan; aerodynamic calculation; circulation; axial-radial fan; high pressure fan; mathematical simulation; ventilation; ventilation scheme.*

REFERENCES

1. Zamolodchikov G. I. Profiling the axial impellor of a fan with high aerodynamic load. *Molodezhnyi nauchno-tekhnicheskii vestnik = Youth Scientific and Technical Bulletin*. 2014; 1: 6. (In Russ.)
2. Desai D., Zhou J. Optimization design of an axial-flow fan used in local ventilation in mining industry. *ASME 2011. Proc. International Mechanical Engineering Congress and Exposition. IMECE 2011*. 2011; 1: 879–883.
3. Kazakov B. P., Levin L. Iu. On the question of mine main fans selection. *Gornoe ekho = Mining Echo*. 2014; 1 (54): 29–33. (In Russ.)
4. Gamble G. A., Ray Jr. R. E. Differences in design considerations for tunnel vs. mine ventilation fan systems. *Proc. SME Annual Meeting and Exhibit and CMA's 111th National Western Mining Conference*. 2009; 1: 366–371.
5. Pikushchak E. V., Minkov L. L. Method of calculating the aerodynamic efficiency of the axial fan. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika = Tomsk State University Journal. Mathematics and Mechanics*. 2016; 1 (39): 90–101. (In Russ.)
6. Potashev A. V., Potasheva E. V. The design of turbomachinery impellers based on the solution of inverse boundary value problems. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Ser. Fiziko-matematicheskie nauki = Proceeding of Kazan University. Physics and Mathematics Series*. 2015; 157 (1): 128–140.
7. Brusilovskii I. V. *Aerodynamics of axial radiators*. Moscow: Mashinostroenie Publishing; 1984. (In Russ.)
8. Kampsti N. *Aerodynamics of compressors*. Translation from English. Moscow: Mir Publishing; 2000. (In Russ.)
9. Ushakov K. A., Polikovskii V. I., Nevelson M. I., Tatarinov M. P. *Mine ventilation installations*. Moscow: GONTI NKTP Publishing; 1938. (In Russ.)
10. Ushakov K. A., Brusilovskii I. V., Bushelev A. R. *Aerodynamics of axial fans and their structural elements*. Moscow: GNTI Publishing; 1960. (In Russ.)
11. Brusilovskii I. V. *Aerodynamic schemes and the characteristics of TsAGI (Central Institute of Aerodynamics) axial fans: reference*. Moscow: Nedra Publishing; 1978. (In Russ.)
12. Kholshchevikov K. V., Emin O. N., Mitrokhin V. T. *Theory and calculation of aircraft impeller machines*. Moscow: Mashinostroenie; 1986. (In Russ.)

13. Zhukovskii N. E. *The vortex theory of screw propellers*. Moscow, Leningrad: Gosud. izd. tekhn.-teor. liter. Publishing; 1950. (In Russ.)
14. Drenda J., Domagała L., Musioł D., Pach G., Różański Z. An analysis of selected jet fans used in chambers of KGHM mines with respect to the air stream range. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018; 82: 303–314.

Received 10 December, 2018

Information about authors:

Anatolii I. Afanasiev – D. Sc. (Engineering), Professor, professor of Engineering Mechanics Department, Ural State Mining University. E-mail: gmf.tm@m.ursmu.ru
Iurii M. Kazakov – PhD (Engineering), associate professor of Engineering Mechanics Department, Ural State Mining University. E-mail: gmf.tm@m.ursmu.ru
Valerii F. Kopachev – PhD (Engineering), Associate Professor, Dean of the Faculty of Municipal Services, associate professor of Engineering Mechanics Department, Ural State Mining University. E-mail: u1331@yandex.ru

Для цитирования: Афанасьев А. И., Казаков Ю. М., Копачев В. Ф. Градиент давления по высоте лопаток в шахтных осерадиальных вентиляторах с конической проточной частью // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 3. С. 90–96. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-90-96
For citation: Afanasiev A. I., Kazakov Iu. M., Kopachev V. F. Pressure gradient by the height of blades in mine axial-radial fans with a flare blade section. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 3: 90–96 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-90-96

УДК 622.277:621.927 DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-97-106

Анализ и оценка параметров колебаний двухмассной с диссипативными свойствами системы грохота с каскадной просеивающей поверхностью

Юдин А. В.[1], Абдулкаримов М. К.[1], Шестаков В. С.[1]*
[1] Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия
e-mail: shestakov.v.s@mail.ru

Реферат

Введение. *Выполнены исследования по освоению новой технологии сухой очистки карбонатного сырья от глинистых включений в условиях карьера. Эксплуатация используемого в настоящее время комплекса показала, что его эффективность может быть повышена за счет введения третьей стадии очистки с разделением горной массы на фракции ±0,04 м средствами вибропроцессов. В статье приведены результаты анализа и моделирования грохота, представленного двухмассной демпфированной колебательной системой. Просеивающая поверхность грохота является каскадной с консольно защемленными колосниками.*

Актуальность работы *обусловлена потребностью горной, химической и строительной отраслей в качественной подготовке сырья, в повышении выхода кондиционной фракции, в снижении потерь полезных ископаемых при разработке карбонатных карьеров. Проблемой, с которой сталкиваются на сортировочных фабриках, является трудность разделения горной массы, содержащей глинистые включения. Серийные инерционные грохоты с колосниковой просеивающей поверхностью часто забиваются глиной, что снижает эффективность их работы.*

Цель работы: *повышение эффективности грохочения трудногрохотимой горной массы при наличии глинистых включений.*

Методология: *теоретические исследования двухмассной колебательной системы с демпфирующими элементами с применением математического моделирования.*

Результаты. *Разработана математическая модель грохота с использованием вибропривода вынужденных колебаний и демпфирующих элементов для снижения амплитуд колебаний колосников в переходных режимах.*

Выводы. *В результате исследований предложено вводить в колебательную систему демпфирующие элементы. Установлено, что в стационарном режиме колебаний наличие демпфирования практически не влияет на величину амплитуды колебаний грохота, но обеспечивает снижение амплитуд в резонансных зонах при пуске грохота.*

Ключевые слова: *грохот; амплитуда; частота; жесткость; колебания; демпфирование.*

Введение. Исследования по совершенствованию конструкций грохотов проводятся многими научными и производственными коллективами [1–7], кафедра горных машин и комплексов УГГУ также проводит исследования по совершенствованию конструкций грохотов и определению их параметров для условий эксплуатации с трудногрохотимым материалом [8–11].

Решение задач исследования. В статьях [9, 10] приведены материалы по обоснованию расчетной схемы, описано движение двухмассной колебательной системы, дано решение и приведены результаты численного анализа колебаний. Данная статья является продолжением этих статей, в ней рассматривается решение колебательной двухмассной системы с учетом демпфирования.

За основу разрабатываемого грохота принят наклонный инерционный грохот ГИТ-51. В отличие от серийного грохота изменена его просеивающая поверхность (ПП). Она состоит из нескольких каскадов, каждый из которых выполнен

из ряда консольных с различной упругой жесткостью колосников, закрепленных на поперечных связь-балках рабочего органа.

Анализ результатов расчетов движения недемпфированной системы [9, 10] показал, что в некоторых случаях амплитуды колебаний рабочего органа A_M и колосника A_m в резонансе и в установившемся режиме колебаний превосходят требуемые технологические параметры колебаний. Особенно заметен рост амплитуд A_m при наличии на колосниках дополнительных грузов $G_{гр}$ весом 10 и 20 Н. Для колебательных систем известен способ ограничения резонансных амплитуд введением в систему демпфирующих элементов [12, 13].

Таблица 1. Сравнительные показатели колебательных систем. Недемпфированная система
Table 1. Comparative indices of oscillatory systems. Undamped system

№	l	h	$G_{гр}$	$\omega_{сн}$	$\omega_{с.в}$	ω/ω_m	$A_M/A_{ст}$	$A_M/A_{ст}$	m	$C_к$	$\omega_к$	A_m, мм	A_M, мм
1	0,4	0,003	0	162	926	0,865	–0,042	–0,2	1,2	10 969	925	16,4	–4,1
6	0,4	0,005	1	160	747	1,081	–0,048	0,287	8,5	50 781	740	28,1	–4,7
12	0,4	0,008	2	159	1104	0,737	–0,039	–0,087	16,1	208 000	1085	–8,5	–3,9
17	0,5	0,005	0	161	989	0,811	–0,042	–0,123	2,4	26 000	986	–12,0	–4,1
22	0,5	0,008	1	160	978	0,828	–0,040	–0,126	10,4	106 496	966	–12,0	–3,9
23	0,5	0,008	1,5	159	856	0,948	–0,033	–0,324	13,7	106 496	844	31,7	–3,2
29	0,6	0,005	0	161	687	1,168	–0,043	0,119	2,9	15 046	685	11,7	–4,2
33	0,6	0,008	0	161	1102	0,730	–0,042	–0,089	4,7	61 630	1096	–8,7	–4,1
34	0,6	0,008	1	160	718	1,128	–0,047	0,172	11,2	61 630	709	16,8	–4,6

№ – номера вариантов результатов численного моделирования, амплитуды колебаний колосников которых находятся в допустимом диапазоне; l, h – длина и толщина колосниковых пластин; $G_{гр}$ – сила тяжести дополнительного груза на конце колосниковой пластины.

Для систем без демпфирования пиковые нагрузки в резонансе можно определить, умножая амплитуду установившегося режима для данной формы вынужденных колебаний на коэффициент усиления в резонансе, который принимается из опыта:

$$A_р = D_с A_у,$$

где $D_с$ – коэффициент усиления в резонансе; A_y – амплитуда установившегося режима.

Значения коэффициента $D_с$ редко превышают 100 во встречающихся на практике инженерных конструкциях, где основное демпфирующее действие оказывает внутреннее трение материала (упругий гистерезис), внешнее трение в соединениях, подшипниковых узлах. Во многих случаях на практике значение $D_с$ лежит в пределах от 20 до 60 (в среднем 40). Этим значением следует пользоваться, если нет конкретных значений в рассматриваемом случае.

При наличии дополнительного демпфирования в системе (например, трения в рессорах, влияния горной массы) значение коэффициента $D_с$ может лежать в пределах между 5 и 15 (в среднем 10). Свойственное самой механической системе демпфирование не оказывает никакого влияния на амплитуды вынужденных колебаний вне резонансной зоны.

Расчетная схема грохота в статье рассматривается как двухмассная колебательная система, включающая колеблющуюся под действием вибропривода массу рабочего органа (основную массу M) на своих упругих опорах ($C_г$) и суммар-

ную массу консольно защемленных упругих колосников ПП (дополнительную массу m). Расчетная схема системы приведена в статье [9].

Уравнения движения системы записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} -m\omega^2 A_m + C_к(A_m - A_M) + S_m\omega(A_m - A_M) = 0; \\ -M\omega^2 A_M + C_к(A_M - A_m) + C_г(A_M - A_{ст}) + S_m\omega(A_M - A_m) = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где M и m – масса рабочего органа грохота и масса консольных колосников ПП; ω – частота вынужденных колебаний привода; A_M и A_m – амплитуда колебаний рабочего органа и колосников ПП; $C_г$ и $C_к$ – жесткость упругой системы грохота и колосников ПП; S_m – демпфирующая сила на единицу скорости колебаний при движении массы колосников относительно массы рабочего органа грохота (кг · с/см); $A_{ст}$ – прогиб пружин упругой системы грохота, $A_{ст} = P/C_г$; P – максимальное значение возмущающей силы привода грохота.

Таблица 2. Сравнительные показатели колебательных систем. Демпфированная система

Table 2. Comparative indices of oscillatory systems. Damped system

№	l	h	$G_{тр}$	$D_с$	$\omega_{сн}$	$\omega_{с.в}$	$A_M/A_{ст}$	$A_m/A_{ст}$	m	$C_к$	$\omega_к$	A_m, мм	A_M, мм
1	0,4	0,003	0	3,25 10 19	162	926	0,212	0,256	1,20	10 969	924	5,83	4,8
12	0,4	0,008	0	3,25 10 19	161	2474	0,211	0,216	3,12	208 000	2465	4,93	4,8
17	0,5	0,005	0	3,25 10 19	161	989	0,211	0,249	2,44	26 000	986	5,67	4,8
23	0,5	0,008	0	3,25 10 19	161	1585	0,210	0,224	3,90	106 496	1578	5,10	4,8
33	0,6	0,008	0	3,25 10 19	161	1102	0,210	0,239	4,68	61 630	1096	5,45	4,8
34	0,6	0,008	1	3,25 10 19	160	718	0,204	0,287	11,2	61 630	709	6,53	4,7

Влияние демпфирования можно выявить, исследуя уравнение вынужденных колебаний с вязким сопротивлением:

$$A_i = A_{ст}D = A_{ст}\left(\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\rho^2}\right) + \frac{\omega^2}{\rho^2 D_с}}\right)^{-1}, \quad (2)$$

где D – динамический коэффициент при возбуждении с постоянной силой $\pm P$; ρ – частота свободных колебаний без затухания; $D_с$ – коэффициент усиления

в резонансе, когда $\omega/\rho = 1$, $D_c = m_i\omega_i/S$; S – вязкая (пропорциональная скорости) сила демпфирования.

Из выражения (2) видно, что при приближении к резонансу $\omega/\rho = 1$, т. е. $\omega = \omega_{ci}$, коэффициент D_c быстро возрастает и в резонансе для недемпфированной системы теоретически становится бесконечно велик. На практике даже при ничтожно малом демпфировании амплитуда в резонансе ограничивается тем, что система при больших амплитудах стремится стать нелинейной. Выше резонанса при нелинейности системы коэффициент усиления D_c быстро снижается. Быстрый рост и снижение коэффициента D_c происходит в области значений отношений частот от $\omega/\rho = 0{,}8$ до $\omega/\rho = 1{,}2$. Эту область называют резонансной.

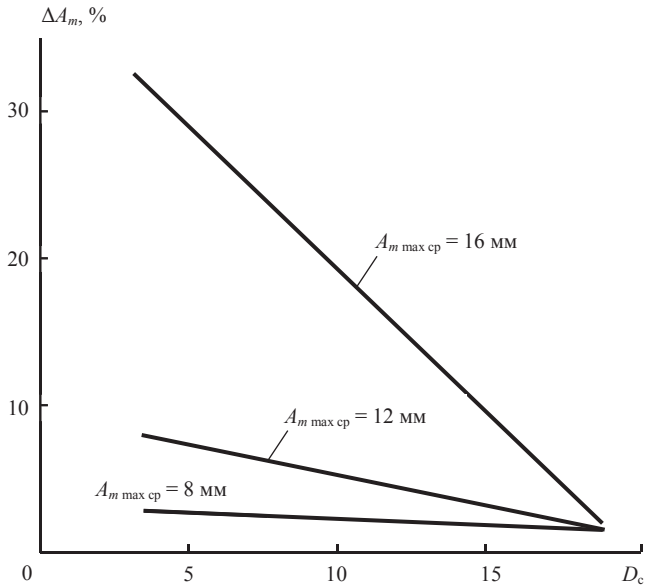


Рис. 1. Влияние коэффициента усиления в резонансе на снижение максимальной амплитуды просеивающей поверхности грохота:
l = 0,4–0,6 м; h = 3–5 мм; $G_г$ = 0–20 Н
Fig. 1. The influence of the resonant gain factor on the screening surface maximum amplitude reduction:
l = 0.4–0.6 m; h = 3–5 mm; $G_г$ = 0–20 N

При наличии демпфирования в системе движение массы, начинаясь в одной фазе с возбуждающей силой (при $\omega_р = 0$), затем постепенно отстает от силы сначала на малые величины фазового угла, а затем на быстро увеличивающийся угол вблизи резонанса (на четверть периода). После прохода резонанса отставание от силы продолжается, вначале быстро, далее постепенно, пока не приблизится к полупериоду колебаний (фазовый угол 180°).

Рассмотрим влияние демпфирования в системе колебаний массы m колосников ПП. Главный эффект демпфирования заключается в том, что оно ограничивает величину амплитуд колебаний в резонансе и делает более постепенным (плавным) переход движения от синфазного к противофазному (и наоборот).

В конструкции грохота установлены консольные колосники из пластин (в виде слоеного пирога), обладающие естественными свойствами демпфирования. Кроме того, демпфирующее влияние на колебания оказывает транспортируемая горная масса (ГМ).

Проведенные исследования показали, что демпфирование в основной упругой системе грохота (рабочий орган на пружинных опорах) мало по сравнению

с демпфированием в системе консольных колосников. Ограничение амплитуды резонансных колебаний в системе колосников приведет к ограничению резонансных колебаний рабочего органа при переходе системы через резонансные области нижней $\omega_{сн}$ и верхней $\omega_{св}$ частоты собственных колебаний. Выявлено также, что демпфирование колосников пропорционально скорости колебаний массы колосников m относительно основной массы грохота M. При таких значениях уравнения движения демпфированной системы будут преобразованы в уравнения (1).

Из первого уравнения системы (1) в результате преобразований имеем:

$$\left(\frac{A_m}{A_M}\right)^2 = \left(1+\frac{\omega^2}{\omega_к^2 D_с^2}\right)\left(\left(1-\frac{\omega^2}{\omega_к^2}\right)^2 + \frac{\omega^2}{\omega_к^2 D_с^2}\right)^{-1}. \quad (3)$$

Подставляя отношение (3) во второе уравнение системы (1), получим:

$$\left(\frac{A_M}{A_{cm}}\right)^2 = \left[\frac{\omega^2}{\omega_к^2 D_с^2} + \left(1-\frac{\omega^2}{\omega_к^2}\right)^2\right]\left\{\left[\left(\frac{\omega^2}{\omega_{сн}^2}-1\right)\left(\frac{\omega^2}{\omega_{сн}^2}-1\right)\right]^2 + \frac{\omega^2}{\omega_к^2 D_с^2}\left[1-\frac{\omega^2}{\omega_г^2}\left(1+\frac{m}{M}\right)\right]^2\right\}^{-1} \quad (4)$$

или, упростив выражение (3):

$$\frac{A_m}{A_{ст}} = \frac{A_M}{A_{ст}}\sqrt{\left(1+\frac{\omega^2}{\omega_к^2 D_с^2}\right)\left[\left(1-\frac{\omega^2}{\omega_к^2}\right)^2 + \frac{\omega^2}{\omega_к^2 D_с^2}\right]^{-1}}, \quad (5)$$

где $D_с = (m/S_m)(\omega_к/9{,}55)$ – коэффициент усиления в резонансе при колебаниях с собственной частотой массы m; $\omega_к$ – частота колебаний колосника; S_m – демпфирующая сила на единицу скорости колебаний в движении массы m относительно массы M рабочего органа грохота.

Таблица 3. Влияние демпфирования на величину амплитуды колебаний просеивающей поверхности

Table 3. The influence of damping on the value of oscillation amplitude of a screening surface

№ варианта по табл. 1, 2	Недемпфированная система		Демпфированная система при значениях коэффициента $D_с$					
			3,25	10	19	3,25	10	19
	A_M	$A_{m\,max}$	A_m	A_m	A_m	ΔA_m	ΔA_m	ΔA_m
1	4,1	16,4	11,71	15,59	16,76	4,69	0,81	–0,36
12	3,9	8,5	7,83	8,39	8,44	0,67	0,11	0,01
17	4,1	12,0	10,03	11,72	13,23	1,97	0,21	–0,23
29	4,2	11,7	8,71	11,16	11,52	2,99	0,54	0,18
33	4,1	8,7	8,08	8,63	8,71	0,62	0,05	–0,01
34	4,6	16,8	10,18	15,35	16,38	6,62	1,45	0,42

ΔA_m – снижение максимальной амплитуды демпфированной системы по сравнению с недемпфированной системой; $A_{m\,max}$ – максимальная амплитуда колосников недемпфированной системы.

При недемпфированной системе коэффициент $D_с = \infty$. При том демпфировании, какое присуще практике в обычных системах, амплитуды вынужденных колебаний вне резонансных зон по существу те же, что и в недемпфированной системе, это подтверждено расчетами.

Исходные данные сравниваемых демпфированных и недемпфированных колебательных систем приведены в работе [10].

Для сравнения эффективности демпфированных и недемпфированных систем примем упрощенный метод. Из расчетов недемпфированных систем [10] выбираем те системы, у которых A_m превышают в стационарном режиме 4,6 мм. Выборка данных для стационарного режима приведена в табл. 1, 2. В этих же таблицах приведены показатели демпфированных систем, выборка которых по характеристике ПП эквивалентна показателям недемпфированных систем. Оценка демпфированных систем выполнена при значениях коэффициента D_c, равного 3,25; 10; 19. В табл. 2 приведены результаты анализа систем.

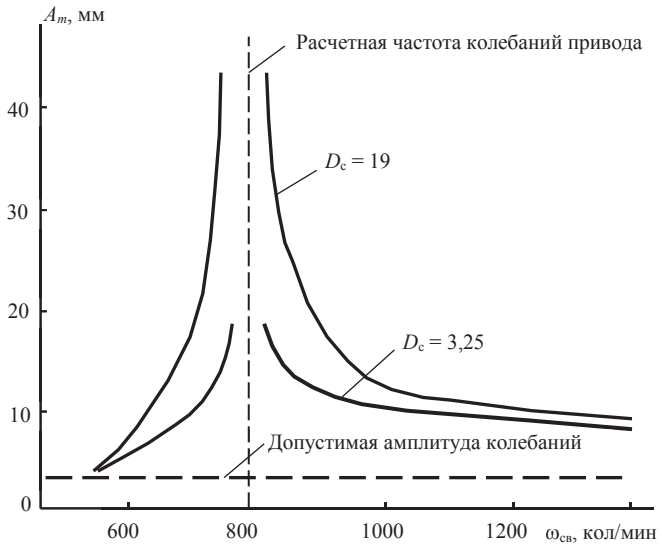


Рис. 2. Изменение максимальной амплитуды колебаний массы m от степени приближения собственной частоты системы $\omega_{св}$ к расчетной частоте вынужденных колебаний системы ω

Fig. 2. m mass oscillations maximum amplitude variation depending on the degree of approximation of $\omega_{св}$ system proper frequency to the calculated forced oscillations frequency of ω system

Анализ результатов показал:

– в стационарном режиме введение демпфирования практически не оказывает влияния на величину амплитуды колебаний A_M основной массы грохота;

– при коэффициенте усиления в резонансе D_c = 19, принятому по рекомендациям [3], амплитуда колебаний A_m массы ПП в стационарном режиме отличается от амплитуды недемпфированной системы на 0,1–2,0 %;

– колебательные системы с коэффициентом D_c = 3,25 обладают наиболее сильным демпфированием [13]. Расчеты выявили, что в зависимости от максимальной амплитуды A_m в стационарном режиме и при D_c = 3,25 значения амплитуд ПП снижаются в среднем на 7,5–35 % (рис. 1);

– введение сильного демпфирования (D_c = 3,25) не снижает максимальных значений амплитуды A_m до приемлемых технологических параметров 4–6 мм. Это говорит о том, что параметры ПП в соответствии с выборкой по табл. 3 требуют корректировки на стадии проекта. Можно предположить, что в сравниваемых системах расчетная частота вынужденных колебаний ω = 800 об./мин лежит в пределах зоны резонансных колебаний массы m с собственной частотой всей системы $\omega_{св}$. Это заключение подтверждается графиком на рис. 2. Чем более при-

ближается частота собственных колебаний всей системы $\omega_{св}$ (или частота собственных колебаний ПП $\omega_к$) к частоте вынужденных колебаний привода ω, тем меньше влияние демпфирования на снижение амплитуды массы m в диапазоне значений коэффициента $D_с$ =3,25–19.

Основная цель введения демпфирования в колебательную систему – это ограничение максимальных амплитуд колебаний масс M и m при прохождении резонансных областей. Особенно это важно при работе грохота в зарезонансном режиме работы, когда $\omega > \omega_{сн}$ и $\omega > \omega_{св}$.

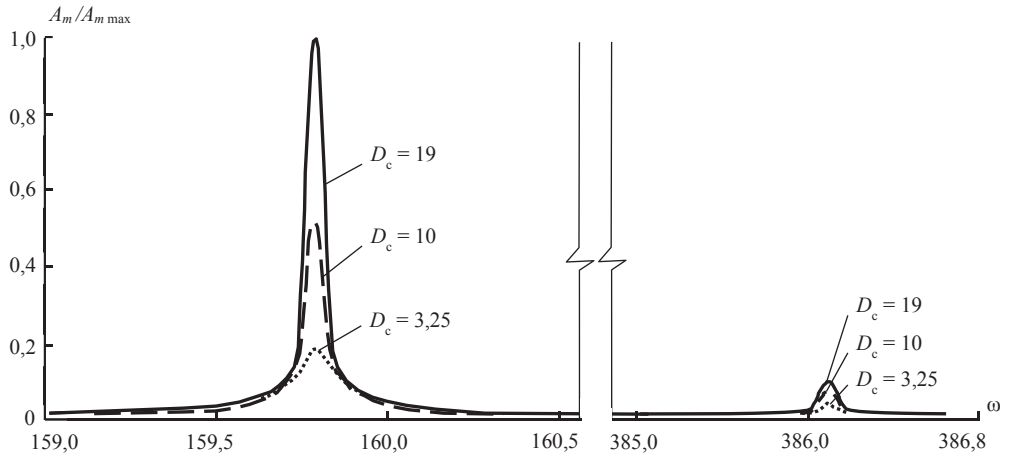


Рис. 3. Резонансная кривая массы m колосниковой просеивающей поверхности
Fig. 3. Resonant curve of m mass of a bar screening surface

Анализ показал, что из сравниваемых показателей колебательных недемпфированной и демпфированной систем: l = 0,6 м; h = 5 мм; $G_{гр}$ = 10 Н; m = 9,4 кг; $C_к$ =1,5 · 10^4 Н/м; $\omega_к$ = 382 кол/мин; $A_{ст}$ = 0,097 м; $C_г$ = 13,3 · 10^4 Н/м; M = 460 кг; $\omega_{сн}$ = 159 кол/мин; $\omega_{св}$ = 386 кол/мин, однозначно следует, что введение демпфирования в систему при прохождении резонансных зон снижает амплитуды A_M и A_m. Наибольшее снижение максимальных амплитуд наблюдается при прохождении резонанса с собственной частотой $\omega_{св}$ = 386 кол/мин. При прохождении резонансной зоны с собственной частотой $\omega_{сн}$ = 159 кол/мин в системе с демпфированием с $D_с$ = 3,25 амплитуды A_M и A_m снижаются в 5,87 и 5,8 раз по сравнению с системами с $D_с$ = 19. При прохождении резонансной зоны с собственной частотой $\omega_{сн}$ = 386 кол/мин амплитуды A_M и A_m снижаются в 1,1 и 5,5 раза.

Колебания системы в основном определяют параметры l, h, m, $G_{гр}$, $C_к$, $\omega_к$ [10]. При разработке нового грохота, изменяя эти параметры, можно получить требуемые для конкретной горной массы значения амплитуд и частот A_M, A_m, $\omega_{св}$. На рис. 3 показана резонансная кривая колебаний массы m при различных значениях коэффициентов усиления в резонансе $D_с$. Показано, что резонансные зоны лежат в узком диапазоне изменения частоты возбуждения ω. Демпфирование ограничивает максимальную амплитуду колебаний при проходе резонансной зоны. Наибольшее ограничение максимальной амплитуды A_m достигается при коэффициенте $D_с$ = 3,25. Повышение демпфирующих свойств каскадной ПП достигается путем преобразования конструкции колосников, когда колосники выполнены в виде пластинчатых рессор из тонколистовой пружинной стали. Ограничению амплитуд в резонансе также способствует воздействие перемещаемой по поверхности горной массы.

Заключение. Статья завершает цикл работ, направленных на разработку расчетных схем, моделирование движения и анализ колебаний двухмассных консервативных систем и систем с диссипативными свойствами.

В статье приведены аргументы, обосновывающие целесообразность ввода в колебательную систему демпфирующих элементов, составлены уравнения движения таких систем, выполнен численный анализ колебаний, приведены выводы при сравнении анализируемых систем. Установлено: в стационарном режиме колебаний наличие демпфирования практически не влияет на величину амплитуды колебаний грохота; колебательные системы с коэффициентом усиления в резонансе D_c = 3,25 наиболее полно удовлетворяют ограничению амплитуд в стационарном и переходном режимах движения системы; параметры ПП, определяющие частоту собственных колебаний колосников, близкую к заданной частоте вынужденных колебаний, практически неприемлемы для реального использования при проектировании грохотов; введение демпфирования целесообразно для ограничения максимальных амплитуд колебаний в переходных режимах движения, наибольший эффект при этом проявляется при движении колосниковой ПП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Картавый А. Н. Вибрационные агрегаты для переработки минерального и техногенного сырья. Моделирования и элементы расчета по критериям энерго- и ресурсоэффективности. М.: МГГУ, 2013. 328 с.

2. Вайсберг Л. А. Проектирование и расчет вибрационных грохотов. М.: Недра, 1986. 144 с.

3. Шишкин Е. А., Лебедев А. И. Исследования параметров вибрационного грохота с применением инструментов имитационного моделирования // Ученые заметки ТОГУ. 2016. Т. 7. С. 281–286.

4. Волков Е. Б., Ляпцев С. А. Компьютерное моделирование процесса грохочения // Международный журнал экспериментального образования. 2012. № 4. С. 49–50.

5. Ferrara G., Preti U., Schena G. D. Modelling of screening operations // Intern. J. of Mineral Processing. 1988. Vol. 22. No. 1–4. P. 193–222.

6. Rumyantsev S., Tarasov D. Numerical simulation of non-linear dynamics of vibration transport machines in case of three independently rotating vibration exciters // Recent advences in applied mathematics. Proceedings of the American Conference on Applied Mathematics (AMERICAN-MATH '10). Harvard University, USA, January 27–29, 2010. P. 191–194.

7. Subasinghe G. K. N. S., Schoap W., Kelly E. G. Modelling screening as a conjugate rate process // Intern. J. of Mineral Proccessing. 1990. Vol. 28. P. 289–300.

8. Юдин А. В. Моделирование вынужденных колебаний просеивающей поверхности инерционного грохота с консольно защемленными колосниками // Известия вузов. Горный журнал. 2016. № 6. С. 63–70.

9. Юдин А. В., Шестаков В. С., Абдулкаримов М. К. Разработка расчетной схемы и описание движения грохота с каскадной просеивающей поверхностью на основе двухмассной колебательной системы // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 4. С. 81–86.

10. Юдин А. В., Шестаков В. С., Абдулкаримов М. К. Численный анализ колебаний двухмассной консервативной колебательной системы вибрационного грохота для труднограхотимой горной массы // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 5. С. 93–101.

11. Sladkovsky A. V., Yudin A. V., Komissarov A. P., Lagunova Yu. A., Akhmetova M., Stolpovskikh I. N. Calculation of parameters and design of the movable transfer station with vibrating screen feeder for the conveyor of deer queries // International Journal of Engineering and Technology (UAE). 2018. Vol. 7. No. 2. P. 148–151.

12. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. М.: Физматгиз, 1959. 439 с.

13. У. Кер Вильсон. Вибрационная техника. М.: Измашгиз, 1963. 415 с.

Поступила в редакцию 14 февраля 2018 года

Сведения об авторах:

Юдин Аркадий Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры горных машин и комплексов Уральского государственного горного университета. E-mail: gpt2004@mail.ru
Абдулкаримов Магомед Казбекович – старший преподаватель кафедры горных машин и комплексов Уральского государственного горного университета. E-mail: abdmg@list.ru
Шестаков Виктор Степанович – кандидат технических наук, профессор кафедры горных машин и комплексов Уральского государственного горного университета. E-mail: shestakov.v.s@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-97-106

Analysing and evaluating oscillation parameters of a dissipative two-mass system of a screen with a cascade screening surface

Arkadii V. Iudin[1], Magomed K. Abdulkarimov[1], Viktor S. Shestakov[1]
[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. *The research on the development of a new technology of carbonate raw materials dry cleaning from clay inclusions in a quarry is performed. The operation of the currently used complex has shown that its efficiency can be enhanced by introducing a third purification stage with separation of the rock mass into fractions of ±0.04 m by means of vibroprocesses. This article presents analysis and modeling results of the screen represented by a two-mass damped oscillatory system. The screening surface of the screen is cascade with cantilever-fixed lattices.*

The relevance of the work *is due to the need of the mining, chemical, and construction industry in the raw material high-quality preparation, conditioned fraction yield increase, and mineral losses reduction during carbonate quarries development. Sorting factories face the problem of difficult separation of rock mass which contains clay inclusions. Serial inertial screens with a grate screening surface are often clogged with clay, which reduces their effectiveness.*

Research aims *to increase the efficiency of difficult-to-reach rock mass screening in the presence of clay inclusions.*

Methodology *includes theoretical studies of a two-mass oscillatory system with damping elements with the use of mathematical simulation.*

Results. *A mathematical model of a screen has been developed with the use of a vibrating drive of forced vibrations and damping elements to reduce the amplitudes of grid bars oscillations in transient modes.*

Summary. *As a result of research, it was proposed to introduce damping elements into the oscillatory system. It has been established that in the stationary mode of oscillations, the presence of damping scarcely affects the screen oscillation amplitude value, but it provides a decrease in the amplitudes in the resonant zones when the screen starts.*

Key words: *screen; amplitude; frequency; rigidity; oscillations; damping.*

REFERENCES

1. Kartavyi A. N. *Vibrating equipment for mineral and technogenic raw material processing. Simulations and the elements of energy and resource efficiency criteria calculation*. Moscow: MSMU Publishing; 2013. (In Russ.)
2. Vaisberg L. A. *Designing and calculation of vibrating screens*. Moscow: Nedra Publishing; 1986. (In Russ.)
3. Shishkin E. A., Lebedev A. I. The research of parameters of vibrating sieve using simulation tools. *Uchenye zametki TOGU = Bulletin of PNU*. 2016; 7: 281–286. (In Russ.)
4. Volkov E. B., Liaptsev S. A. Computer simulation of a screening process. *Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimentalnogo obrazovaniia = International Journal of Experimental Education*. 2012; 4: 49–50. (In Russ.)
5. Ferrara G., Preti U., Schena G. D. Modelling of screening operations. *Intern. J. of Mineral Processing*. 1988; 22 (1–4): 193–222.
6. Rumyantsev S., Tarasov D. Numerical simulation of non-linear dynamics of vibration transport machines in case of three independently rotating vibration exciters. In: *Recent advences in applied mathematics. Proceedings of the American Conference on Applied Mathematics (AMERICAN-MATH '10)*. Harvard University, USA, January 27–29, 2010. P. 191–194.
7. Subasinghe G.K.N.S., Schoap W., Kelly E. G. Modelling screening as a conjugate rate process. *Intern. J. of Mineral Proccessing*. 1990; 28: 289–300.
8. Iudin A. V. Forced oscillations modeling for the deck plate with cantilevered bars of unbalanced-throw screen. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. *Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2016; 6: 63–70. (In Russ.)
9. Iudin A. V., Shestakov V. S., Abdulkarimov M. K. Computational scheme development and movement description of a screen with the cascade screening surface on the basis of two-masses oscillatory system. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2018; 4: 81–86. (In Russ.)
10. Iudin A. V., Shestakov V. S., Abdulkarimov M. K. Numerical analysis of two-masses conservative system oscillations of vibrating screen for the rock mass difficult to screen. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2018; 5: 93–101. (In Russ.)
11. Sladkovsky A. V., Yudin A. V., Komissarov A. P., Lagunova Yu. A., Akhmetova M., Stolpovskikh I. N. Calculation of parameters and design of the movable transfer station with vibrating screen feeder for the conveyor of deer queries. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*. 2018; 7 (2): 148–151.
12. Timoshenko S. P. *Oscillations in engineering*. Moscow: Fizmatgiz Publishing; 1959. (In Russ.)
13. W. Ker Wilson. *Vibration engineering*. Moscow: Izmashgiz Publishing, 1963. (In Russ.)

Received 14 February, 2018

Information about authors:

Arkadii V. Iudin – D. Sc. (Engineering), Professor, professor of the Department of Mining Machines and Complexes, Ural State Mining University. E-mail: gpt2004@mail.ru
Magomed K. Abdulkarimov – senior lecturer of the Department of Mining Machines and Complexes, Ural State Mining University. E-mail: abdmg@list.ru
Viktor S. Shestakov – PhD (Engineering), Professor, professor of the Department of Mining Machines and Complexes, Ural State Mining University. E-mail: shestakov.v.s@mail.ru

Для цитирования: Юдин А. В., Абдулкаримов М. К., Шестаков В. С. Анализ и оценка параметров колебаний двухмассной с диссипативными свойствами системы грохота с каскадной просеивающей поверхностью // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 3. С. 97–106. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-97-106
For citation: Iudin A. V., Abdulkarimov M. K., Shestakov V. S. Analysing and evaluating oscillation parameters of a dissipative two-mass system of a screen with a cascade screening surface. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 3: 97–106 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-97-106

УДК 622.276.054.22 DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-107-114

Диагностирование нефтепромыслового и горного оборудования методом анализа возбужденных резонансных колебаний

Софьина Н. Н.[1], Островский В. Г.[2], Воробель С. В.[2], Романов В. А.[2], Зверев В. Ю.[2]*

[1] Научно-производственное предприятие «РОС», г. Пермь, Россия

[2] Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия

e-mail: zvva92@mail.ru

Реферат

Введение. *Обоснована актуальность применения методов неразрушающего контроля при оценке технического состояния узлов нефтепромысловых и горных машин. Доказана перспективность диагностирования технологического оборудования методом анализа возбужденных резонансных колебаний. Описаны конструкция и алгоритм работы многоканального синхронного анализатора «Камертон» производства Научно-производственного предприятия «РОС» (г. Пермь).*

Методология исследования. *Изложены методологические основы поиска дефектов с использованием многоканального анализатора «Камертон». Перечислены основные критерии качества, характеризующие состояние элементов технических объектов по результатам выполнения диагностирования.*

Результаты. *Доказано, что метод оценки технического состояния узлов горного и нефтепромыслового оборудования посредством анализа возбужденных резонансных колебаний позволяет проводить оперативное диагностирование технических объектов без вывода их из эксплуатации.*

Выводы. *По эффективности и оперативности метод не имеет аналогов в сравнении с традиционными методами неразрушающего контроля оборудования: магнитопорошковым, магнитной памяти металла, ультразвуковой дефектоскопии, ультразвуковой толщинометрии, радиографическим, металлографическим и т. д. В ряде случаев, например для конструкций из материалов неоднородной структуры типа армированной пластмассы или армированного бетона, предложенный метод является единственно возможным методом диагностирования.*

Ключевые слова: *метод анализа возбужденных резонансных колебаний; диагностирование; дефекты; анализатор «Камертон».*

Введение. Для нефтедобывающих и горных предприятий актуальными остаются задачи увеличения надежности технологических машин, снижения затрат на эксплуатацию оборудования, повышения эффективности проведения ремонтно-восстановительных работ. Недостаточная точность оценки ресурса деталей и узлов технологических машин, сложность и высокая трудоемкость диагностирования приводят к увеличению количества простоев вследствие возникновения внезапных отказов и росту материальных затрат на поддержание работоспособности оборудования. Решение данных задач возможно на основе разработки и широкого использования средств неразрушающего контроля [1, 2].

Прогнозирование индивидуального ресурса деталей технологического оборудования включает комплекс задач: оценку текущего состояния объекта, прогнозирование развития этого состояния на ближайшее будущее и определение остаточного ресурса [3, 4]. На сегодняшний день одним из наиболее перспективных способов диагностирования узлов горных и нефтепромысловых машин является оценка технического состояния методом анализа возбужденных резонансных колебаний [1, 5, 6].

Методика проведения исследований. Метод диагностирования узлов технологических машин посредством анализа возбужденных резонансных колебаний основан на анализе распространения колебаний внутри конструкции и связан с внутренней структурой объекта. Импульсное возбуждение (произведенное с помощью молоточка или импульсного источника колебаний) приводит к возникновению в исследуемом объекте резонансных колебаний, отличающихся гармоническим составом и затухающих во времени с разной скоростью [7]. В однородной среде после импульсного воздействия преобладают моноколебания, затухающие в течение длительного периода времени. Наличие трещин (раковин, иных несплошностей), а также ослабление внутренней структуры среды вследствие старения материалов увеличивает количество гармоник в спектре сигнала, сокращает время колебаний за счет поглощения энергии в зонах дефектов. Измерение

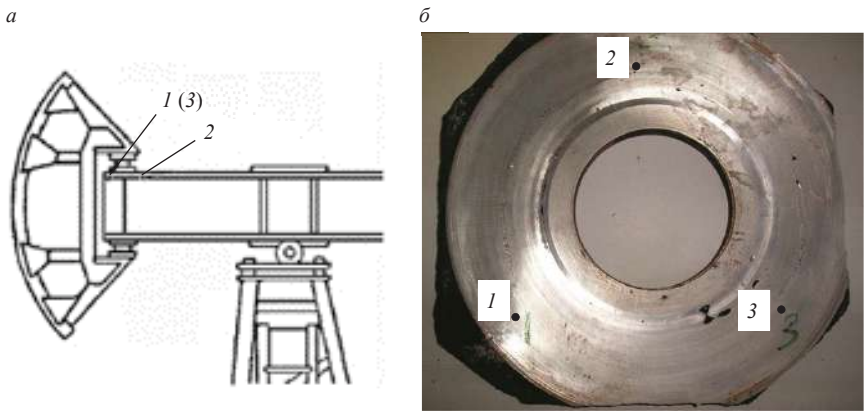


Рис. 1. Диагностирование узла крепления головки балансира станка-качалки СК8:
а – схема установки датчиков диагностического комплекса «Камертон»; *б* – срез глубиной 1,5 мм по сечению узла крепления головки балансира
Fig. 1. The diagnosis of SK8 pumpjack walking beam cap attachment point:
а – Kamerton sensors installation diagram; *б* – shear 1,5 mm deep along the section of a walking beam cap attachment point

временных параметров движения волны внутри объекта позволяет анализировать параметры среды и выявлять зону возникновения дефекта. Метод применяется для обнаружения внутренних дефектов, трещин полостей в различном оборудовании и конструкциях, в том числе в металлических, керамических, пластмассовых и многокомпонентных деталях, сварных швах, местах заделки деталей в опоры, внутренних соединений элементов оборудования и конструкций, позволяет выявить признаки усталости материала, локализовать зоны вероятного расположения дефектов.

Для практической реализации процесса диагностирования методом анализа возбужденных резонансных колебаний используется многоканальный диагностический комплекс «Камертон» производства компании ООО НПП «РОС». В состав диагностического комплекса входят от 2 до 32 пьезоакселерометрических и (или) акустических датчиков, предназначенных для измерения возбужденных колебаний, синхронный аналого-цифровой преобразователь для нормирования и первичного преобразования сигналов, анализатор на базе ноутбука или специального контроллера, возбудитель резонансных колебаний.

Возбуждение колебаний производится молоточком, реже при помощи специального импульсного источника колебаний. Ударное возбуждение является наиболее рациональным методом: отсутствие влияния на обследуемый объект пере-

менной нагрузки, создаваемой весом импульсного источника колебаний, является существенным преимуществом при испытаниях легких конструкций, так как изменение нагрузки от одной точки к другой может вызвать сдвиг частот при различных циклах измерений. Кроме того, отсутствие необходимости использования крепежных приспособлений для установки импульсного источника колебаний обусловливает удобство проведения неразрушающего контроля непосредственно на месте эксплуатации технологического оборудования.

Удаленность датчиков друг от друга может быть различной и зависит от размеров элементов и плотности материала, из которого изготовлена конструкция. Например, на узлах, изготовленных из твердых металлов и сплавов, датчики могут устанавливаться на большом удалении друг от друга, так как в твердых средах сигнал возбуждения может передаваться на значительные расстояния, а чем мягче материал, тем более близким должно быть расположение датчиков относительно друг друга [8–10].

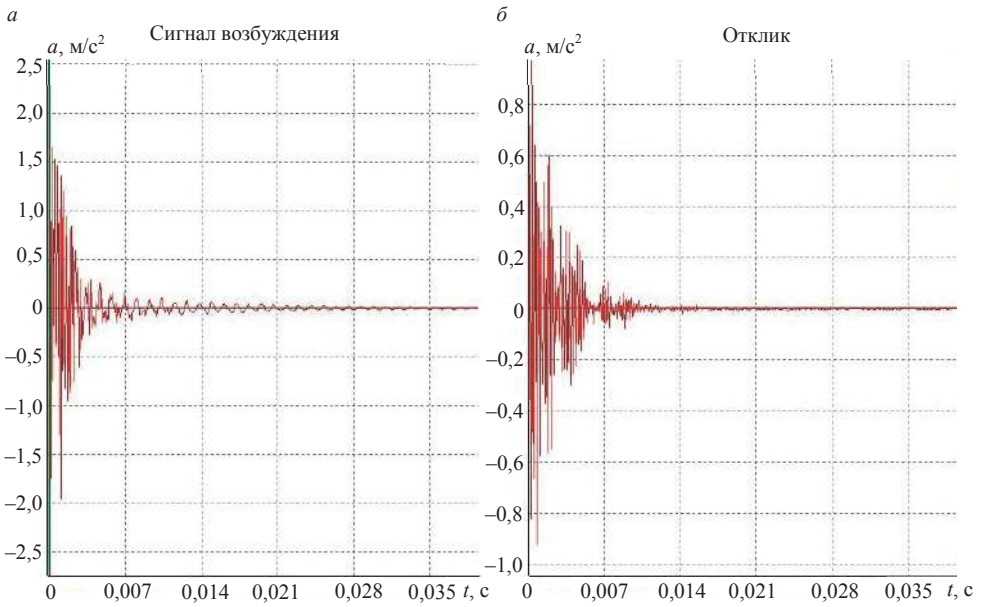


Рис. 2. Сигнал возбуждения, инициируемый молоточком – *а*; отклик, регистрируемый датчиком-пьезоакселерометром – *б*

Fig. 2. Excitation signal initiated by a hammer – *а*; response registered by a sensor – poizoelectric accelerometer – *б*

Порядок проведения и анализ результатов исследований. Рассмотрим алгоритм проведения диагностирования нефтепромыслового оборудования методом возбуждения резонансных колебаний на примере узла крепления головки балансира станка-качалки СК8. Методика проведения контроля технического состояния предусматривала установку трех датчиков непосредственно на обследуемом элементе объекта (рис. 1). В ходе предварительного визуального контроля узла крепления головки балансира трещин и иных дефектов не обнаружено.

После установки датчиков на элементе проводилось возбуждение резонансных колебаний молоточком с весом бойка около 0,1 кг. Для повышения достоверности диагностирования и исключения случайных помех проводилось не менее четырех-пяти аналогичных циклов измерений подряд. Нормальные регистрации представляют собой плавно затухающие гармонические сигналы (рис. 2), в которых отсутствуют резкие локальные выбросы, изломы, «зашкаливания».

Импульсное возбуждение обусловливает возникновение в изделии резонансных волновых процессов, имеющих характерные особенности развития в пространстве и времени. В однородной по плотности среде временные, скоростные и частотные параметры сигнала отклика идентичны параметрам сигнала возбуждения. При наличии трещин (раковин, несплошностей), а также при старении материала (когда происходит разрежение или ослабление его структуры) условия прохождения вызванных импульсной нагрузкой колебаний на различных участках объекта в значительной степени отличаются друг от друга, что позволяет выявить однородные и неоднородные участки в объекте. Анализ энергетических составляющих каждого зарегистрированного сигнала позволяет провести не только качественную, но и количественную оценку состояния объекта [11].

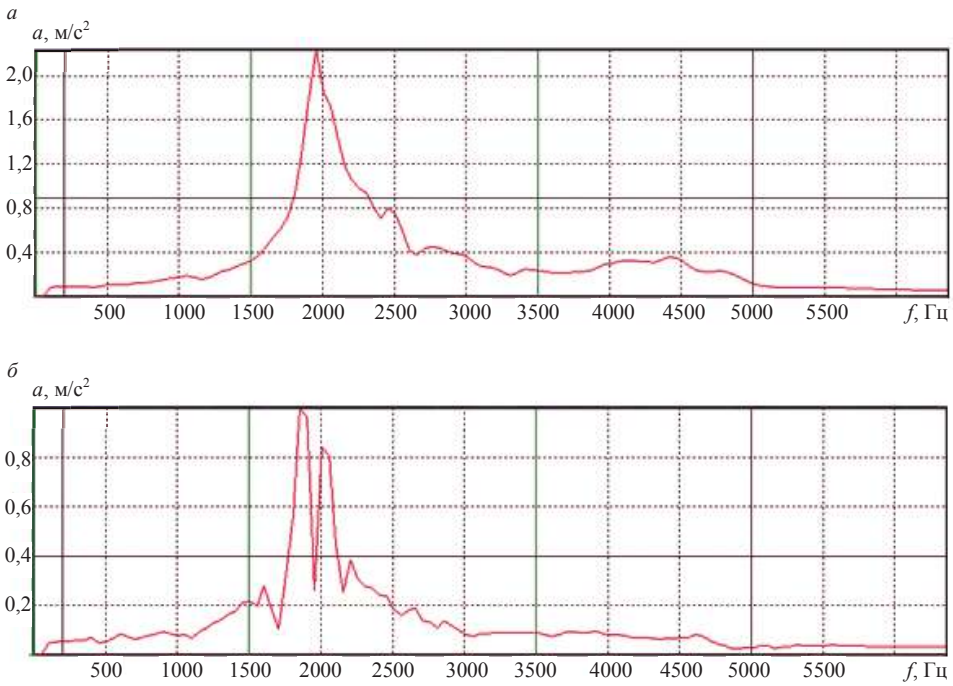


Рис. 3. Примеры спектров сигнала-отклика, полученного при обследовании методом возбуждения резонансных колебаний узла крепления балансира станка-качалки СК8:
а – дефект отсутствует; *б* – наличие трещины в металле

Fig. 3. The examples of spectra of a signal-response received as a result of investigating with a method of resonant oscillations excitation in SK8 pumpjack walking beam cap attachment point:
a – no defects; *б* – the presence of a metal crack

Обработка зарегистрированных прибором сигналов проводилась в экспертной диагностической системе «Камертон», реализующей анализ спектрального состава резонансных колебаний элементов конструкции и расчет обобщенных параметров качества элемента.

При анализе состояния детали машины или элемента конструкции в каждом сигнале определяется скорость затухания резонансных колебаний, ударная (несущая) частота, наличие отклонений ударной частоты от нормального для данного материала диапазона значений, производится распознавание и анализ образа спектральной картины сигнала отклика (рис. 3). Спектральный образ дефектов в отдельных элементах технических объектов одинаков, что позволяет применять данный метод для определения состояния различных по твердости и составу материалов [12, 13].

Анализ технического состояния узла крепления балансира станка-качалки СК8 осуществлялся посредством оценки степени затухания сигнала в соединении и сравнения спектральных параметров сигнала возбуждения и сигнала отклика. Каждый замер анализировался два раза при различном направлении движения сигнала, когда возбуждение проводилось с двух сторон соединения поочередно.

После полного цикла измерений проводилась обработка сигналов всех регистраций методами математической статистики. Экспертное программное обеспечение при определении критериев качества элемента и соединения использует следующие параметры:

– средняя несущая резонансная частота по всем имеющимся сигналам для элемента или соединения;

– средняя скорость затухания колебаний в элементе или соединении;

– взаимное отклонение частот в соединении и элементе;

– вероятность утонения стенок или снижения плотности, ослабления структуры материала элемента;

– вероятность наличия трещин, раковин, несплошностей в элементе или соединении [14].

По результатам диагностирования узла крепления головки балансира станка-качалки СК8 установлено, что зоны сварных соединений между точками установки датчиков *1–2* и *2–3* (рис. 1) имеют признаки наличия трещин. Заключение экспертной системы: состояние объекта – недопустимое; дальнейшая эксплуатация станка-качалки невозможна. Специалистами сервисной службы предприятия было принято решение о выводе станка-качалки из эксплуатации и вскрытии обследуемого узла с целью визуального обнаружения дефектов. Выполнение среза глубиной 1,5 мм по сечению узла крепления головки балансира станка-качалки показало наличие подковообразной трещины с ответвлениями (рис. 1, *б*, точки *1*, *2*, *3*,), а также непровар сварного соединения втулки и металла горизонтального листа балансира.

Следует особо отметить, что диагностирование того же узла методом ультразвукового контроля, выполненное ранее, не позволило обнаружить дефекты, выявленные с использованием описанного метода.

Выводы. Метод диагностирования узлов горного и нефтепромыслового оборудования посредством анализа возбужденных резонансных колебаний позволяет проводить оценку технического состояния машин без вывода их из эксплуатации. По эффективности и оперативности данный метод не имеет аналогов в сравнении с традиционными методами неразрушающего контроля оборудования: магнитопорошковым, магнитной памяти металла, ультразвуковой дефектоскопии, ультразвуковой толщинометрии, радиографическим, металлографическим и т. д. В ряде случаев, например для конструкций из материалов неоднородной структуры типа армированной пластмассы или армированного бетона, рассмотренный метод является единственно возможным методом диагностирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Основы эксплуатации и ремонта бурового и нефтегазодобывающего оборудования / Д. И. Шишлянников [и др.]. Пермь: ПНИПУ, 2018. 150 с.

2. Segopolo P. R. Optimization of shuttle car utilization at an underground coal mine // The Journal of the Southem African Institute of Mining and Metallurgy. 2015. Vol. 115. No. 4. P. 285–296.

3. Brodny J., Tutak M. Application of elements of TPM strategy for operation analysis of mining machine // IOP Conf. series: Earth and Environmental Science. 2015. Vol. 95. Iss. 4. Article number 042019. DOI: 10.1088/1755-1315/95/4/042019

4. Софьина Н. Н., Шишлянников Д. И., Гришина И. О., Корнилов К. А. Эксплуатационный контроль и диагностирование оборудования по параметрам питания электропривода на примере штанговых скважинных насосных установок // Горное оборудование и электромеханика. 2015. № 9. С. 26–31.

5. Cakdi S., Cummings S., Punwani J. Heavy haul coal car wheel load environment-rolling contact fatigue investigation // 2015 Joint Rail Conf., JRC 2015. Article number 112635. DOI: 10.1115/JRC2015-5640

6. Gerike B., Panachev I., Kuzin E. Development of the preventive maintenance system for belt conveyors reducers // E3S Web of Conf. 2017. Vol. 15. Article number 03008. DOI: 10.1051/e3sconf/20171503008

7. Звонарев И. Е., Иванов С. Л., Шишлянников Д. И., Фокин А. С. Исследование поверхностной твердости металла в областях повышенного износа и разрушения деталей горных машин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2014. № 11. С. 67–76.

8. Трифанов Г. Д., Князев А. А., Чекмасов Н. В., Шишлянников Д. И. Исследование нагруженности и возможности прогнозирования энергоресурса приводов исполнительных органов комбайна «Урал-20Р» // Горное оборудование и электромеханика. 2013. № 2. С. 41–44.

9. Jobes C. C., Bissert P., Mahmoudian N., Li B. Development of parameters for dynamic modeling of underground haulage vehicles // ASME 2016 Int. Mech. Eng. Congress and Exposition, IMECE 2016. Article number 128056. DOI: 10.1115/IMECE201665381

10. Асонов С. А., Габов В. В., Иванов С. Л., Трифанов М. Г., Чекмасов Н. В., Шишлянников Д. И. Информационно-диагностические средства объективного контроля как инструмент повышения эффективности эксплуатации добычных горных машин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2015. Т. 14. № 14. С. 62–71.

11. Тяктев М. М., Шишлянников Д. И. Результаты испытаний перспективных приводов штанговых скважинных насосных установок // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. 2016. № 1. С. 324–327.

12. Асонов С. А., Иванова П. В., Иванов С. Л., Шишлянников Д. И. Принципы построения модели технического состояния горной машины при ее эксплуатации // ГИАБ. 2017. № 3. С. 15–27.

13. Шишлянников Д. И., Рыбин А. А. Оценка нагруженности балансирных станков-качалок по параметрам питания электропривода // Записки Горного института. 2017. Т. 227. С. 582–588.

14. Шишлянников Д. И. Исследование силовых и энергетических параметров работы перспективных вентильных двигателей балансирных станков-качалок // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 5. С. 25–30.

Поступила в редакцию 10 января 2019 года

Сведения об авторах:

Софьина Наталья Николаевна – директор Научно-производственного предприятия «РОС». E-mail: ros@perm.ru

Островский Виктор Георгиевич – кандидат технических наук, доцент кафедры горной электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: ostrov_13@mail.ru

Воробель Сергей Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры горной электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: sergey@vetlan.ru

Романов Вячеслав Александрович – аспирант кафедры горной электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: romanovs06@mail.ru

Зверев Валерий Юрьевич – старший преподаватель кафедры горной электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: zvva92@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-107-114

Diagnosis of oilfield and mining equipment by analyzing excited resonant oscillations

Natalia N. Sofina[1], Viktor G. Ostrovskii[2], Sergei V. Vorobel[2], Viacheslav A. Romanov[2], Valerii Iu. Zverev[2]

[1] OOO NPP ROS, Perm, Russia.

[2] Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia.

Abstract

Introduction. *The urgency of the non-destructive testing methods application in oilfield and mining machinery technical state evaluation is substantiated. The prospectiveness of process equipment diagnosing by analyzing excited resonant oscillations is proved. The design and the algorithm of the synchronous multi-channel analyzer Kamerton produced by Research and Production Enterprise ROS (Perm) are described.*

Research methodology. *Methodological foundations of defects location using the synchronous multi-channel analyzer Kamerton are introduced. Basic quality criteria are enumerated, characterizing the state of the technical objects elements according to the results of the diagnosis.*
Results. *It is proved that the method of assessing mining and oilfield equipment technical condition analyzing excited resonant oscillations allows for the operational diagnosis of technical objects without taking them out of service.*
Conclusion. *In terms of efficiency and operability, this method has no analogues in comparison with traditional methods of non-destructive testing of equipment: magnetic powder, metal magnetic memory, ultrasonic flaw detection, ultrasonic thickness gauging, radiographic, metallographic, etc. In some cases, for example, for structures made of materials of heterogeneous structure such as reinforced plastic or reinforced concrete, it is the only possible method of diagnosis.*

Key words: *excited resonant oscillations analysis; diagnosis; defects; analyzer Kamerton.*

REFERENCES

1. Shishliannikov D. I. et al. *Fundamentals of drilling and oil and gas equipment operation and repair*. Perm: PNRPU Publishing; 2018. (In Russ.)
2. Segopolo P. R. Optimization of shuttle car utilization at an underground coal mine. *The Journal of the Southem African Institute of Mining and Metallurgy*. 2015; 115 (4): 285–296.
3. Brodny J., Tutak M. Application of elements of TPM strategy for operation analysis of mining machine. *IOP conference series: earth and environmental science*. 2015; 95 (4): Article number 042019. DOI: 10.1088/1755-1315/95/4/042019
4. Sofina N. N., Shishliannikov D. I., Grishina I. O., Kornilov K. A. Operational control and diagnostics of equipment according to the parameters of power supply of the electric drive using the example of sucker-rod well pumping units. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics*. 2015; 9: 26–31. (In Russ.)
5. Cakdi S. Heavy haul coal car wheel load environment-rolling contact fatigue investigation. In: *2015 joint rail conference, JRC 2015*. Article number 112635. DOI: 10.1115/JRC2015-5640
6. Gerike B. Development of the preventive maintenance system for belt conveyors reducers. In: *E3S Web of Conferences*. 2017; 15: Article number 03008. DOI: 10.1051/e3sconf/20171503008
7. Zvonarev I. E., Ivanov S. L., Shishliannikov D. I., Fokin A. S. The study of the metal surface hardness in areas of high wear and tear of parts for mining machines. *Vestnik Permskogo nacionalnogo issledovatelskogo politehnicheskogo universiteta. Geologiia. Neftegazovoe i gornoe delo = Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil, Gas and Mining*. 2014; 11: 67–76. (In Russ.)
8. Trifanov G. D., Kniazev A. A., Chekmasov N. V., Shishliannikov D. I. Load research and forecasting resources lead executive combine “Ural-20R”. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics*. 2013; 2: 41–44. (In Russ.)
9. Jobes C. C. Development of parameters for dynamic modeling of underground haulage vehicles. In: *ASME 2016 international mechanical engineering congress and exposition, IMECE 2016*. Article number 128056. DOI: 10.1115/IMECE201665381
10. Asonov S. A., Gabov V. V., Ivanov S. L., Trifanov M. G., Chekmasov N. V., Shishliannikov D. I. Information and diagnostic tools of objective control as means to improve performance of mining machines. *Vestnik Permskogo nacionalnogo issledovatelskogo politehnicheskogo universiteta. Geologiia. Neftegazovoe i gornoe delo = Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil, Gas and Mining*. 2015; 14: 62–71. (In Russ.)
11. Tiaktev M. M., Shishliannikov D. I. Test results of prospective drives for sucker-rod well pumping units. *Problemy razrabotki mestorozhdenii uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopaemykh = Problems of Hydrocarbon and Ore Mineral Deposits Development*. 2016; 1: 324–327. (In Russ.)
12. Asonov S. A., Ivanova P. V., Ivanov S. L., Shishliannikov D. I. Principles of construction of models of the technical state of transmission of mining machine during its operation. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2017; 3: 15–27. (In Russ.)
13. Shishliannikov D. I., Rybin A. A. Evaluation of balancer pumping units loading according to power drive parameters. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2017; 227: 582–588. (In Russ.)
14. Shishliannikov D. I. The study of power and energy parameters of advanced brushless motors balance pumping units work. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2017; 5: 25–30.

Received 10 January, 2019

Information about authors:

Natalia N. Sofina – Director, Research and Production Enterprise ROS. E-mail: ros@perm.ru
Viktor G. Ostrovskii – PhD (Engineering), associate professor of Mining Electromechanics Department, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: ostrov_13@mail.ru

Sergei V. Vorobel – PhD (Engineering), associate professor of Mining Electromechanics Department, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: sergey@vetlan.ru
Viacheslav A. Romanov – PhD student of Mining Electromechanics Department, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: romanovs06@mail.ru
Valerii Iu. Zverev – senior lecturer, Mining Electromechanics Department, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: zvva92@mail.ru

Для цитирования: Софьина Н. Н., Островский В. Г., Воробель С. В., Романов В. А., Зверев В. Ю. Диагностирование нефтепромыслового и горного оборудования методом анализа возбужденных резонансных колебаний // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 3. С. 107–114. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-107-114
For citation: Sofina N. N., Ostrovskii V. G., Vorobel S. V., Romanov V. A., Zverev V. Iu. Diagnosis of oilfield and mining equipment by analyzing excited resonant oscillations. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 3: 107–114 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-107-114

УДК 622.817.47 DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-115-121

Способ дегазации отрабатываемого угольного пласта скважинами в породах кровли

Шинкевич М. В.[1]*, Родин Р. И.[1]
[1] Институт угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия
e-mail: max-valerich@rambler.ru

Реферат

Введение. *Для угольной промышленности в вопросах безопасности огромную роль играет газовый фактор. Изменение глубины и скорости отработки пластов, а также размеров выемочных столбов в сторону увеличения приводит к возникновению газовых барьеров при ведении очистных работ.*

Цель работы. *Выдержанность диаметра скважины по всей длине и ее направление зависит от радиального биения коронки при бурении скважины по угольному пласту, что не позволяет доставлять пакер для поинтервального гидроразрыва на требуемую глубину. Даже идеально пробурив дегазационную скважину, со временем можно столкнуться с проблемами обрушения и затекания. Скважину, пробуренную по угольному пласту, сложнее загерметизировать (из-за возможного трещинообразования у ее устья) для недопущения аэродинамической связи с выработкой и создания в скважине требуемого разрежения. В статье представлено решение этих задач.*

Методология. *Известно, что бурение скважин в породах кровли лишено указанных недостатков. Известен способ дегазации угольного пласта скважинами, пробуренными в кровле пласта, основанный на эффекте разгрузки пласта перед движущимся очистным забоем. Объединение результатов бурения скважин в породах кровли и поинтервального гидроразрыва угольного пласта позволит создать способ дегазации угольного пласта и повысить ее эффективность.*

Результаты. *В статье описан способ дегазации угольного пласта за счет бурения скважин в породах кровли с созданием искусственных трещин с помощью гидроразрыва для обеспечения связи скважин с угольным пластом.*

Выводы. *Предлагаемый способ дегазации угольного пласта позволит повысить ее эффективность в 3–5 раз по сравнению с существующей пластовой дегазацией, обеспечить надежную герметизацию дегазационных скважин за счет расположения их в породах кровли над угольным пластом, исключить проблемы с излишней кривизной и невыдержанностью диаметра дегазационных скважин и таким образом снизить метанообильность очистного забоя по фактору метановыделения из угольного пласта.*

Ключевые слова: *угольный пласт; породы кровли; поинтервальный гидроразрыв; бурение скважин.*

Введение. Добыча полезных ископаемых неизбежно сопряжена с высокими рисками. Зачастую обеспечение безопасности при ведении горных работ выходит на первый план.

Для угольной промышленности в вопросах безопасности огромную роль играет газовый фактор. Для нивелирования негативного влияния газового фактора проведено огромное количество исследований и разработан целый ряд мероприятий, которые представлены в научных работах [1–14] и прописаны в дей-

ствующих нормативных документах (*Инструкция по дегазации угольных шахт; Инструкция по применению схем проветривания выемочных участков шахт с изолированным отводом метана из выработанного пространства с помощью газоотсасывающих установок*). Однако изменение глубины и скорости отработки пластов, а также размеров выемочного столба в сторону увеличения приводит к возникновению газовых барьеров при ведении очистных работ, а иногда и к более серьезным газодинамическим явлениям.

В России и во всем мире для борьбы с газовым фактором помимо вентиляции применяют принудительное изолированное извлечение метана из угольного пласта до момента его отработки, тем самым снижая объем газа в угле до момента его разрушения. Как известно, дегазацию можно разделить по времени (заблаговременная, предварительная, текущая), по месту заложения устья дегазационных скважин (поверхностная и из горных выработок шахты) и источнику газовыделения (пласт, пласт-спутник, выработанное пространство, купол обрушения).

Эффективность дегазационных мероприятий в зависимости от способа и времени проведения в целом по шахте колеблется в пределах 3–44 %. При этом дегазация непосредственно на выемочных участках может составлять 40–90 % [15].

В работе [16] проанализированы фактические данные эффективности дегазации при подготовке и отработке выемочного участка. Установлено, что предварительная пластовая дегазация обеспечивает в среднем 5 % извлечения содержащегося в пласте метана. Эффективность пробуренных с поверхности в купол обрушения скважин достигает 80 %. В среднем эффективность дегазационных мероприятий при отработке выемочного столба составляет 44 %.

Тем не менее несмотря на низкую эффективность предварительной пластовой дегазации возможны такие ситуации, когда данный способ будет единственно применимым для изолированного извлечения метана из отрабатываемого угольного пласта. В таком случае для усиления эффекта дегазации применяют различные методы интенсификации газовыделения, в частности поинтервальный гидроразрыв пласта [17].

Цель работы. Принято считать, что проблема пластовой дегазации в первую очередь заключается в низкой газопроницаемости угольных пластов. В то же время низкая эффективность зависит от качества бурения и поддержания дегазационных скважин. В статье [18], посвященной процессу бурения дегазационной скважины по пласту угля для проведения в ней ориентированного поинтервального гидроразрыва, отмечается, что выдержанность диаметра скважины по всей длине и ее направление зависит от радиального биения коронки. Здесь же представлены и решения по устранению данного недостатка серийного бурового инструмента для обеспечения бурения дегазационной скважины с требуемым выдержанным диаметром и направлением по всей ее длине. Тем не менее даже идеально пробуренная дегазационная скважина со временем сталкивается с проблемами обрушения и затекания. В скважину, пробуренную в угольном пласте, не всегда можно доставить пакер для поинтервального гидроразрыва на требуемую глубину. В таких случаях необходим постоянный мониторинг дегазационных скважин. В случае возникновения данных проблем следует перебуривать дегазационную скважину. К сожалению, в современных условиях оптимизирования рабочих кадров и отсутствия возможности перемещения бурового инструмента в места обрушения и затекания скважин по технологическим и экономическим причинам продление времени службы таких скважин невозможно.

Методология проведения исследований. Известно [19], что скважины, пробуренные в породах кровли, лишены указанных недостатков из-за того, что проч-

ность пород кровли гораздо выше прочности угольного пласта, и в породах при отсутствии в них включений угля не содержится метан в растворенном состоянии, что исключает уменьшение диаметра (затекания) скважин со временем.

Известен способ дегазации угольного пласта [20], когда дегазационные скважины предлагается бурить в породах кровли, но упор делается на естественное трещинообразование за счет переменного горного давления. Дегазационные скважины предлагается бурить по породам кровли на расстоянии 1–2 м от угольного пласта. Авторы предлагают соединять дегазационные скважины с пластом системой искусственных трещин, принудительно созданных с помощью технологии направленного поинтервального гидроразрыва.

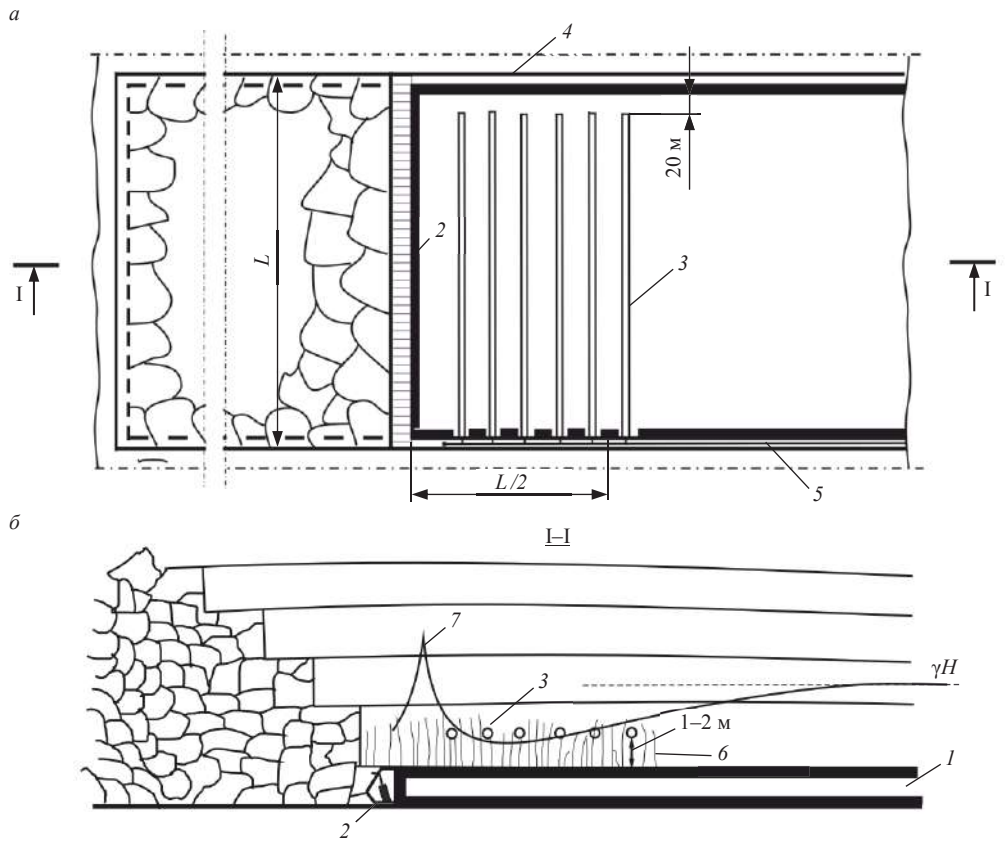


Рис. 1. Способ дегазации отрабатываемого угольного пласта с помощью скважин, пробуренных в породах кровли:
а – выемочный участок в плане; *б* – разрез по I–I
Fig. 1. Method of degassing a coal seam by wells drilled in the rock of the coal seam roof:
а – mining extracted area in a plan; *б* – I–I section

Таким образом, техническим результатом бурения скважин в породах кровли является повышение эффективности дегазации за счет сохранения дегазационными скважинами сечения и пропускной способности, а также повышение надежности их герметизации.

Кроме того, исследованиями установлено, что при отработке высокогазоносных угольных пластов длинными очистными забоями с полным обрушением кровли при подходе забоя к скважине на расстояние, близкое к половине его длины, дебит метана из скважины увеличивается в 3–5 раз [21]. На этом расстоянии,

как установлено исследованиями, начинается зона переменного горного давления, что формирует техногенные трещины в кровле пласта, инициирует выделение метана из блоков угля и раскрывает межблоковые трещины. При разгрузке пласта от давления выделяется свободный метан, при его газоносности выше сорбционной способности угля возникает повышенное давление свободного газа, приводящее к эффекту перетока части метана из пласта в выработанное пространство через породы кровли, минуя призабойное пространство. Каптаж выделяющегося из угольного пласта метана будет осуществляться скважинами через природные и техногенные трещины в непосредственной кровле, развивающиеся в результате переменных напряжений в зоне разгрузки, опережающей забой, и трещины, сформированные гидроразрывом. Размещение дегазационных скважин в кровле на расстоянии 1–2 м от пласта позволит перехватить этот поток метана и отвести его в дегазационный трубопровод. Размещение скважин в породах кровли позволит обеспечить высокую надежность их герметизации и создать необходимый вакуум. Расположение скважин над угольным пластом на высоте более 2 м снижает вероятность их встречи с техногенными трещинами, выходящими на пласт, а при высоте менее 1 м возможно «отражение» скважины в сторону пласта и снижение эффективности дегазации. При проведении через скважины поинтервального гидроразрыва по известным схемам с целью создания дополнительной искусственной трещиноватости пород кровли повысится эффективность дегазации угольного пласта за счет отбора свободного газа и сохранения скважин.

Результаты. Расстояние между дегазационными скважинами принято 0,1–0,2 длины очистного забоя и связано с размером зоны периодической разгрузки пласта впереди движущегося забоя. Для снижения объема буровых работ рекомендуется применение гидроразрыва. В этом случае необходимое расстояние между скважинами увеличится в 2–3 раза. Сущность способа поясняет рис. 1.

Для осуществления способа дегазации на расстоянии 1–2 м от угольного пласта *1* в его кровле бурят параллельно очистному забою *2* и впереди него дегазационные скважины *3*. До контура вентиляционного штрека *4* скважины не добуривают около 20 м, производят герметизацию их устья и подключение к дегазационному трубопроводу *5*. До подхода очистного забоя *2* к скважинам каптаж метана из угольного пласта *1* происходит через искусственные трещины *6* гидроразрыва в кровле. При подходе очистного забоя к скважинам на расстояние менее 0,5 длины лавы L начинается каптаж метана, интенсивно выделяющегося из пласта *1* вследствие его частичной разгрузки (эпюра *7*) от геостатического горного давления γH и поступающего в скважины через природные и техногенные трещины в кровле, которая подвержена переменному горному давлению в этой зоне и поинтервальному гидроразрыву.

Выводы. Предлагаемый способ дегазации угольного пласта позволит повысить ее эффективность в 1,5–3 раза по сравнению с существующей пластовой дегазацией в условиях отработки пологих угольных пластов длинными столбами по простиранию, обеспечить надежную герметизацию дегазационных скважин за счет расположения их в породах кровли над угольным пластом, исключить проблемы с излишней кривизной и невыдержанностью диаметра дегазационных скважин, пробуренных по угольному пласту, и тем самым снизить метанообильность очистного забоя по фактору метановыделения из угольного пласта. Кроме того, трещины гидроразрыва будут способствовать обрушению пород кровли, что позволит не допустить ее зависаний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дегазация газа из угольных пластов и вмещающих пород на шахтах Кузбасса. История. Действительность. Будущее / А. В. Ремезов [и др.]. Кемерово: КузГТУ, 2012. 848 с.

2. Основы проектирования дегазации угольных шахт и рудников России / А. Д. Рубан [и др.]. М.: Горное дело, 2011. 272 с.

3. Шинкевич М. В., Козырева Е. Н. Взаимосвязи основных особенностей процессов разгрузки и сдвижения вмещающих пород с динамикой выделения метана из разрабатываемого пласта при его отработке длинными выемочными столбами // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2006. № 6. С. 17–19.

4. Полевщиков Г. Я., Козырева Е. Н., Киряева Т. А., Шинкевич М. В., Брюзгина О. В., Рябцев А. А., Назаров Н. Ю., Плаксин М. С. Снижение газодинамической опасности подземных горных работ // Уголь. 2007. № 11 (979). С. 13–16.

5. Шадрин А. В., Диюк Ю. А., Телегуз А. С. Применение акустических методов для управления параметрами гидрообработки горного массива и оценки ее эффективности // Горная промышленность. 2018. № 2. С. 79–82.

6. Шадрин А. В., Клишин В. И. Установление связи параметров акустической эмиссии с фильтрационно-коллекторскими свойствами массива и характеристиками насосной установки при гидрообработке кровли и угольного пласта // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2018. № 1. С. 77–87.

7. Портола В. А. Эндогенная пожароопасность шахт в условиях управления газовыделением средствами вентиляции // Безопасность труда в промышленности. 2006. № 9. С. 32–35.

8. Шевченко Л. А., Гришин В. Ю. Дегазация выработанных пространств длинными скважинами // Известия вузов. Горный журнал. 2014. № 2. С. 10–13.

9. Yao Y., Liu D., Xie S. Quantitative characterization of methane adsorption on coal using a low-field nmr relaxation method // International Journal of Coal Geology. 2014. Vol. 131. P. 32–40.

10. Li J., Li X., Wu K., Shi J., Yang L., Feng D., Zhang T., Yu P., Wang X., Li Y. Water distribution characteristic and effect on methane adsorption capacity in shale clay // International Journal of Coal Geology. 2016. Vol. 159. P. 135–154.

11. Kedzior S. Methane contents and coal-rank variability in the upper silesian coal basin // International Journal of Coal Geology. 2015. Vol. 139. No. 1. P. 152–164.

12. Sechman H., Kotarba M. J., Dzieniewicz M., Fiszer J. Distribution of methane and carbon dioxide concentrations in the near-surface zone and their genetic characterization at the abandoned "nowa ruda" coal mine (lower silesian coal basin) // International Journal of Coal Geology. 2013. Vol. 116–117. P. 1–16.

13. Tailakov O. V., Zastrelov D. N., Utkaev E. A., Smyslov A. I., Kormin A. N. Experience for coal mine methane utilization to generate thermal and electric power // Taishan Academic Forum – Project on mine Disaster Prevention and Control – Mining 2014. Qingdao, China, 17–20 October, 2014. P. 450–454.

14. Tailakov O. V., Makeev M. P., Kormin A. N., Smyslov A. I. Development of method of rapid analysis of particle size distribution of the coal charge based on digital image processing // Applied mechanics and materials. 2015. Vol. 770. P. 512–517.

15. Зыков В. С., Авраменко С. М., Кулинич В. А. Современное состояние дегазации на шахтах Кузбасса // Безопасность угольных предприятий: сб. науч. тр. ВостНИИ. Кемерово, 2000. С. 3–8.

16. Родин Р. И. Эффективность дегазации шахт Кузбасса // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2011. № 2. С. 116–119.

17. Клишин В. И., Опрук Г. Ю., Тациенко А. Л. Применение поинтервального гидроразрыва угольного пласта для интенсификации пластовой дегазации // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2016. № 3. С. 519–526.

18. Альков В. И. Скважина для поинтервального гидроразрыва пласта // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2014. № 1. С. 9–12.

19. Клишин В. И., Никольский А. М., Опрук Г. Ю., Неверов А. А., Неверов С. А. Метод направленного гидроразрыва труднообрушающихся кровель для управления горным давлением в угольных шахтах // Уголь. 2008. № 11 (991). С. 12–17.

20. Полевщиков Г. Я., Козырева Е. Н., Шинкевич М. В. Способ дегазации отрабатываемого угольного пласта: пат. 2392442 Рос. Федерация. № 2008142601/03; заявл. 27.10.2008; опубл. 20.06.2010. Бюл. № 17. 8 с.

21. Методические основы проектирования дегазации на действующих и ликвидируемых шахтах / В. С. Забурдяев [и др.]. М.: ННЦ ГП–ИГД им. А. А. Скочинского, 2002. 352 с.

Поступила в редакцию 16 ноября 2018 года

Сведения об авторах:

Шинкевич Максим Валериевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН. E-mail: max-valerich@rambler.ru

Родин Роман Иванович – младший научный сотрудник Института угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН. E-mail: rodinri@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-115-121

Method of degassing a coal seam by wells in the roof rock

Maksim V. Shinkevich[1], Roman I. Rodin[1]
[1] Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry SB RAS, Kemerovo, Russia.

Abstract

Introduction. *For the coal industry traditionally in safety issues the huge role is played by a gas factor. Change in depth and speed of layers mining and increase in extraction pillars dimensions lead to gas barriers emergence when stoping.*

Research aim. *Well diameter consistency throughout the length and its direction depend on crown radial beating when drilling the well on the coal seam that doesn't allow to deliver a packer for interval hydraulic fracturing to the required depth. Even ideally drilled vent well faces problems of her collapse and flowing over time. It is more difficult to seal the well drilled on coal seam, because of a possible cracking at her mouth, to prevent aerodynamic connection with a mine working and create the required depression in the well. The solution of these problems is presented in the article.*

Methodology. *It is known that well-drilling in roof rock goes without the indicated disadvantages. The method of degassing a coal seam by wells drilled in the seam roof is known; it is based on the effect of unloading of the layer ahead of a moving stoping face. Combination of results of well-drilling in the roof rock and interval hydraulic fracturing of a coal seam will allow to create a way of degassing a coal seam and increase its efficiency.*

Results. *The article describes the method of degassing a coal seam due to well-drilling in the roof rock with artificial cracks creation by means of hydraulic fracturing to ensure connection between wells and a coal seam.*

Conclusions. *The offered method of degassing a coal seam will allow to increase the efficiency of degassing 3–5 times as compared to the existing in-seam degassing, provide reliable sealing of vent wells by means of arranging them in the roof rock over the coal seam, exclude problems connected with excessive curvature and vent wells diameter inconsistency, and therefore reduce methane content in a stoping face in terms of methane emission from a coal seam.*

Key words: *coal seam; roof rock; interval hydraulic fracturing; well-drilling.*

REFERENCES

1. Remezov A. V. et al. *Degassing coal seams and enclosing rock. History. Present. Future*. Kemerovo: KuzSTU Publishing; 2012. (In Russ.)
2. Ruban A. D. et al. *The fundamentals of coal shafts and mines degassing design in Russia*. Moscow: Gornoe delo Publishing; 2011. (In Russ.)
3. Shinkevich M. V., Kozyreva E. N. Interrelations of the main features of the processes of unloading and shifting of the surrounding rocks with the dynamics of methane emission from the mined bed during longwall extraction. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2006; 6: 17–19. (In Russ.)
4. Polevshchikov G. Ia., Kozyreva E. N., Kiriaeva T. A., Shinkevich M. V., Briuzgina O. V., Riabtsev A. A., Nazarov N. Iu., Plaksin M. S. Gas dynamic hazard reduction in underground mine workings. *Ugol = Coal*. 2007; 11 (979): 13–16. (In Russ.)
5. Shadrin A. V., Diiuk Iu. A., Teleguz A. S. Application of acoustic methods for rock mass hydrotreatment parameter control and efficiency assessment. *Gornaia promyshlennost = Mining Industry Journal*. 2018; 2: 79–82. (In Russ.)
6. Shadrin A. V., Klishin V. I. Connection of acoustic emission parameters with filtration-collective properties of the massif and the pump unit performance for hydraulic processing of roof and coal layer. *Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noi promyshlennosti = Bulletin of Research Center for Safety in Coal Industry (Industrial Safety)*. 2018; 1: 77–87. (In Russ.)
7. Portola V. A. Endogenous fire hazard in mines when controlling gas emission through ventilation. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2006; 9: 32–35. (In Russ.)
8. Shevchenko L. A., Grishin V. Iu. Degassing of goafs by long wells. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2014; 2:10–13. (In Russ.)
9. Yao Y., Liu D., Xie S. Quantitative characterization of methane adsorption on coal using a low-field nmr relaxation method. *International Journal of Coal Geology*. 2014; 131: 32–40.
10. Li J., Li X., Wu K., Shi J., Yang L., Feng D., Zhang T., Yu P., Wang X., Li Y. Water distribution characteristic and effect on methane adsorption capacity in shale clay. *International Journal of Coal Geology*. 2016; 159: 135–154.
11. Kedzior S. Methane contents and coal-rank variability in the upper silesian coal basin. *International Journal of Coal Geology*. 2015; 139 (1): 152–164.
12. Sechman H., Kotarba M. J., Dzieniewicz M., Fiszer J. Distribution of methane and carbon dioxide concentrations in the near-surface zone and their genetic characterization at the abandoned "nowa ruda" coal mine (lower silesian coal basin). *International Journal of Coal Geology*. 2013; 116–117: 1–16.

13. Tailakov O. V., Zastrelov D. N., Utkaev E. A., Smyslov A. I., Kormin A. N. Experience for coal mine methane utilization to generate thermal and electric power. In: *Taishan Academic Forum – Project on mine Disaster Prevention and Control – Mining 2014. Qingdao, China, 17–20 October, 2014*. P. 450–454.
14. Tailakov O. V., Makeev M. P., Kormin A. N., Smyslov A. I. Development of method of rapid analysis of particle size distribution of the coal charge based on digital image processing. *Applied mechanics and materials*. 2015; 770: 512–517.
15. Zykov V. S., Avramenko S. M., Kulinich V. A. Current state of degassing at Kuzbass mines. In: *Coal enterprises safety: Proceedings of Vostochniy Research Institute for Mining Safety*. Kemerovo; 2000. p. 3–8. (In Russ.)
16. Rodin R. I. Kuzbass mines degassing efficiency. *Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoi promyshlennosti = Bulletin of Research Center for Safety in Coal Industry (Industrial Safety)*. 2011; 2: 116–119. (In Russ.)
17. Klishin V. I., Opruk G. Iu., Tatsienko A. L. The use of interval hydraulic fracturing of a coal seam for in-seam degassing intensification. *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispolzovaniia mineralnykh resursov = Knowledge-Based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources*. 2016; 3: 519–526. (In Russ.)
18. Alkov V. I. Down hole for interval hydraulic fracturing. *Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoi promyshlennosti = Bulletin of Research Center for Safety in Coal Industry (Industrial Safety)*. 2014; 1: 9–12. (In Russ.)
19. Klishin V. I., Nikolskii A. M., Opruk G. Iu., Neverov A. A., Neverov S. A. Method of directional hydraulic fracturing of tight roofs to control rock pressure in coal mines. *Ugol = Coal*. 2008; 11 (991): 12–17. (In Russ.)
20. Polevshchikov G. Ia., Kozyreva E. N., Shinkevich M. V. *Method of degassing a coal seam*. Patent RF no. 2392442; 2010. (In Russ.)
21. Zaburdiaev V. S. et al. *Basic procedures of designing degassing at operating and abandoned mines*. Moscow: A. A. Skochinsky Institute of Mining Publishing; 2002. (In Russ.)

Received 16 November, 2018

Information about authors:

Maksim V. Shinkevich – PhD (Engineering), senior researcher, Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry SB RAS. E-mail: max-valerich@rambler.ru
Roman I. Rodin – junior researcher, Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry SB RAS. E-mail: rodinri@mail.ru

Для цитирования: Шинкевич М. В., Родин Р. И. Способ дегазации отрабатываемого угольного пласта скважинами в породах кровли // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 3. С. 115–121. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-115-121
For citation: Shinkevich M. V., Rodin R. I. Method of degassing a coal seam by wells in the roof rock. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 3: 115–121 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-115-121

Памяти коллеги. Латышев Олег Георгиевич

3 апреля 2019 года ушел из жизни наш коллега – заместитель главного редактора издания «Известия вузов. Горный журнал», известный специалист в области изучения свойств и разрушения горных пород, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры шахтного строительства Уральского государственного горного университета Олег Георгиевич Латышев.

О. Г. Латышев родился 4 января 1946 года в г. Свердловске в семье служащих. Окончил Свердловский Ордена Трудового Красного Знамени горный институт имени В. В. Вахрушева (1970) по специальности «Строительство подземных сооружений и шахт» с присвоением квалификации «Горный инженер-шахтостроитель». После окончания института работал: 1970–1972 – младший научный сотрудник, 1975–1985 – ассистент, 1985–1997 – доцент, 1984–1986 – заместитель декана факультета подземной разработки МПИ, с 1997 – профессор кафедры шахтного строительства.

Читал курсы лекций: «Физика горных пород», «Математические методы в горном деле», «Исследование процессов подземного строительства» («Моделирование физических процессов в горном деле»), «Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании», «Моделирование процессов буровзрывных работ», «Химия взрывчатых веществ» и др.

Олег Георгиевич ответственно подходил к учебному процессу и каждый курс лекций при необходимости полностью обеспечивал учебно-методическими материалами. За весь период работы им опубликовано более 160 учебно-методических пособий. Длительное время являлся председателем методического совета факультета, а затем и университета.

Основные научные труды посвящены исследованию комплекса физических свойств горных пород и их взаимосвязи, влиянию свойств пород на параметры процессов горного производства, управлению свойствами и состоянием горного массива.

Олег Георгиевич любил и умел работать со студентами. Под его руководством многие с интересом сделали первые шаги в науке и продолжили свой путь в аспирантуре. О. Г. Латышев подготовил 13 кандидатов наук. Лично и в соавторстве опубликовал более 150 печатных работ.

В должности заместителя главного редактора «Известий вузов. Горного журнала» Олег Георгиевич работал с 2004 года, осуществляя рецензирование статей и их научное редактирование, выполняя работу по подготовке материалов к печати, консультируя авторов, уделяя особое внимание молодым специалистам.

Коллеги и ученики Олега Георгиевича отмечают его доброжелательность и открытость в отношениях с людьми, честность и принципиальность в принятии

решений, твердость в отстаивании своих убеждений и бесконечную преданность своему творческому труду.

Светлая память о талантливом ученом, педагоге и руководителе навсегда сохранится в наших сердцах.

Кафедра шахтного строительства УГГУ
Редакция журнала «Известия вузов. Горный журнал»

Р е д а к ц и я
Главный редактор Е. Ф. Цыпин
Зам. главного редактора О. Г. Латышев, М. Г. Бабенко
Ответственный секретарь Л. А. Решеткина
Редакторы Л. Г. Соколова, Л. Ю. Парамонова

Перевод И. В. Шайхутдиновой

Компьютерная верстка Ю. Б. Швецовой

Подп. в печать 26.04.2019. Дата выхода в свет 14.05.2019
Формат 70 x 108 1/16. Печать офсетная
12,0 усл. печ. л., 11,0 уч.-изд. л. Тираж 500 экз. Заказ 6611
Цена свободная

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-57227 от 12.03.2014 выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Издатель ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»
620144, г. Екатеринбург, ГСП, ул. Куйбышева, 30

Редакция «Известия вузов. Горный журнал»
г. Екатеринбург, пер. Университетский, 7, к. 4101
тел. (факс) (343) 257-65-59
E-mail: gornij_journal@ursmu.ru
http://mj.ursmu.ru

Типография ООО «Издательство УМЦ УПИ»
620078, г. Екатеринбург, ул. Гагарина, 35а, оф. 2

ЖУРНАЛ ПУБЛИКУЕТ СТАТЬИ В СЛЕДУЮЩИХ РАЗДЕЛАХ:

- **Геотехнология: подземная, открытая, строительная**
- **Геомеханика. Разрушение горных пород**
- **Физические и химические процессы горного производства. Аэрогазодинамика**
- **Горнопромышленная и нефтегазовая геология, геофизика**
- **Маркшейдерское дело, геодезия и кадастр**
- **Геоинформатика**
- **Обогащение полезных ископаемых**
- **Экономика и управление горным производством**
- **Геоэкология, рациональное природопользование**
- **Горная механика. Горные машины и транспорт**
- **Электрификация и автоматизация горных предприятий**
- **Безопасность горного производства**
- **Высшее горное образование**
- **История. Информация. Рецензии**

Требования к оформлению статей размещены на официальном сайте журнала: http://www.mj.ursmu.ru

ISSN 0536-1028. Известия высших учебных заведений. Горный журнал, № 3, 2019.

Индекс 70367