

ISSN 0536-1028

IZVESTIYA VYSSHIKH UCHEBNYKH ZAVEDENII

GORSKIY ZHURNAL

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ

4

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 Scholar (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 науки), 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)

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ

Научно-технический журнал. Издается с 1958 года

Выходит 8 раз в год

№ 4, 2019

Учредитель и издатель

УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Главный редактор

**Е. Ф. ЦЫПИН, 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 Рильского, г. София, Болгария
Трыбальский К. Научно-технический университет им. С. Сташица, г. Краков, Польша

IZVESTIYA VYSSHIKH UCHEBNYKH ZAVEDENII GORNYI ZHURNAL

Scientific and technical journal. First published in 1958

8 issues a year

No. 4, 2019

Founder and publisher

URAL STATE MINING UNIVERSITY

Editor-in-chief

E. F. TSYPIN, 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, Krasnoyarsk*

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

Кузнецов Д. В., Косолапов А. И. Обоснование параметров горнотехнической системы карьера для разработки Олимпиадинского золоторудного месторождения.....	5
---	---

ГЕОМЕХАНИКА. РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

Зубков А. В., Феклистов Ю. Г., Сентябов С. В. Особенности формирования напряженно-деформированного состояния в бетонной крепи стволов Донского и Гайского ГОКов	12
Константинов А. В., Гладырь А. В. Проектирование универсальной измерительно-аналитической платформы для исследования состояния породного массива	24
Гордеев В. А. Расчет статистических характеристик паспорта прочности горных пород	33
Мислибаев И. Т., Заиров Ш. Ш., Салиев Б. З., Норов А. Ю. Исследование разрушения продуктивного пласта урана взрывом камуфлетного заряда взрывчатых веществ	43

ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА. АЭРОГАЗОДИНАМИКА

Шустов Д. В. Анизотропия физико-механических свойств сланцевых пород Баженовской свиты.....	55
---	----

ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ И НЕФТЕГАЗОВАЯ ГЕОЛОГИЯ, ГЕОФИЗИКА

Филатов В. В., Болотнова Л. А. Обобщение опыта прогнозирования динамических явлений на Верхнекамском месторождении калийных солей по геолого-геофизическим данным (In English).....	61
---	----

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Цыпин Е. Ф., Попова Е. В., Ефремова Т. А. Влияние рентгенорадиометрической сепарации на технологические показатели глубокого обогащения забалансовой цинковой руды	71
Морозов Ю. П., Валиева О. С., Евграфова Е. Л. Совершенствование разомкнутой схемы флотации на основе дробной подачи собирателя по фронту флотации	80

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ ГОРНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

Стровский В. Е., Комарова О. Г., Логвиненко О. А. Специфические особенности моделей устойчивого развития (In English)	89
Иванов А. Н., Игнатьева М. Н. Экономическая оценка последствий при освоении ресурсов недр	98

ГОРНАЯ МЕХАНИКА. ГОРНЫЕ МАШИНЫ И ТРАНСПОРТ

Таугер В. М., Леонтьев А. А. Расчет теплообменных процессов в подъемном трубопроводе скиповoy пневмоподъемной установки (In English)	106
Беловодский В. Н., Букин С. Л. Полигармонические возможности вибромашин с карданной передачей в трансмиссии инерционного привода.....	114

CONTENTS

GEOTECHNOLOGY: UNDERGROUND, OPEN, CONSTRUCTIONAL

<i>Kuznetsov D. V., Kosolapov A. I.</i> The validation of the pit mine technical system parameters for the Olympiadinskiy gold ore deposit mining	5
---	---

GEOMECHANICS. DESTRUCTION OF ROCKS

<i>Zubkov A. V., Feklistov Iu. G., Sentiabov S. V.</i> Special characteristics of stress-strain state development in a concrete support of Donskoy and Gaisky GOKs shafts	12
<i>Konstantinov A. V., Gladyr A. V.</i> Designing universal measuring and analytical platform to investigate the state of rock massif	24
<i>Gordeev V. A.</i> Calculation of statistical characteristics of rock strength certificate	33
<i>Mislibaev I. T., Zairov Sh. Sh., Soliev B. Z., Norov A. Iu.</i> Study of uranium productive strata destruction by camouflet explosive charge detonation	43

PHYSICAL AND CHEMICAL PROCESSES OF MINING. AEROGAS DYNAMICS

<i>Shustov D. V.</i> Bazhen Formation shale rock physical and mechanical properties anisotropy....	55
--	----

MINING AND OIL-AND-GAS GEOLOGY, GEOPHYSICS

<i>Filatov V. V., Bolotnova L. A.</i> Generalizing the experience of forecasting dynamic events at the Upper Kama potassium salt deposit according to geological and geophysical data (In English)	61
--	----

MINERAL PROCESSING

<i>Tsyplin E. F., Popova E. V., Efremova T. A.</i> The influence of X-ray radiometric separation on the technological parameters of extra-balance zinc ore deep dressing	71
<i>Morozov Iu. P., Valieva O. S., Evgrafova E. L.</i> Improving the open circuit of flotation based on collecting agent fractional feed in the front of flotation	80

ECONOMICS AND MINING PRODUCTION CONTROL

<i>Strovs'kiy V. E., Komarova O. G., Logvinenko O. A.</i> Special characteristics of sustainable development models (In English)	89
<i>Ivanov A. N., Ignatieva M. N.</i> Economic appraisal of consequences at subsoil resources exploitation	98

ROCK GEOMECHANICS. MINING MACHINERY AND TRANSPORT

<i>Tauger V. M., Leont'ev A. A.</i> The calculation of heat exchange processes in the conveying pipe of a skip pneumatic winder (In English)	106
<i>Belovodskii V. N., Bukin S. L.</i> Polyharmonic opportunities of vibrating machines with cardan joint in inertial drive transmission	114

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ: ПОДЗЕМНАЯ, ОТКРЫТАЯ, СТРОИТЕЛЬНАЯ

УДК 622.232.8

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-5-11

Обоснование параметров горнотехнической системы карьера для разработки Олимпиадинского золоторудного месторождения

Кузнецов Д. В.^{1*}, Косолапов А. И.²

¹ Полюс Проект, г. Красноярск, Россия

² Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

*e-mail: kuznetsovdy@mail.ru

Реферат

Введение. В статье рассмотрены техника и технология ведения открытых горных работ на самом крупном в России золоторудном карьере «Восточный» с годовой производственной мощностью по руде до 15 млн т/год при глубине до 840 м.

Методология исследований. Приведены понятия технологического комплекса и горнотехнической системы карьера. С учетом этого предложена блок-схема, определяющая состав исследуемого объекта. На основании обобщения данных практики и опыта проектирования представлены особенности комплектования горнотранспортного оборудования и определения ключевых параметров горных работ.

Результаты и выводы. Приведены результаты оценки применения конвейерных систем для транспортирования вскрышных пород, а также дистанционно управляемых буровых станков, экскаваторов, автосамосвалов и бульдозеров в глубинной рудной части карьера. Проанализировано состояние горных работ. На примере схем показано изменение пространственных положений карьера и его размеров. Установлено, что для экономической эффективности конвейерного транспорта объем перевозимых вскрышных пород должен составлять не менее 50 % от общего календарного значения. При этом дробильный комплекс и перегрузочный пункт можно разместить на борту карьера на глубине 50 м от поверхности. Целесообразность применения систем дистанционного управления оборудованием оценена по возможности разрабатывать уступы с увеличенным углом откоса в глубинной рудной зоне карьера. Такое решение позволяет снизить максимальные годовые объемы вскрыши или при их почти неизменном значении повысить годовую производственную мощность по руде до уровня 15 млн т/год.

Ключевые слова: технологический комплекс карьера; горнотехническая система карьера; суровые климатические условия; глубина карьера; расстояние транспортирования горной массы; производственная мощность по руде; производительность по горной массе.

Общие сведения о месторождении. Олимпиадинское месторождение с запасами золота более 1000 т является одним из крупнейших в мире. Оно расположено в 600 км к северу от Красноярска и уже более тридцати лет разрабатывается карьером «Восточный».

Климатические условия района месторождения по классификации нормативных документов суровые (*Строительная климатология: СП 131.13330.2012 от 13.06.2012 г. / Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук. М.: Минрегион России, 2012. 386 с.*). В зимний период температура воздуха достигает -60°C (в январе и феврале), а летом $+34^{\circ}\text{C}$ (в июле). Норма выпадения осадков высокая, преобла-

дают затяжные моросящие дожди и обильные снегопады. Средняя крепость пород по шкале М. М. Протодьяконова – 10–12, средний объемный вес пород – 2,7 т/м³, расстояния транспортирования вскрышных пород во внешние отвалы и руды до ЗИФ составляют 5–10 км.

Применяемая техника и технология горных работ. Трудоемкость и технико-экономическая эффективность горных работ на карьере предопределена влиянием множества факторов и параметров. Наиболее значимыми среди них являются прочностные свойства пород, глубина и размеры в плане, расстояния транспортирования руды и вскрыши, природно-климатические характеристики.

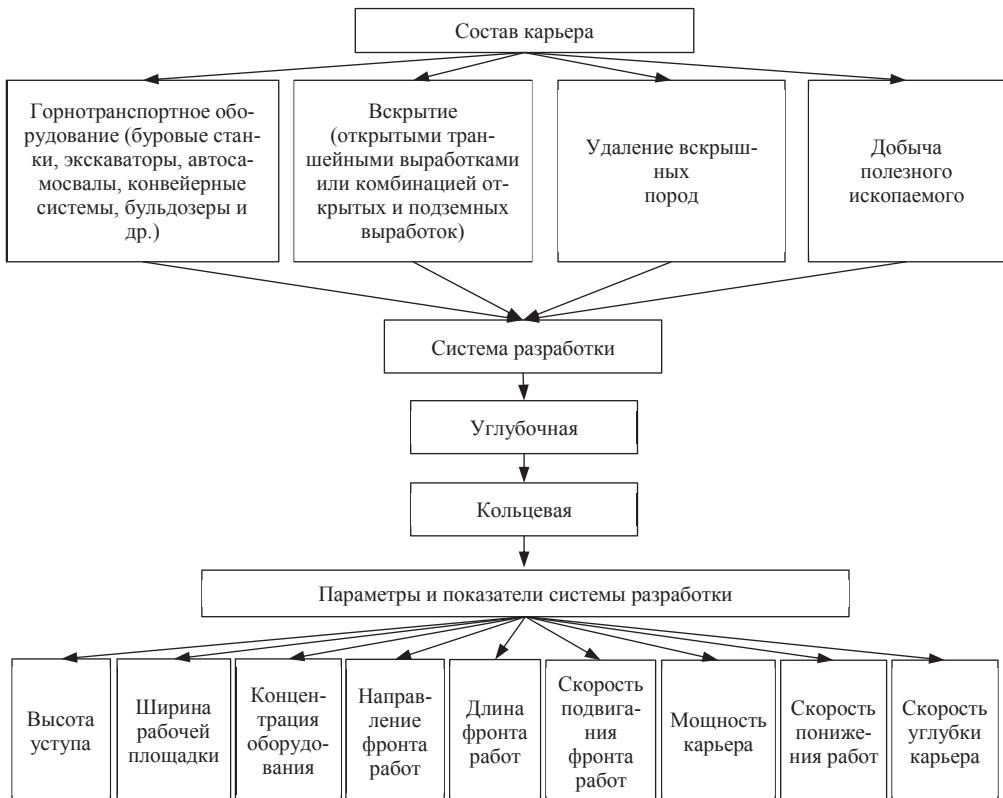


Рис. 1. Блок-схема структуры карьера «Восточный» как технологического комплекса и горнотехнической системы

Fig. 1.The flowchart of the pit Vostochny structure as a technological complex and mining technical system

В связи с крутонаклонным падением рудных тел и плановыми объемами горных работ максимальная глубина карьера в настоящее время достигла 500 м. С 2005 по 2018 г. интенсивно разрабатывали III очередь с годовой производственной мощностью по руде 8 млн т и производительностью по горной массе до 30 млн м³. В 2018 г. при увеличении общих объемов горной массы до 46 млн м³ были начаты вскрышные работы в границах IV очереди с целью последующего достижения годовой производственной мощности по руде 13,4 млн т.

Для выполнения этих объемов и достижения наилучших экономических показателей применяют современное горнотранспортное оборудование различных производителей, обеспечивают взаимосвязь технологии производства вскрышных и добывочных работ, с одной стороны, параметров и технологических характеристик комплекса оборудования – с другой.

Так, за срок разработки до границ III очереди карьера вместимость ковша экскаваторов возросла с 5 до 15 м³, грузоподъемность автосамосвалов увеличилась с 30 до 136 т, а для дальнейшего развития горных работ до границ IV очереди приобретены экскаваторы с вместимостью ковша 35 м³ и автосамосвалы грузоподъемностью 220 т.

Вместе с тем достижение наилучших технико-экономических показателей разработки месторождения возможно только при увязке технологии производства вскрышных и добычных работ с параметрами и технологическими характеристиками комплекса оборудования.

Теория и методология исследований. Для такого единства технологии и комплексной механизации открытых разработок В. В. Ржевским введено понятие технологического комплекса карьера как совокупности комплекса оборудования и технологических решений (в первую очередь по системам разработки и вскрытия и их параметрам), совместно обеспечивающих безопасное, высокопроизводительное и экономичное выполнение горных работ в плановых объемах [1, 2]. Если развить эту мысль, то любой карьер можно рассматривать как горнотехническую систему, представляющую собой совокупность горных конструкций, оборудования, технологических процессов горного производства во взаимодействии с вмещающим их участком недр [3].

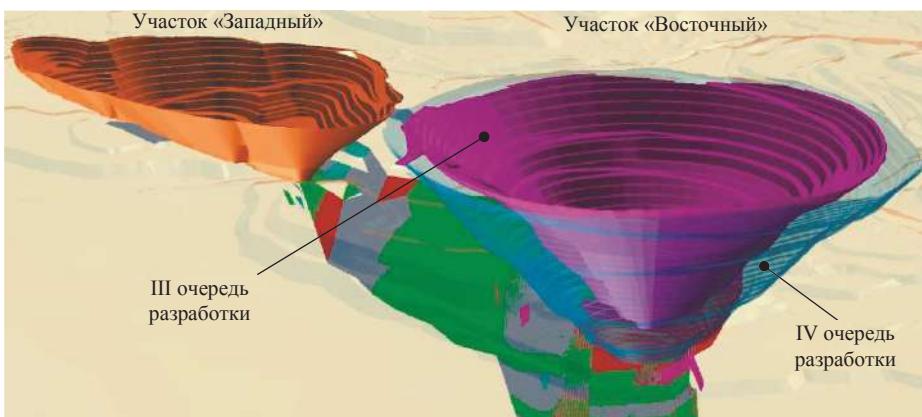


Рис. 2. Модель разработки Олимпиадинского месторождения до проектной глубины 750 м
Fig. 2. The model of the Olimpiadinsky deposit mining up to the design depth of 750 m

С учетом этого положения для принятия решений по дальнейшей разработке месторождения предложена блок-схема (рис. 1).

Результаты и их анализ. С учетом изложенного проектными решениями для разработки IV очереди карьера обоснован выбор следующего оборудования: буровые станки СБШ-250/270, PV-351 с диаметром долота до 270–351 мм, экскаваторы ЭКГ-18(20), WK-20, WK-35, Komatsu PC 5500 с вместимостью ковша до 18–35 м³, автосамосвалы CAT 793 грузоподъемностью 220 т.

Данные модели оборудования с учетом принципов системности должны заменить применяемые ранее для разработки III очереди буровые станки СБШ-250МНА, DML, PV-235 с диаметром долота 215,9–250,0 мм, экскаваторы ЭКГ-10, Komatsu PC 3000 с вместимостью ковша 10–15 м³, автосамосвалы CAT 777 и CAT 785 грузоподъемностью 90–136 т.

Как показали выполненный анализ рынка [4, 5], расчеты и исследования авторов [6], эффективность новых машин в условиях месторождения предопределена возможностью продолжить разработку до 2028 г. с заданной интенсивностью,

а также меньшими инвестициями и эксплуатационными затратами как наиболее известными критериями [7, 8], большей устойчивостью к негативному влиянию природных климатических факторов и сопоставимостью рекомендованного срока эксплуатации со сроком ведения горных работ [9].

Модель карьера, иллюстрирующая его развитие до границ IV очереди, показана на рис. 2. Причем высота уступа, разрабатываемого экскаваторами, для обеспечения необходимой скорости разноса борта принята 15 м. Минимальная ширина рабочей площадки в зоне разноса составляет 78 м, критическая – 51 м. Минимальная ширина транспортной бермы при уклоне 100 % равна 46 м.

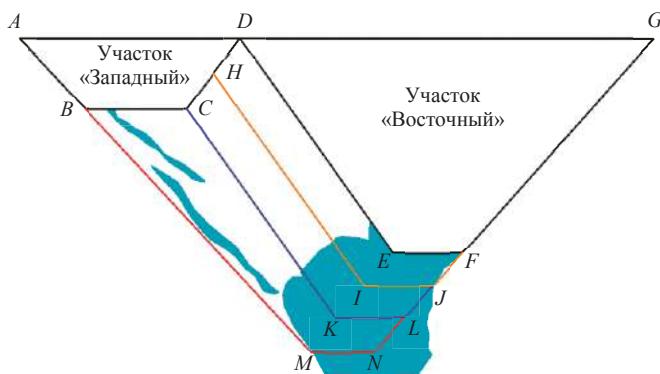


Рис. 3. Схема разработки Олимпиадинского месторождения апробированной техникой и технологией до глубины:

750 м – проектный контур $ABCDEF\bar{G}$; 780 м – контур $ABCHIJG$; 810 м – контур $ABCKLG$; 840 м – контур $AMNG$

Fig. 3. The scheme of the Olimpiadinsky deposit mining with the tested equipment and technology up to the depth of:
750 m – a design contour of $ABCDEF\bar{G}$; 780 m – $ABCHIJG$ contour;
810 m – $ABCKLG$ contour; 840 m – $AMNG$ contour

Проведенный горно-геометрический анализ показал, что расширение границ карьера принятым оборудованием и технологией возможно по схеме на рис. 3. Здесь проектное положение границ IV очереди карьера до глубины 750 м соответствует контуру $ABCDEF\bar{G}$, перспективные положения границ V очереди до глубины 780, 810 и 840 м – контурам $ABCHIJG$, $ABCKLG$ и $AMNG$ соответственно. По мере понижения горных работ и прирезки запасов руды участки «Восточный» и «Западный» объединяются в единое пространство.

При исследовании режима горных работ на базе полученных перспективных границ разработки было оценено множество вариантов календарных графиков добычи прирезаемых запасов руды с различием сроков начала разработки V очереди карьера и годовых вскрышных объемов. В результате установлено, что при неизменной проектной производственной мощности по руде период открытой разработки месторождения возможно продлить до 2034 г. Однако годовые объемы выемки вскрыши будут увеличены в 1,6–1,8 раза, а для их транспортирования необходимо дополнительно приобрести и ввести в эксплуатацию около 70 ед. 220-тонных автосамосвалов.

При разработке месторождения на таких глубинах экономическая эффективность будет предопределена видом транспорта [10, 11]. Для его выбора предложена схема, приведенная на рис. 4.

Согласно этой схеме сформированы два варианта продолжения работ. По первому в контуре $AMNG$ рассмотрено применение конвейерных систем для транспортирования вскрышных пород, а по второму в контуре $ABCHI'NN'JG$ – использу-

зование автоматизированных систем дистанционного управления буровыми станками, экскаваторами, автосамосвалами и бульдозерами.

С учетом того что основным недостатком циклично-поточной технологии (ЦПТ) в условиях месторождения является необходимость привлечения больших инвестиций, а их компенсация возможна за счет сокращения количества приобретаемых автосамосвалов и значительного снижения удельной себестоимости транспортирования, оценку эффективности ЦПТ осуществляли с использованием чистого дисконтированного дохода. В результате установлено, что экономическое тождество по вариантам транспортирования вскрыши автосамосвалами и конвейерными системами в рассматриваемых границах карьерного пространства возникает при годовом объеме перевозок примерно 50 % от общего календарного значения. Конвейерное оборудование при этом возможно разместить на борту по линии $F'G'$ с углом наклона до 37° , дробильный комплекс и перегрузочный пункт – в точке F' на глубине не менее 50 м от поверхности.

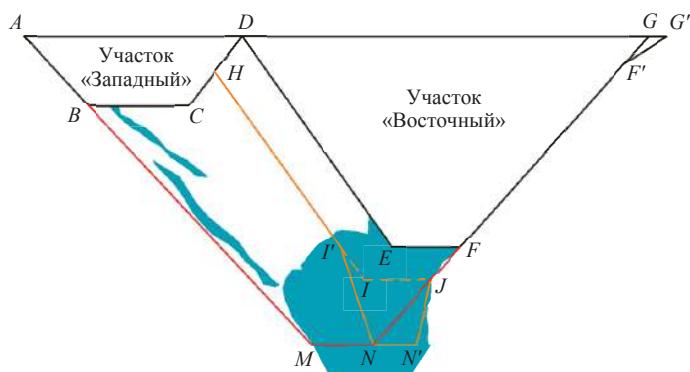


Рис. 4. Схема перспективной разработки Олимпиадинского месторождения до глубины 840 м с применением конвейерного транспорта в контуре $AMNF'G'$ и дистанционно управляемого оборудования в контуре $I'IJN'N$

Fig. 4. The scheme of Olimpiadinsky deposit advanced mining up to the depth of 840 m with the use of conveyor transport in a contour of $AMNF'G'$ and the remote-controlled equipment in $I'IJN'N$ contour

Вариант развития карьера в контуре $ABCNI'NN'JG$ на рис. 4 принят к оценке на основе базовых вариантов с предельной глубиной разработки 780 и 840 м в контуре $ABCNIJG$ и контуре $AMNG$ соответственно (рис. 3). При этом в глубинной части выделена рудная зона $I'NN'J'$ с увеличенными до 83° углами откосов уступов и дополнительными запасами руды. Горные работы в данной зоне ведут комплексами оборудования с дистанционным управлением. Это позволяет снизить максимальные годовые объемы вскрыши или при их почти неизменном значении повысить годовую производственную мощность по руде до уровня 15 млн т/год.

Стоит отметить, что в настоящее время для большей безопасности работ на карьере уже реализуется проект по внедрению подобного оборудования. Укомплектованы имеющиеся буровой станок Atlas Copco DML с диаметром долота 215,9 мм; экскаватор Komatsu PC 3000 с вместимостью ковша 15 м³; 5 ед. автосамосвалов CAT 777 F грузоподъемностью 91 т и бульдозер Komatsu D 275A. При успешном развитии проекта использование известных преимуществ машин с дистанционным управлением целесообразно и на стадии доработки IV очереди карьера. Для оценки эффективности работы можно применить предложенные ранее схемы и критерии [12].

Таким образом, к основным причинам, усложняющим процесс обоснования параметров горнотехнической системы карьера «Восточный», следует отнести большое количество и высокую ценность запасов золота; значение этих запасов для масштабов страны; большую производственную мощность карьера и глубину разработки; ограниченность карьерного пространства, рабочих размеров и параметров оборудования; высокую себестоимость горных работ и многомиллионные инвестиции. Решение этих задач позволит обеспечить безопасное, высокопроизводительное и экономичное выполнение горных работ в плановых объемах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ржевский В. В. Открытые горные работы. Технология и комплексная механизация. М.: Либреком, 2010. 552 с.
2. Ржевский В. В. Горные науки. М.: Недра, 1985. 96 с.
3. Трубецкой К. Н., Каплунов Д. Р. Горное дело: терминологический словарь. М.: Горная книга, 2016. 635 с.
4. Market analysis and forecast loading & haulage equipment. The Parrker Bay Company, December, 2015. 129 р.
5. Подэрни Р. Ю. Мировой рынок поставок современного выемочно-погрузочного оборудования для открытых горных работ // ГИАБ. 2015. № 2. С. 148–167.
6. Кузнецов Д. В. Обоснование технологических комплексов горнотранспортного оборудования для открытой разработки рудных месторождений в суровых климатических условиях: дис. канд. техн. наук. Красноярск, 2015. 150 с.
7. Burt C. Equipment selection for surface mining: a review // Interfaces. 2014. No. 44(2). P. 143–162.
8. Burt C., Caccetta L. Equipment selection for mining: with case studies. 2018. 155 p.
9. Runge I. Economics of mine planning and equipment selection // Mine Planning and Equipment Selection (MPES). 2010. P. 93–100.
10. Васильев М. В. Транспорт глубоких карьеров. М.: Недра, 1983. 295 с.
11. Яковлев В. Л. Транспорт глубоких карьеров. Состояние, проблемы, перспективы // Горное дело. 2013. № 1. С. 11–18.
12. Кузнецов Д. В., Косолапов А. И. Оценка целесообразности перехода на новые комплексы оборудования при доработке глубоких карьеров // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 4. С. 4–11.

Поступила в редакцию 27 февраля 2019 года

Сведения об авторах:

Кузнецов Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, ведущий инженер горно-геологического отдела компании Полюс Проект. E-mail: kuznetsovdv@mail.ru

Косолапов Александр Иннокентьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой открытых горных работ Сибирского федерального университета. E-mail: kosolapov1953@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-5-11

The validation of the pit mine technical system parameters for the Olympiadinsky gold ore deposit mining

Dmitrii V. Kuznetsov¹, Aleksandr I. Kosolapov²

¹ Polyus Project, Krasnoyarsk, Russia.

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Abstract

Introduction. The article reviews the equipment and technology for open mining operations at the largest Russian gold pit Vostochny with the annual ore production capacity up to 15 million tons per year with the depth up to 840 m.

Research theory. Concepts of the technological complex and the pit mine technical system are given. Taking this into account the flowchart which defines the studied object structure is offered. On the basis of integrating practice data and design experience the features of mining-transport equipment fitting out and mining operations key parameters determination are introduced.

Results and conclusions. The results of conveyor systems application evaluation for overburden rocks transportation are presented as well as remotely-controlled drilling rigs, excavators, dump trucks and bulldozers in a deep ore part of a pit. The condition of mining operations is analysed. On the example of schemes, the pit attitude positions and sizes change is shown. It is established that for conveyor transport economic efficiency, the volume of the transported overburden rocks has to be not less than 50% of the

general calendar value. At the same time it is possible to place a crushing complex and a reloading point at the edge of an open pit at a depth of 50 m from surface. The reasonability of equipment remote control systems application is estimated by the possibility to develop edges with the increased slope angle in a deep ore zone of a pit. Such decision allows to reduce the maximum annual volumes of overburden or at their almost invariable value to increase annual ore production capacity to the level of 15 million tons per year.

Key words: pit technological complex; mining technical system of a pit; severe climatic conditions; pit depth; distance of mined rock transportation; ore production capacity; mined rock productivity.

REFERENCES

1. Rzhevskii V. V. *Opencast mining. Technology and complex mechanization*. Moscow: Librokom Publishing; 2010. (In Russ.)
2. Rzhevskii V. V. *Mining science*. Moscow: Nedra Publishing; 1985. (In Russ.)
3. Trubetskoi K. N., Kaplunov D. R. *Mining: terminology dictionary*. Moscow: Gornaia kniga Publishing; 2016. (In Russ.)
4. *Market analysis and forecast loading & haulage equipment*. The Parrker Bay Company, December, 2015. 129 p.
5. Poderni R. Iu. World of advanced extraction-and-loading machines for open pit mining. *Gornyi informatsionno-analiticheskii bulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2015; 2: 148–167. (In Russ.)
6. Kuznetsov D. V. *Substantiating technological complexes of mining-transport equipment for ore deposits opencast mining under severe climatic conditions*. PhD dissertation abstract. Krasnoyarsk; 2015. (In Russ.)
7. Burt C. Equipment selection for surface mining: a review. *Interfaces*. 2014; 44(2): 143–162.
8. Burt C., Caccetta L. *Equipment selection for mining: with case studies*. 2018. 155 p.
9. Runge I. Economics of mine planning and equipment selection. *Mine Planning and Equipment Selection (MPES)*. 2010. P. 93–100.
10. Vasiliev M. V. *Transport of deep open pits*. Moscow: Nedra Publishing; 1983. (In Russ.)
11. Iakovlev V. L. Transport of deep open pits. State, problems, and prospects. *Gornoe delo = Mining*. 2013; 1: 11–18.
12. Kuznetsov D. V., Kosolapov A. I. Estimation of the advisability of the transition into new complexes of mining-and-transport equipment under deep open pits development. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2018; 4: 4–11. (In Russ.)

Received 27 February, 2019

Information about authors:

Dmitrii V. Kuznetsov – PhD (Engineering), leading engineer of Mining and Geological Department of the company “Polyus Project”. E-mail: kuznetsovdv@mail.ru

Aleksandr I. Kosolapov – DSc (Engineering), Professor, the Head of Opencast Mining Department, Siberian Federal University. E-mail: kosolapov1953@mail.ru

Для цитирования: Кузнецов Д. В., Косолапов А. И. Обоснование параметров горнотехнической системы карьера для разработки Олимпиадинского золоторудного месторождения // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 4. С. 5–11. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-5-11

For citation: Kuznetsov D. V., Kosolapov A. I. The validation of the pit mine technical system parameters for the Olympiadinskiy gold ore deposit mining. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 4: 5–11 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-5-11

Особенности формирования напряженно-деформированного состояния в бетонной крепи стволов Донского и Гайского ГОКов

Зубков А. В.¹, Феклистов Ю. Г.¹, Сентябов С. В.^{1*}

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

*e-mail: sentyabov1989@mail.ru

Реферат

Цель исследования. Изучение напряженно-деформированного состояния (НДС) бетонной крепи стволов Донского и Гайского ГОКов. На Донском ГОКе в начале 1980-х гг. происходило спонтанное разрушение крепи стволов. Наибольшие объемы вывалов породы были отмечены в скрип-клетевом и клетевом ствалах шахты «Центральная», где было обследовано 4 ствола, и 2-х ствалах шахты «Молодежная». На Гайском ГОКе с 2013 г. ведутся исследования формирования НДС крепи с целью прогноза устойчивости стволов и предупреждения аварийных ситуаций.

Методика исследования. Проблема устойчивости стволов обусловила необходимость решения задачи по определению уровня НДС и прочностных свойств в бетонной крепи. Параметры НДС крепи стволов и мониторинг их изменений впервые в отечественной практике определены щелевой разгрузкой – модернизированным методом измерения деформаций разгрузки. Использованы также методы лабораторных исследований и аналитического моделирования.

Анализ результатов. Установлено, что неравномерность распределения НДС в крепи по периметру ствала обусловлена анизотропией поля напряжений в массиве пород. При этом положение зон с наибольшим вывалообразованием хорошо согласуется с максимальными сжимающими напряжениями, действующими в крепи и в окрестном массиве пород.

Выходы. На практике предложено использовать основные выявленные положения, а именно: напряженное состояние крепи шахтных стволов формируется как функция их конструктивных параметров, полного тензора гравитационно-тектонических напряжений, действующих в массиве пород на момент начала исследований и переменных во времени, которые определяют натурными и аналитическими методами. Обязателен также учет физико-механических свойств породного массива и бетона крепи.

Ключевые слова: бетонная крепь стволов; напряженно-деформированное состояние; вывалообразование; устойчивость; щелевая разгрузка; деформации разгрузки; физико-механические свойства.

Введение. В начале 1980-х гг. на шахте «Молодежная» Донского ГОКа были готовы к эксплуатации 3 вертикальных ствола. Для вскрытия мощных хромитовых залежей в поле шахты «Центральная» в стадии проходки находились 4 ствола. Основные характеристики всех стволов, закрепленных монолитной бетонной крепью, приведены в табл. 1.

На шахте «Центральная» произошли спонтанные разрушения крепи в строящихся ствалах. Максимальные объемы вывалов пород и крепи зафиксированы в скрип-клетевом и клетевом ствалах (табл. 2).

Шахтостроители провели ряд мероприятий для обеспечения проходки стволов: уменьшили высоту опалубки с 4 до 3 м, применили контурное взрывание, увеличили марку бетона, но разрушение приконтурного массива происходило даже впереди забоя, так как порода местами до 2,0 м разбиралась без применения

буровзрывных работ. Установлено, что объем вывалов на 1 м скипо-клетевого ствола превышает показатель по клетевому стволу в 1,7 раза.

Анализ глубины вывалов от контура стволов привязан к азимуту. В клетевом стволе прослежены диаметральные азимуты (135° и 315°) разрушений, глубина которых в 1,4–1,8 раза больше, чем на соседних участках, и они согласуются с зонами ожидаемых главных напряжений на контуре (около 145° и 325°). В скипо-клетевом стволе отмечено равномерное разрушение по периметру за исключением случаев по азимуту 45° .

Таблица 1. Основные характеристики стволов Донского ГОКа
Table 1. Main characteristics of Donskoy GOK shafts

Шахта, ствол	Диаметр, м		Глубина в проекте, м
	в свету	вчерне	
<i>Молодежная</i>			
Клетевой	8,0	8,8	760
Скиповoy	6,1	6,8	708
Вентиляционный	6,0	6,7	523
<i>Центральная</i>			
Клетевой	8,0	8,8	765–1290
Скипо-клетевой	7,6	8,3	696
Вентиляционный	6,6	7,2	603
Вспомогательный	6,5	7,2	649

На шахте «Молодежная» в скиповом и клетевом ствалах отмечено 40 зон обрушений по направлению 30° – 45° и 210° – 225° , которые согласуются с направлением главных напряжений, действующих по азимуту 135° и в 1,5 раза превышающих по величине ортогональные напряжения.

Анализ аварий в ствалах Донского ГОКа показывает, что зоны обрушения в основных ствалах совпадают с зонами максимального сжатия приконтурного массива, кроме скипо-клетевого ствола шахты «Центральная».

Таблица 2. Объемы вывалов с глубиной на шахте «Центральная», м³
Table 2. The volume of inrushes with a depth at mine Tsentralnaya, m³

Ствол	Глубина, м						
	0–100	100–200	200–300	300–400	400–500	500–600	600–700
Скипо-клетевой	492	386	360	1000	533	1074	1952
Клетевой	254	310	246	227	126	925	899

Известно, что наряду с напряженным состоянием на устойчивость массива оказывает влияние его геологическое и тектоническое строение [1, 2]. Стволы шахты «Центральная» пройдены в серпентинитах с коэффициентом крепости $f = 10$. Под действием тектоники породы разбиты трещинами (от 4 до 15 на 1 м), которые заполнены серпифитом, поэтому сцепление пород слабое и они склонны к обрушению. При проходке основных стволов были пересечены три зоны неустойчивых, брекчированных от 5 до 50 см и милонитизированных пород мощностью до 1,0 м с зонами дробления размером до 200 м. Участок для проходки стволов сложный по горно-геологическим условиям и не имеет аналогов в отечественной практике.

Стволы шахты «Молодежная» пройдены по серпентинизированным дунитам. Трещины имеют крутое падение (70° – 80°). Мощных зон дробления

не встречено, но отмечены тектонические нарушения, поэтому условия проходки удовлетворительны.

Таким образом, ультраосновные вмещающие породы Донского ГОКа имеют широкий диапазон прочностных свойств и сильную трещиноватость. Заполнитель трещин – талько-слиодистый материал, при увлажнении которого резко снижаются прочностные показатели массива.

Гайское медноколчеданное месторождение отрабатывают с 1959 г., оно представлено залежами сложных линзообразных и жилообразных форм: медный колчедан, медно-цинковый колчедан, серный колчедан и прожилково-вкрашенные руды. Вмещающая свита представлена альбитофирами, туфобрекциями и туфами.

Стволы находятся в туфах андезитодактического состава, имеющих модуль упругости в породном образце $E_0 = 0,72 \cdot 10^5$ МПа.

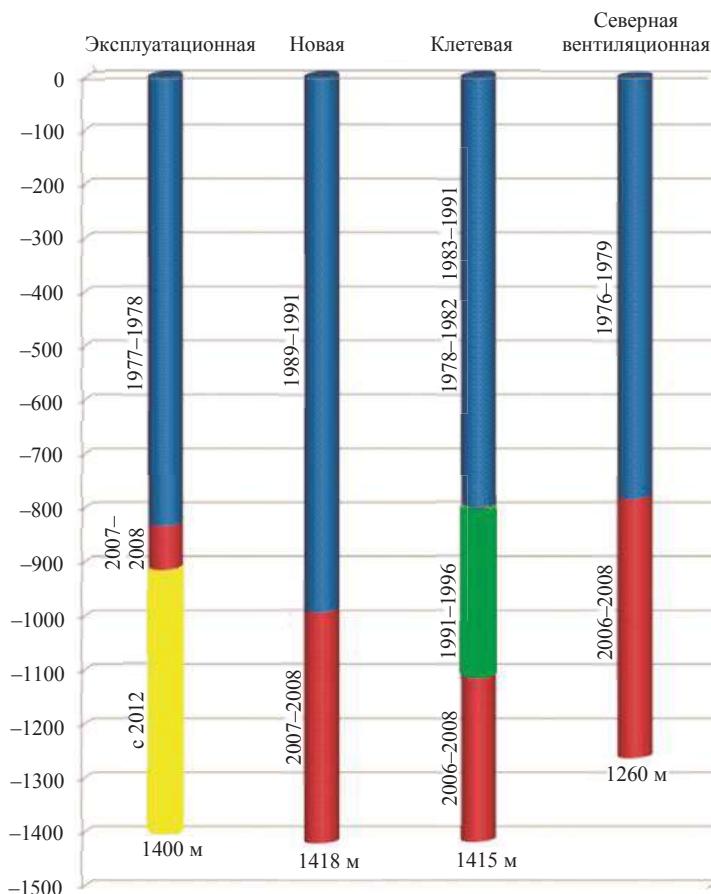


Рис. 1. Схема проходки стволов подземного рудника по годам
Fig. 1. Scheme of underground mine shaft sinking by years

Модуль упругости в массиве определяется по формуле [3]: $E_m = 0,93^n E_0$, МПа, где n – количество рангов геоблоков.

В массивах со средним размером структурных блоков 0,57 м и коэффициентом вложения $\lambda = 2$ модуль упругости пород при $n = 5$ составит $E_m = 0,5 \cdot 105$ МПа.

С целью увеличения производительности Гайского подземного рудника с 5,6 до 7 млн т руды в год разработан проект развития «Вскрытие и разработка глубоких горизонтов в этаже –830...–1310 м подземного рудника». В проекте решаются вопросы вскрытия и разработки глубоких горизонтов подземного рудника,

разработки новых схем доставки руды, реконструкции шахтных стволов и их углубки до отметки –1420 м от поверхности. С 2012 г. приоритетными объектами являются шахты «Клетевая», «Северная вентиляционная», «Эксплуатационная» и «Новая» (рис. 1).

При визуальном осмотре ствола шахты «Клетевая» с горизонта –750 м и ствола шахты «Эксплуатационная» выявлен ряд нарушений крепи, характерных при проявлении высокого горного давления. По всей глубине стволов были зафиксированы разрушения стыков между бетонными кольцами, а также в местах сопряжений стволов с выработками околоствольного двора.

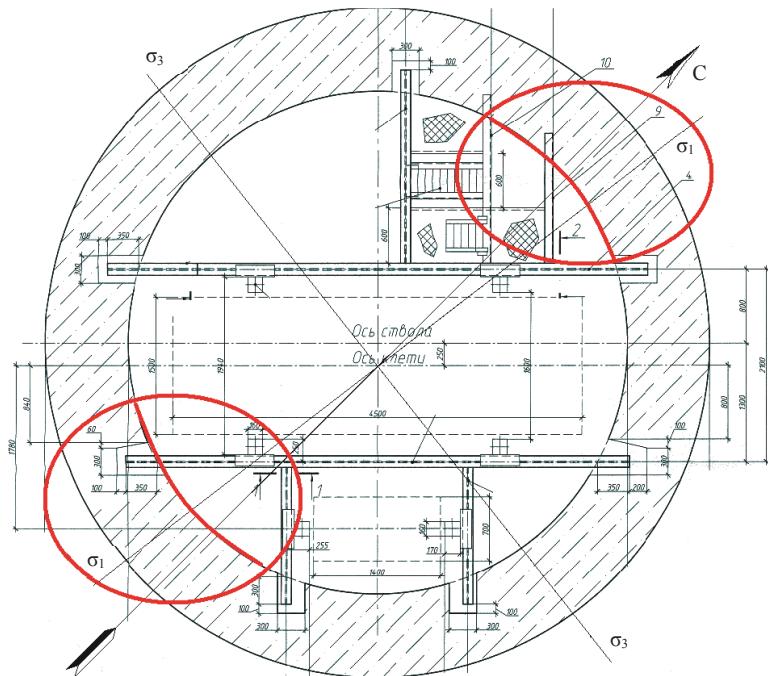


Рис. 2. Направления действия главных сжимающих напряжений с их ориентировкой к оси ствола шахты «Клетевая» Гайского ГОКа
Fig. 2. The direction of main compressive stresses action with their orientation to the axis of Kletevaya mine shaft of Gaisky GOK

Большинство нарушений было отмечено в северной части стволов. Поскольку главные сжимающие напряжения σ_3 ориентированы по азимуту 97° , то в районе действия σ_1 по азимуту 7° формируется зона максимального сжатия, где и были отмечены нарушения. Следовательно, крепь находится под действием высокого горного давления. Направления действия главных сжимающих напряжений с их ориентировкой к оси ствола представлены на рис. 2. Зона максимального сжатия обозначена красным цветом.

Для установления картины распределения параметров НДС по периметру крепи на различных глубинах и в обозначенных зонах был выполнен конкретный комплекс исследований.

Цель работы. Исследование особенностей формирования напряженно-деформированного состояния бетонной крепи стволов Донского и Гайского ГОКов с целью прогноза и предотвращения аварийных ситуаций.

Исследование напряженно-деформированного состояния бетонной крепи Донского ГОКа. Учитывая сложность и трудоемкость работ по определению НДС массива горных пород в подземных условиях, на рудниках обычно прово-

дили одну серию измерений в конкретное время и на конкретной глубине и использовали эти результаты в дальнейшем, считая тектоническую составляющую σ_t константой. На ряде рудников проводили по две, три и более серии измерений по мере вскрытия новых горизонтов. Это дало возможность проследить изменение напряжений с глубиной, появилась возможность проанализировать изменение этих результатов во времени.

К сожалению, из 25 рудников Урала и Казахстана такую информацию удалось получить только на тринадцати. На других рудниках России и мира, как правило, нет точной привязки результатов измерений ко времени и даются лишь усредненные изменения напряжений с глубиной [4–7].

Анализ масштабной аварийной ситуации, имевшей место в начале 1980-х гг. на Донском ГОКе, показал, что для прогноза подобных явлений наряду с информацией о горно-геологических особенностях месторождений необходимо знать параметры НДС массива пород. Для определения величин и направления действия напряжений в крепи стволов шахт необходимо выбрать методику исследования.

Методика определения напряжений в бетонной крепи стволов и вмещающем массиве пород. Определения величин напряжений в бетонной крепи стволов в отечественной практике не отмечено. Объясняется это тем, что существует ряд условий на выбор метода измерения. Обильный водоприток и заполнитель в бетоне (щебень размером 1–1,5 см) исключает применение методов электротензометрических датчиков или скважинных деформометров.

В данных условиях приемлемы методы, фиксирующие деформацию разгрузки механическим способом на базах, превышающих размер заполнителя бетона не менее чем в 5 раз.

Метод щелевой разгрузки разработан в ИГД МЧМ СССР для определения напряжений на обнажениях выработок. Разгрузочную щель радиусом 0,3 м в форме полудиска бурят шпурами по шаблону. Деформации разгрузки измеряют между парными реперами до и после разгрузки.

Для определения первоначальных напряжений во вмещающем массиве используют метод частичной разгрузки на большой базе ИГД МЧМ СССР. Первый замер выполняют между парными реперами замерных станций, установленных вблизи забоя ствола. После углубки забоя делают следующие замеры. Разница в замерах дает деформацию ствола, которую используют при расчете напряжений [2].

Прочностные и упругие свойства бетонной крепи определены по ГОСТам [8]. Испытание образцов крепи показало, что прочность бетона при сжатии составляет 34–49 МПа, а модуль упругости $E = (0,23–0,25) \cdot 10^5$ МПа. В пределах нагрузок до 20 МПа отмечена линейная связь между напряжениями и деформацией.

Результаты измерения НДС в крепи стволов Донского ГОКа. При совместном способе проходки и крепления ствола напряжения в крепи обусловлены деформацией стенок ствола после возведения крепи, а также упругими свойствами и толщиной бетонной крепи [1].

Согласно исследованиям ИГД МЧМ СССР установлено: при действии начальных напряжений массива пород деформация ствола у забоя составляет 60–70 % от максимальной деформации U_{\max} , которая происходит выше забоя на расстоянии более 2,5 радиусов ствола $R_{\text{стv}}$ [1, 3].

Измерения были проведены в «Клетевом» (39), «Скипо-клетевом» (31), «Северном вентиляционном» (4) и «Вспомогательном» (6) стволях шахты «Центральная», а также в «Клетевом» (9) и «Вентиляционном» (4) стволях шахты «Молодежная». В скобках приведено количество точек измерений. Всего по шахтам выполнено соответственно 80 и 13 замеров.

По полученным тангенциальным напряжениям были построены эпюры распределения напряжений по периметру ствола на уровне низа заходок крепи (рис. 3).

В результате появилась возможность определить максимальные σ_{\max}^k и минимальные σ_{\min}^k напряжения в крепи, а также азимут их действия. Наличие максимумов и минимумов объясняется анизотропией поля напряжений в массиве пород [9].

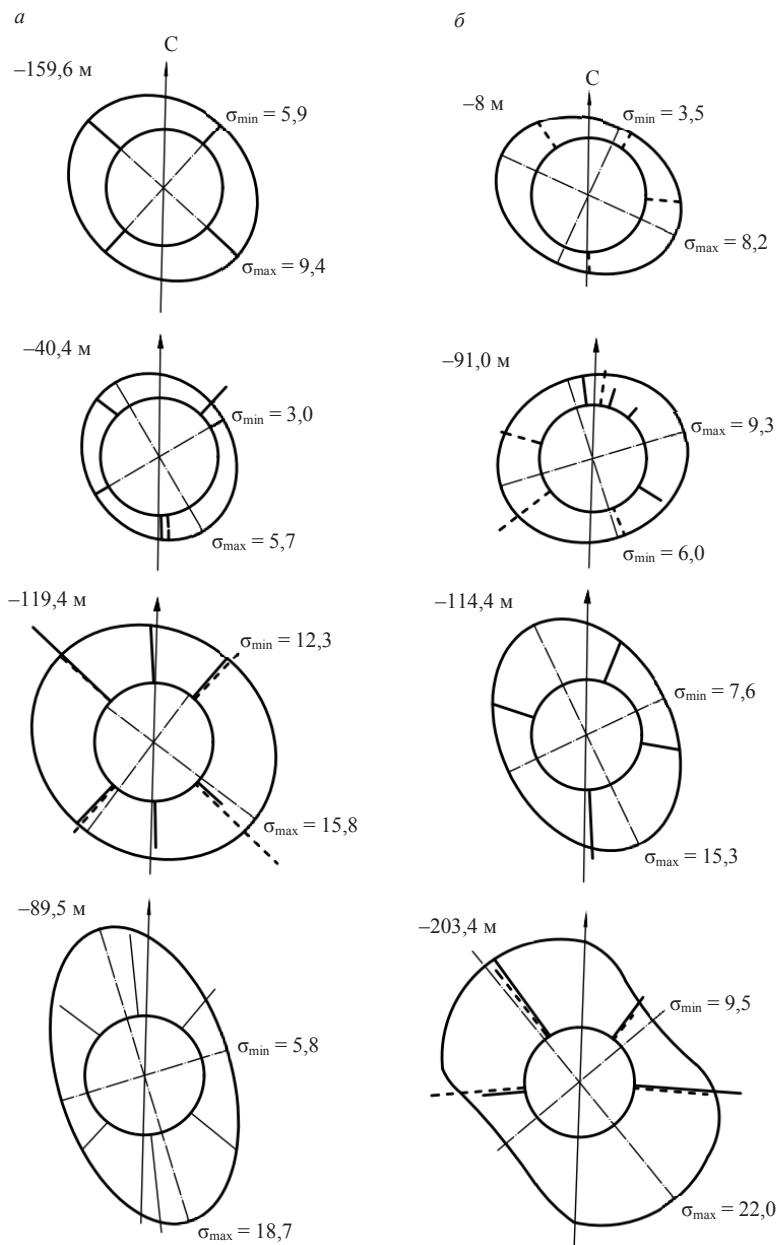


Рис. 3. Эпюры распределения напряжений в бетонной крепи клетевого и скрип-клетевого ствола шахты «Центральная» Донского ГОКа:
а – клетевой; б – скрип-клетевой

Fig. 3. Stress distribution diagrams in concrete support of cage and skip-cage shafts of Donskoy GOK mine Tsentralnaya:
a – cage; б – skip-cage

Исследованиями первоначального напряженного состояния массива на шахте «Молодежная» методами щелевой и частичной разгрузки на большой базе было установлено: на гор. -135 м вертикальные напряжения равны весу пород

$\sigma_z^M = -13,5$ МПа; горизонтальные, действующие по простиранию месторождения (азимут 45°), $\sigma_y^M = -13$ МПа, а вкrest простирания $\sigma_x^M = -18$ МПа. По аналогии с рудными месторождениями Урала [10] и Казахстана изменение напряжений по глубине H , МПа, можно выразить зависимостями:

$$\begin{aligned}\sigma_z^M &= -0,026H; \\ \sigma_y^M &= -0,026H; \\ \sigma_x^M &= -0,026H + 4,5.\end{aligned}$$

При определении напряжений методом частичной разгрузки на большой базе во вспомогательном стволе шахты «Центральная» на глубине 500 м установлено, что его деформация по периметру неодинакова. Замерная станция, установленная в 1,5–2 м от забоя, после углубки ствола на 3,5–4 м показала уменьшение диаметра ствола по азимуту 55° на 12 мм, а по азимуту 145° на 5 мм. По мере дальнейшей углубки деформация возрастила соответственно до 23 и 10 мм.

Такая деформация ствола с учетом модуля упругости породы в массиве $E_n = 7 \cdot 10^3$ МПа (по данным института ВИОГЕМ) согласно теории возможна при действии в массиве пород горизонтальных напряжений $\sigma_1^M = -13,2$ МПа и $\sigma_2^M = -20,9$ МПа. Напряжения σ_2^M действуют по азимуту 55° .

Напряжения в массиве на шахте «Центральная», МПа, можно выразить следующим образом:

$$\begin{aligned}\sigma_z^M &= -0,026H; \\ \sigma_1^M &= -0,026H; \\ \sigma_2^M &= -0,026H + 7,7.\end{aligned}$$

Анализ параметров σ_{\max}^K и σ_{\min}^K погоризонтно в стволях шахты «Центральная» показал, что главные напряжения в массиве действуют по азимуту 22° – 72° , в среднем 51° . Это согласуется с результатами измерения напряжений на большой базе, где азимут определен 55° . Это подтверждают и зоны с максимальными вывалами из стенок стволов [1]. На шахте «Молодежная» ориентировка главных напряжений и вывалы крепи стволов подтверждают их действие в массиве пород по азимуту 135° .

Измеренные параметры НДС дают возможность проследить по всем стволам изменение главных напряжений с глубиной (рис. 4). До глубины 450–500 м главные напряжения в крепи не превышают 10 МПа и вариация их в пределах 4–10 МПа объясняется различием толщины крепи от 0,4 до 1,0 м, а также различием геологического строения массива на горизонтах [11]. Однако взаимность влияния этих факторов на σ_{\max}^K установить не удалось.

Начиная с глубин 450–500 м и ниже наблюдается резкий рост напряжений. Так, при увеличении глубины всего на 100 м (до 550–600 м) уровень напряжений возрастает в 2 раза. Если подобная тенденция их роста сохранится, то на нижних отметках клетевых стволов шахт «Центральная» и «Молодежная» следует ожидать σ_{\max}^K соответственно 30–35 МПа и 25 МПа, что близко к пределу измеренной прочности бетона в образце, но выше нормативной прочности этих бетонов.

Результаты исследования НДС крепи стволов Гайского ГОКа. В процессе исследований на Гайском месторождении натурные определения напряжений, действующих в крепи стволов, проводились при помощи модифицированного

метода щелевой разгрузки [12, 13]. Измерения были проведены на глубине –830, –910, –990, –1075 и –1390 м Гайского подземного рудника.

По результатам измерений с помощью нового метода были получены следующие деформации, представленные в табл. 3.

Путем решения плоской задачи теории упругости пересчет полученных величин относительных деформаций в напряжения приведен в табл. 4.

Для уточнения физико-механических характеристик бетонной крепи в местах установки деформационных станций было проведено определение прочности бетона склерометрическим неразрушающим методом. Согласно ГОСТ 22690-88. *Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля*, подтверждено соответствие бетона на данных участках ствола проектному классу М200 и требованиям СНиП 3.02.03-84 и СНиП 11-94-80.

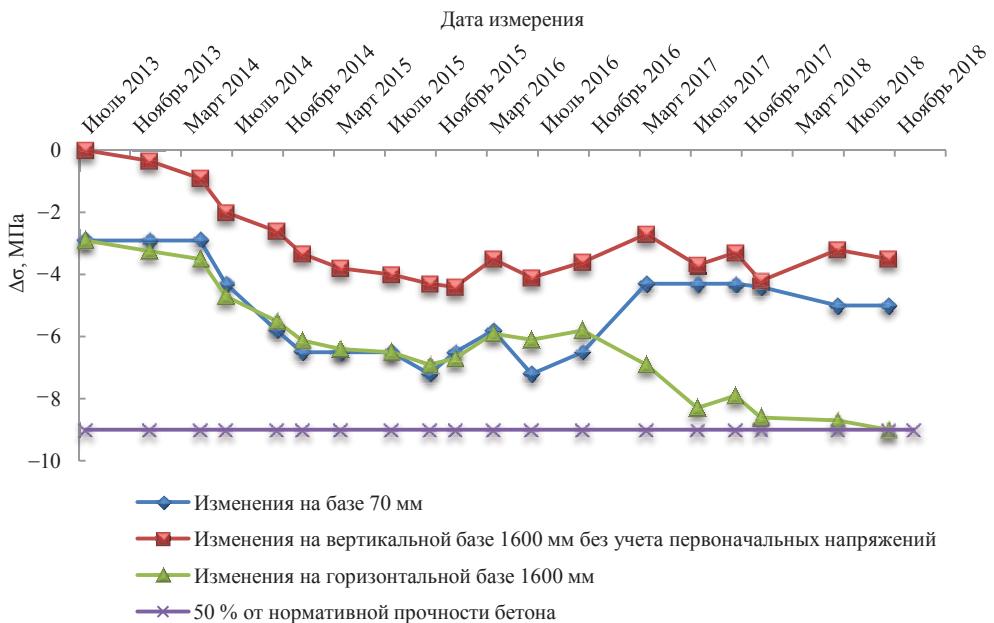


Рис. 4. График изменения напряжений в бетонной крепи ствола шахты «Клетевая» на гор. –830 м
Fig. 4. The graph of stress changes in concrete support of Kletlevaia mine shaft on the horizon –830m

Для проведения долговременных наблюдений за изменением НДС в крепи ствола шахты «Клетевая» специально устанавливались станции на глубине –830, –910, –990, –1075 и –1390 м в ходовом отделении ствола ортогонально для определения горизонтальных и вертикальных деформаций. В местах установки станций были произведены измерения действующих напряжений в крепи ствола методом щелевой разгрузки. В данное время на этих базах производятся измерения изменения НДС во времени с периодичностью раз в четыре месяца.

В результате длительного геодеформационного мониторинга в крепи ствола шахты «Клетевая» были зафиксированы изменения напряжений во времени [13]. Величины полученных изменений приведены на рис. 4.

Область применения результатов. Практическое применение результатов исследования представляется в использовании выявленных закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния бетонной крепи стволов Донского и Гайского ГОКов при расчетах их дальнейшей устойчивости на весь период эксплуатации. Результаты также могут быть использованы для рас-

чета устойчивости стволов на других подземных рудниках с идентичными горно-геологическими условиями.

Заключение. На основании проведенного комплекса исследований по определению состояния устойчивости бетонной крепи строящихся и действующих стволов Донского и Гайского ГОКов можно сделать следующие выводы.

Таблица 3. Результаты измерения деформаций бетонной крепи ствола шахты «Клетевая» на базе 70 мм

Table 3. Deformation measurement results in concrete support of Kletevaia mine shaft on a 70 mm base

Станция	Деформация, мм	
	до разгрузки	после разгрузки
1-я (гор. -830 м)	0,89	0,93
2-я (гор. -910 м)	0,61	0,65
3-я (гор. -990 м)	1,63	1,64
4-я (гор. -1075 м)	1,10	1,12
5-я (гор. -1390 м)	Верх кольца 0,88	Верх кольца 0,89
6-я (гор. -1390 м)	Низ кольца 0,66	Низ кольца 0,68

Горно-геологические условия группы стволов шахт «Центральная» и «Молодежная» относятся к крайне сложным, не имеющим аналогов в отечественной практике. Проходка стволов в сложных горно-геологических условиях сопровождалась большим количеством вывалообразований, интенсивность которых резко увеличилась с глубин 500–600 м.

Прочность бетонной крепи строящихся стволов подземных рудников в основном соответствует проектной марке и во многих случаях превышает ее.

Таблица 4. Результаты измерения напряжений в бетонной крепи ствола методом щелевой разгрузки, МПа

Table 4. Stress measurement results in shaft concrete support using the method of slot relief

1-я станция (гор. -830 м)	2-я станция (гор. -910 м)	3-я станция (гор. -990 м)	4-я станция (гор. -1075 м)	5-я станция (гор. -1390 м)	6-я станция (гор. -1390 м)
-2,90	-2,90	-0,72	-1,40	-0,72	-1,40

Для определения фактических напряжений в бетонной крепи стволов впервые в отечественной практике применен модернизированный метод щелевой разгрузки, разработанный Институтом горного дела.

На основании результатов измерений установлено, что неравномерность распределения напряжений в крепи по периметру ствола обусловлена анизотропией поля напряжений в массиве горных пород.

Максимальные сжимающие напряжения в крепи стволов шахты «Центральная» действуют по азимуту 55°, что хорошо согласуется с напряжениями, действующими в массиве горных пород, и подтверждается положением зон с максимальными вывалообразованиями.

Максимальные напряжения в крепи стволов до глубины 450–600 м не превышают 10 МПа, но с увеличением глубины резко возрастают, примерно в 2 раза. На глубине 700–750 м максимальные напряжения могут достигать величины 30–35 МПа, что соответствует пределу прочности бетона, но выше нормативной прочности.

Катастрофические явления в стволях Донского ГОКа обусловили проведение долговременного комплекса исследований по определению параметров НДС и

устойчивости стволов на подземных рудниках Гайского ГОКа с целью прогноза и предупреждения негативных явлений. Таким образом, напряженное состояние бетонной крепи шахтных стволов формируется как функция конструктивных параметров ствола, полного тензора гравитационно-тектонических напряжений и переменных во времени, действующих в массиве горных пород на момент начала исследований. Обязателен также учет физико-механических свойств породного массива, модуля упругости бетона, который зависит от скорости уходки и дополнительных напряжений, обусловленных вне зоны влияния горных работ циклическим изменением природных напряжений, а в зоне влияния выработанного пространства – изменением вторичного поля напряжений.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН, проект № 18-5-5-51.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Влох Н. П., Зубков А. В., Феклистов Ю. Г. Совершенствование метода щелевой разгрузки // Диагностика напряженного состояния породных массивов. Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1980. С. 30–35.
2. Влох Н. П. Метод частичной разгрузки на большой базе // Диагностика напряженного состояния породных массивов. Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1980. С. 37–42.
3. Зубков А. В., Зубков Ю. М. Модуль деформации массива горных пород – функция рангов слагающих ее блоков // Геомеханика и напряженное состояние земных недр: матер. Междунар. конф. (Новосибирск, 4–7 октября 1999 г.). Новосибирск, 1999. С. 65–70.
4. Brown E. T. Trends in relation between measured in situ stresses with depth // Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. 1978. Vol. 15. No. 4. P. 211–215.
5. Kanagawa T. In situ stress measurements in the Japanese Island, over–coreing results from a multielement gauge used at 23 sites // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstract. 1986. Vol. 23. No. 1. P. 29–39.
6. Lean J. L. Cycles and trends in solar irradiance and climate // John Wiley & Sons. Ltd. Climat change. 2010. Vol. 1. No. 1. P. 111–122.
7. Sugawara K. Measuring rock stress and rock engineering in Japan // Proc. Int. Symp. Rock Stress, Kumamoto: Department of Civil Engineering and Architecture, Japan. Balkema: S.n., 1997. Vol. 15–24. No. 1. P. 473.
8. Бетоны. Методы определения прочности на сжатие и растяжение: ГОСТ 10180-76. М.: Госкомстройиздат, 1982. 23 с.
9. Смирнов О. Ю. Отработка рудных месторождений в условиях повышенной напряженности // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 7. С. 29–35.
10. Зубков А. В. Закономерности формирования напряженного состояния массива горных пород в верхней части земной коры // Литосфера. 2015. № 6. С. 116–129.
11. Озорнин И. Л., Боликов В. Е. Мониторинг деформационных процессов в условиях вторичного структурирования приконтурного массива подземных сооружений // Проблемы недропользования. 2017. № 4. С. 81–88.
12. Сентябов С. В. Учет иерархической блочности массива при решении геомеханических задач // ГИАБ. 2017. № 10. С. 161–166.
13. Сентябов С. В. Исследование и прогноз изменения напряженно-деформированного состояния крепи шахтных стволов на Гайском руднике // ГИАБ. 2018. № 10. С. 79–85.

Поступила в редакцию 27 декабря 2018 года

Сведения об авторах:

Зубков Альберт Васильевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории геодинамики и горного давления Института горного дела УрО РАН. E-mail: sentyabov1989@mail.ru

Феклистов Юрий Георгиевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геодинамики и горного давления Института горного дела УрО РАН. E-mail: feklistov@igduran.ru

Сентябов Сергей Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геодинамики и горного давления Института горного дела УрО РАН. E-mail: sentyabov1989@mail.ru

Special characteristics of stress-strain state development in a concrete support of Donskoy and Gaisky GOKs shafts

Albert V. Zubkov¹, Iurii G. Feklistov¹, Sergei V. Sentiabov¹

¹ Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Research aims to examine the stress-strain state (SSS) in Donskoy and Gaisky GOKs shafts concrete support. Donskoy GOK experienced spontaneous destruction of shafts support in the early 1980s. The largest rock inrushes were recorded in the skip-cage and cage shafts of mine Tsentralnaia with 4 examined shafts, and 2 shafts at mine Molodezhnaya. To forecast the stability of shafts and prevent emergency, support SSS development has been examined since 2013 at Gaisky GOK.

Research methodology. Shaft stability problem has conditioned the need to solve the task of SSS level determination together with strength characteristics in a concrete support. For the first time in national practice, the parameters of shaft support SSS and their variation monitoring have been determined through slot stress relief – an advanced method of measuring relief strains. Laboratory study and analytical simulation methods were also used.

Results analysis. It has been determined that SSS irregular distribution in the support around the shaft perimeter is conditioned by stress field anisotropy in the rock mass. At the same time, the position of the zones with the largest inrush agrees well with the maximum compressive stresses acting in the support and in the surrounding rock mass.

Conclusions. It is proposed to use the main identified provisions in practice, namely: the stress state of mine shaft supports is formed as a function of their design parameters, the total tensor of gravitational-tectonic stresses acting in the rock mass at the time of the start of research and time variables determined by natural and analytical methods. It is also necessary to take into account the physical and mechanical properties of the rock mass and concrete of the support.

Key words: concrete support of shafts; stress-strain state; inrush; stability; slot relief; relief strain; physical and mechanical properties.

Acknowledgements: the research has been carried out under UB RAS Program for basic research, project no. 18-5-5-51.

REFERENCES

1. Vlokh N. P., Zubkov A. V., Feklistov Iu. G. Improving the method of slot relief. In: *Diagnostics of the stress state of rock masses*. Novosibirsk: IM SB AS USSR Publishing; 1980. p. 30–35. (In Russ.)
2. Vlokh N. P. The method of partial relief on a large base. In: *Diagnostics of the stress state of rock masses*. Novosibirsk: IM SB AS USSR Publishing; 1980. p. 37–42. (In Russ.)
3. Zubkov A. V., Zubkov Iu. M. The modulus of rock mass deformation is a function of the ranks of the blocks composing it. In: *Geomechanics and stress state of the earth's interior: International Conference Proceedings*. Novosibirsk, October 4–7, 1999. Novosibirsk; 1999. p. 65–70. (In Russ.)
4. Brown E. T. Trends in relation between measured in situ stresses with depth. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.* 1978; 15 (4): 211–215.
5. Kanagawa T. In situ stress measurements in the Japanese Island, over-coring results from a multielement gauge used at 23 sites. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 1986; 23 (1): 29–39.
6. Lean J. L. Cycles and trends in solar irradiance and climate. *John Wiley&Sons. Ltd. Climat change*. 2010; 1 (1): 111–122.
7. Sugawara K. Measuring rock stress and rock engineering in Japan. In: *Proceedings Int. symp. Rock stress, Kumamoto: Department of Civil Engineering and Architecture, Japan*. Balkema: S.n. 1997; 15–24 (1). p. 473.
8. *Concrete. Methods for determining the compressive and tensile strength: GOST 10180-76*. Moscow: Goskomstroyizdat Publishing; 1982. (In Russ.)
9. Smirnov O. Iu. Ore deposits development in conditions of higher stress. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2017; 7: 29–35. (In Russ.)
10. Zubkov A. V. The regularities of rock mass stressed state formation in the upper part of the Earth crust. *Litosfera = Lithosphere*. 2015; 6: 116–129. (In Russ.)
11. Ozorin I. L., Bolikov V. E. Monitoring of deformational processes in the conditions of secondary structurization of underground structures near-outline rock mass. *Problemy nedropolzovaniia = The Problems of Subsoil Use*. 2017; 4: 81–88. (In Russ.)

12. Sentiabov S. V. Taking into account hierarchical block structure of rock mass when solving geomechanical problems. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2017; 10: 161–166. (In Russ.)
13. Sentiabov S. V. Analysis and prediction of change in stress state of shaft lining in Gaisky Mine. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2018; 10: 79–85. (In Russ.)

Received 27 December, 2018

Information about authors:

Albert V. Zubkov – DSc (Engineering), chief researcher, Institute of Mining UB RAS.
E-mail: sentyabov1989@mail.ru

Iurii G. Feklistov – PhD (Engineering), senior researcher, Institute of Mining UB RAS.
E-mail: feklistov@igduran.ru

Sergei V. Sentiabov – PhD (Engineering), senior researcher, Institute of Mining UB RAS.
E-mail: sentyabov1989@mail.ru

Для цитирования: Зубков А. В., Феклистов Ю. Г., Сентябов С. В. Особенности формирования напряженно-деформированного состояния в бетонной крепи стволов Донского и Гайского ГОКов // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 4. С. 12–23. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-12-23

For citation: Zubkov A. V., Feklistov Yu. G., Sentiabov S. V. Special characteristics of stress-strain state development in a concrete support of Donskoy and Gaisky GOKs shafts. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 4: 12–23 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-12-23

Проектирование универсальной измерительно-аналитической платформы для исследования состояния породного массива

Константинов А. В.^{1*}, Гладырь А. В.¹

¹ Институт горного дела ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия

*e-mail: alex-sdt@yandex.ru

Реферат

Введение. В настоящее время все более актуальной становится разработка геоакустических сигнальных систем безопасности ввиду увеличивающегося объема добывчных участков на рудниках и высоких скоростей ведения горнодобывающих работ. К таким системам относятся средства локального контроля ударопасности на базе программно-аппаратных средств с использованием геоакустических методов.

Цель работы. Усовершенствование ряда характеристик используемого прибора локального контроля ударопасности «*Prognoz L*». Предлагаемый подход к проектированию должен предоставлять возможность локации сигналов акустической эмиссии, более широкий спектр рабочих частот и увеличение зоны контроля приконтурного массива. В качестве дополнительных преимуществ предполагается повысить комфорт использования прибора в процессе взаимодействия с графическим интерфейсом, предоставив множество новых функций.

Методология. В работе рассматриваются проектные решения по разработке универсальной измерительно-аналитической платформы для исследования состояния горного массива. Разрабатываемое устройство позиционируется как замена хорошо зарекомендовавшего себя прибора локального контроля ударопасности «*Prognoz L*», наследующее и расширяющее его функциональные возможности. Создание новой платформы обусловлено рядом ограничений оригинального прибора, построенного на базе микроконтроллера семейства STM32, использующего вычислительное ядро с архитектурой ARM.

Результаты. В рассматриваемом подходе к проектированию прибора локального контроля ударопасности выделяются конструктивная, аппаратная и программная части, каждая из которых является независимой и может быть усовершенствована без необходимости внесения изменений в другие части.

Выходы. Применение указанного подхода позволит определять источник акустической эмиссии, повысить эффективность проводимых измерений и снизить трудоемкость процесса внедрения и усовершенствования отдельных компонентов разработанной системы.

Ключевые слова: породный массив; ударопасное состояние; локальный контроль; акустическая эмиссия; локация; геомеханический мониторинг.

Введение. Ввиду увеличивающихся объемов выработанных пространств и темпов горных работ как на подземных рудниках, так и при ведении открытых горных работ все большую актуальность приобретает разработка геофизических систем безопасности [1–4]. В качестве основных преимуществ таких систем можно отметить отсутствие требования нарушения сплошности горного массива, а также низкую трудоемкость и высокую оперативность [5]. Оценка состояния горного массива осуществляется при помощи регистрации параметров, отражающих геомеханические процессы при ведении горных работ, с последующей обработкой и интерпретацией полученных данных. Такие средства позволяют эффективно использовать их в динамично развивающихся природно-технических системах.

Для реализации локальных экспресс-методов в России создан широкий набор технических средств, среди которых важное место занимают переносные одно-

или двухканальные регистраторы геоакустической информации ЗУА, ПГМ, «Волна-1», «Прогноз-Иа», «Ритм», «АЭР», «Ангел» и др. С их помощью можно определять лишь ограниченное число параметров регистрируемых сигналов, чаще регистрируется только интенсивность следования импульсов акустической эмиссии (количество импульсов в единицу времени). Однако эти приборы характеризуются относительной простотой и мобильностью, что особенно важно для контроля призабойной части выработок в процессе проведения горнокапитальных и горноподготовительных работ.

Среди приборов локального контроля также можно выделить прибор «Pocket AE-2», представляющий собой компактный двухканальный инструмент для испытаний методом акустической эмиссии (АЭ), созданный на базе карманного компьютера. Благодаря малым размерам и полному набору возможностей по регистрации и обработке АЭ, система может использоваться для любых локальных и удаленных приложений. Она выполняет традиционное измерение параметров АЭ на базе сигнального процессора, а также регистрацию и обработку волновых форм. Текстовые и графические результаты отображаются на жидкокристаллическом цветном дисплее Quarter-VGA (240 x 320 пикселей). Файлы данных АЭ сохраняются в традиционных форматах РАС на картах Compact Flash и могут быть переданы на сторонний компьютер как с помощью карт, так и пошине USB для дальнейшего анализа с помощью программ AEwin и NOESIS [6].

К недостаткам данного прибора следует отнести отсутствие встроенных алгоритмов и методов контроля удароопасного состояния горного массива [7, 8], что весьма затрудняет его применение для решения задач геомеханического мониторинга.

Перспективным подходом к оценке состояния горного массива является локальный контроль удароопасности с использованием геоакустических программино-аппаратных комплексов. Данное направление активно развивается в ряде научных учреждений, включая Институт горного дела ДВО РАН.

Обзор применяемых средств. В настоящее время на ряде рудников России применяются различные портативные регистраторы, в том числе прибор локального контроля горного давления «Prognoz L», сочетающий в себе современные технические средства и гибкое программное обеспечение.

С целью определения степени удароопасности аналитическим программным обеспечением прибора локального контроля используются следующие критерии: средняя интенсивность сигналов акустической эмиссии, показатель амплитудного распределения и т. д. Практическое использование и лабораторные испытания прибора локального контроля показали достаточную точность и адекватность оценки категории удароопасности, соответствующей начальному моменту разрушения для крепких вмещающих пород, а гибкость настройки параметров расчета позволяет проводить корректировку аналитических алгоритмов с учетом особенностей практических любого горного предприятия.

Следует отметить, что заложенная разработчиками данного прибора гибкость программного обеспечения позволяет использовать дополнительные методы анализа и обработки результатов мониторинга состояния горного массива.

В результате проведенных испытаний портативного прибора «Prognoz L» в горных выработках ряда рудников России [10]:

- получены результаты подробного анализа волновых форм сигналов и трендов спектрально-энергетических параметров акустической эмиссии для широкого диапазона горно-геологических условий проявления горного давления;

- сформулирована качественная модель геоакустических явлений на участках рудника ОКР;

– проведена классификация сигналов акустической эмиссии по спектральному составу и формам корреляторов, определяющих их принадлежность к определенному типу источника [10, 11];

– развивается современный алгоритм обработки и анализа потока информации, основанный на концепции распознавания образов; в основе алгоритма – спектрально-корреляционный анализ случайных процессов и теория искусственных нейронных сетей [12–14].

Разработанный прибор обладает неоспоримыми преимуществами, к числу которых относятся:

– малый вес и компактные габаритные характеристики, позволяющие оперативно осуществлять транспортировку и проводить необходимые измерения;

– наличие графического дисплея, позволяющего с достаточным комфортом и приемлемой информативностью проводить настройку параметров работы встроенного программного обеспечения, анализировать результаты измерений и т. д.

Следует отметить, что более чем двухлетний опыт эксплуатации «Prognoz L» на различных промышленных объектах, соотнесенный с анализом современного уровня методических и технических решений в области создания и использования систем геомеханического контроля, позволил выявить следующие тенденции их развития и совершенствования:

– наблюдается стремление адаптации систем геоконтроля к конкретным объектам, выражющееся в индивидуальном исполнении и комплектации технических средств;

– современные системы геоконтроля создаются в виде открытой информационно-измерительной системы, позволяющей оперативно модернизировать применяемые аналитические методы и средства и гибко подстраиваться под постоянно меняющиеся условия;

– все большее внимание уделяется совершенствованию соответствующего интерфейса программных средств, средств обработки, интерпретации и представления данных, с помощью которых осуществляются работоспособность системы геоконтроля и ее управление;

– расширяется использование аналого-цифровых методов обработки случайных процессов, в том числе фильтрации, спектрального анализа, многомерного корреляционного анализа;

– повышение надежности и достоверности информации о состоянии массива обеспечивается интегрированием математических моделей (волновых, статистических, вероятностных и других) для описания поведения массива и механизмов разрушения его элементов;

– задачи прогноза горных ударов решаются преимущественно на основе повышения достоверности измерений местоположения и энергии источников событий, анализа форм принимаемых сигналов, сочетания активных и пассивных методов диагностики массива горных пород.

Таким образом, требования к модернизации программно-аппаратной части данного прибора и разработке расширенной его версии можно условно разделить на три группы:

- конструктивные улучшения;
- улучшения программной части;
- усовершенствование аппаратной части.

Конструктивные особенности разрабатываемого прибора. В качестве конструктивных улучшений предлагается использование сенсорного экрана как основного средства управления прибором с сохранением механических клавиш в качестве вспомогательных. За данными клавишами следует закрепить наиболее востребованные команды управления встроенным программным обеспечением,

а также кнопки включения и выключения прибора. Также по причине использования прибора в условиях слабой освещенности целесообразно оснащение дополнительной подсветкой.

Предлагается разработать и реализовать систему электропитания с дублированием питающих элементов с возможностью оперативной «горячей» замены элементов питания прибора для решения задачи обеспечения непрерывности процесса измерения в течение рабочей смены.

Поскольку большую часть времени предполагается использовать прибор в агрессивных климатических условиях, в условиях повышенной влажности и запыленности, следует предусмотреть защиту данного прибора от внешних воздействий не ниже IP65. При этом в качестве обязательного условия должны быть предусмотрены герметичные заглушки для всех внешних интерфейсов. Чтобы обеспечить повышенную степень защищенности в процессе взаимодействия с внешними устройствами и во время зарядки аккумуляторов предлагается, по возможности, использовать беспроводные технологии.

Вычислительным ядром используемого в настоящее время прибора «Prognоз L» является микроконтроллер семейства STM32, что позволяет реализовать высокое быстродействие встроенных математических алгоритмов. К его основным недостаткам относится необходимость аппаратного перепрограммирования каждого экземпляра прибора при внесении изменений в код управляющей программы и практическая сложность разработки и модернизации управляющей программы.

Для достижения определенного баланса быстродействия и эффективности практического использования оборудования целесообразно применение энергоэффективных SoC модулей, например неттопа Intel Compute Stick [BLKSTK2m364CC] на базе процессора с архитектурой x64.

Улучшение программной части. В качестве операционной системы предлагается использовать Windows 10 IoT Enterprise – продукт компании Microsoft, выполненный на ядре Windows 10.

Поскольку основное предназначение данной системы — это использование в составе промышленных устройств: киоски, банкоматы, тонкие клиенты, POS-системы, медицинские системы, информационные табло и т. п., использование Windows 10 IoT Enterprise на встраиваемых системах обеспечивает стабильную и предсказуемую работу устройств в течение долгосрочного периода. Высокая востребованность среди разработчиков программного обеспечения и пользователей, дружелюбный графический интерфейс и широкие возможности по встраиванию (блокировка устройства, фильтры записи, блокировка всплывающих уведомлений и т. д.) позволяют на порядок сократить время и стоимость разработки специализированного программного обеспечения для регистрации, визуализации и анализа за счет применения развитых средств быстрой разработки программного обеспечения и использования разработанных сторонними производителями модулей и библиотек, в том числе входящих в наиболее распространенные пакеты математического анализа, например MatLab. Данный подход позволит снизить трудоемкость процесса внедрения и тестирования различных алгоритмов [15, 16].

Отметим, что применение полноценной операционной системы с развитым графическим интерфейсом позволит оснастить обновленный прибор дополнительным программным обеспечением.

В качестве дополнительного программного обеспечения рекомендуется применение:

- справочных баз данных;
- графических изображений планов подземных горизонтов горного предприятия;

– программных средств формирования отчетной документации по результатам проведенных измерений;

– автоматически пополняемой базы данных протоколов проводимых измерений.

Усовершенствование аппаратной части. Особое внимание при формировании требований по совершенствованию прибора локального контроля следует уделить техническим возможностям ввода аналоговой информации. В настоящее время возможна обработка одного канала аналоговых данных с частотой 100 кГц и разрешающей способностью 16 бит при отсутствии возможности локации источника акустической эмиссии в массиве. Опыт практического использования прибора локального контроля выявил потребность в линейной, а впоследствии плоской и объемной локаций сигналов.

Таблица 1. Сравнительная характеристика приборов
Table 1. Comparative characteristics of devices

Показатель	Prognoz L	Prognoz L Pro
Количество каналов аналоговых данных	1	До 8
Максимальная частота оцифровки на канал	100 кГц	750 кГц (4 канала) 375 кГц (8 каналов)
Разрешающая способность	16 бит	14 бит
Возможность локации источника акустической эмиссии в массиве	Нет	Присутствует

Для решения указанной задачи предлагается использовать промышленные модули аналого-цифрового преобразования, разработанные научно-производственной группой «Р-Технологии». В качестве аналого-цифрового преобразователя (АЦП) выбран RT USB3000, который представляет собой компактный универсальный 8-канальный АЦП, подключаемый к компьютеру по интерфейсу USB 2.0, оснащенный дополнительными входными и выходными цифровыми линиями и двухканальным цифро-аналоговым преобразователем.

Таблица 2. Рекомендуемые виды датчиков
Table 2. Recommended sensor types

Характеристика	GT250	GT350
Тип датчика	Низкочастотный с усилителем	Широкополосный с усилителем
Коэффициент электроакустического преобразования, дБ отн. 1В/м·с	Менее 90	Менее 75
Рабочая частота, кГц	50	120
Полоса пропускания, кГц	40–100 кГц	100–800 кГц
Коэффициент усиления	10	10

Схемотехническое исполнение входных каскадов обеспечивает:

– высокоточные измерения независимо от выходного сопротивления источников сигналов;

– возможность измерения высоковольтных сигналов напрямую через резистивные делители;

– низкое межканальное прохождение и отсутствие коммутационных шумов;
– высокий входной импеданс всех каналов при любом режиме работы.

Отметим, что при одновременном использовании четырех каналов аналого-цифрового преобразования максимальная частота оцифровки составляет 750 кГц на канал, а при использовании восьми каналов – 375 кГц, что значительно превышает существующие в настоящее время возможности прибора локального кон-

троля [17]. Сравнительная характеристика существующего и проектируемого приборов представлена в табл. 1.

Использование одновременно четырех и более каналов ввода аналоговой информации от приемников акустической эмиссии позволит в дальнейшем проводить локацию источников АЭ на плоскости и в объеме после разработки соответствующего программного обеспечения.



Рис. 1. Преобразователи акустической эмиссии со встроенной электроникой:
а – GT250; б – GT350; в – высокочувствительный вибропреобразователь AP2099-1000

Fig. 1. Acoustic emission transducers with integrated electronics:
a – GT250; b – GT350; c – highly sensitive vibration transducer AP2099-100 (left-to-right)

В зависимости от применяемых режимов измерения для использования в многоканальном приборе локального контроля удароопасности допускается применение разнообразных первичных преобразователей физических величин (датчиков), различающихся по типу, наличию встроенной электроники и характеристикам (табл. 2, рис. 1).

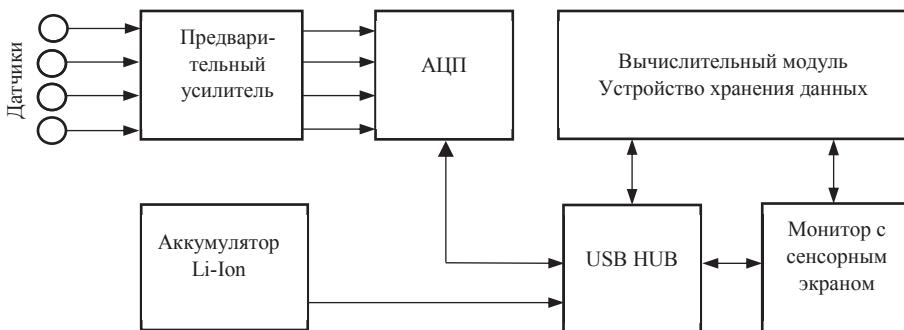


Рис. 2. Структурная схема многоканального прибора локального контроля удароопасности

Fig. 2. Rockburst hazard local control multichannel device block diagram

Возможность применения широкого спектра первичных преобразователей подразумевает разработку специализированного предварительного усилителя, совмещающего в себе функции блока питания датчика и усилителя сигнала для обеспечения согласования уровней на выходе датчика и входе модуля аналого-цифрового преобразования с возможностью программного изменения коэффициента усиления для обеспечения наиболее широкого динамического диапазона измерений. Для управления усилителем целесообразно использовать цифровые выходы модуля аналого-цифрового преобразования RT USB3000.

Структурная схема разрабатываемого многоканального прибора локального контроля удароопасности представлена на рис. 2.

Натурные испытания опытного макета универсальной платформы. На территории рудника «Николаевский» ГМК «Дальполиметалл» в сентябре-

октябре 2018 г. проводились натурные испытания опытной геоакустической четырехканальной системы с автономным электропитанием.

Испытания включали следующие основные этапы:

- монтаж первичных преобразователей в горных выработках;
- оптимизацию настроек и отработку критерии удароопасного состояния краевых участков горного массива;
- определение информативного частотного диапазона полезных сигналов акустической эмиссии;
- длительную запись сигналов технологических шумов и естественной акустической эмиссии;
- отработку различных схем установки первичных преобразователей в горных выработках и способов крепления на поверхности горной породы.

Заключение. Применение современных подходов позволяет получить более совершенный прибор для осуществления локального контроля удароопасности в массиве горных пород, предоставив его пользователям множество новых функций для применения в полевых условиях, а также удобство и комфорт в процессе использования. Подобный подход к проектированию портативного прибора позволит его разработчикам более быстро внедрять передовые средства, направленные на осуществление локального контроля удароопасности, исправлять ошибки программного обеспечения и улучшать технические характеристики прибора. Таким образом, совокупность предложенных средств является важным и необходимым этапом развития геоакустических средств локального контроля удароопасности в массиве горных пород.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рассказов И. Ю. Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона. М.: Горная книга, 2008.
2. Рассказов И. Ю., Саксин Б. Г., Петров В. А., Просекин Б. А. Геомеханические условия и особенности динамических проявлений горного давления на месторождении Антей // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2012. № 3. С. 3–13.
3. Чебан А. Ю. Совершенствование техники и технологий безвзрывной разработки горных пород: монограф. Хабаровск: ИГД ДВО РАН, 2017. 260 с.
4. Чебан А. Ю. Способ доработки глубокого карьера с применением фрезерных машин // Маркшейдерия и недропользование. 2017. № 4. С. 23–29.
5. Гладырь А. В. Система интеграции микросейсмических и геоакустических данных геомеханического контроля // ГИАБ. 2017. № 6. С. 220–234.
6. Шемякин В. В., Стрижков С. А. Аспекты применения метода акустической эмиссии для мониторинга опасных промышленных объектов // Общие вопросы химической технологии. 2005. № 7. С. 23–26.
7. Баранов С. В. Автоматическое определение длительности сейсмического события в режиме реального времени: сб. статей. М., 2004. № 3.
8. Красовский А. А. Цифровая обработка в zetlab при идентификации параметров сейсмического сигнала // Цифровая обработка сигналов. № 3. С. 70–76.
9. Терешкин А. А., Мигунов Д. С., Аникин П. А., Гладырь А. В., Рассказов М. И. Оценка геомеханического состояния удароопасного массива горных пород по данным локального геоакустического контроля // Проблемы недропользования. 2017. № 1 (12). С. 72–80.
10. Розанов А. О., Цирель С. В. Разработка подхода к решению динамической задачи развития очага разрушения с использованием данных сейсмоакустического мониторинга: мат. VI Всерос. науч. конф. с участием иностранных ученых. Хабаровск, 2017. С. 74–80.
11. Rozanov A. O., Zang A., Wagner C., Dresen G. Acoustic frequency signatures of laboratory fractured rocks. 63rd Conference, European Association of Geoscientists and Engineers, Extended Abstracts, paper P036, 2001.
12. Reches Z., Lockner D. A. Nucleation and growth of faults in brittle rocks // J. Geophys Res. 1994. No. 99. P. 159–174.
13. Backers T., Stephansson O., Rybacki E. Fractography of rock from the new Punch-Through Shear Test // International Conference on Structural Integrity and Fracture (Perth, Australia). 2002. No. 39. P. 755.
14. Rozanov A. O. Microseismic event spectrum control and strain energy release in stressed rocks // GEO 2012 10th Middle East Geosciences Conference & Exhibition. 2012. No. 40897.

15. Backers T., Stanchits S., Dresen G. Tensile fracture propagation and acoustic emission activity in sandstone: The effect of loading rate // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2005. Vol. 7–8. No. 42. P. 1094–1101.
16. Rozanov A. O. Ultrasonic conductivity increase as a precursor of fracture process in rocks // 75th EAGE Conference and Exhibition Incorporating Spe Europeec. 2013. No. 17671. P. 6276–6280.
17. Рассказов И. Ю., Мигунов Д. С., Аникин П. А., Гладырь А. В., Терешкин А. А., Желнин Д. О. Геоакустический портативный прибор нового поколения для оценки удароопасности массива горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. № 3. С. 169–179.

Поступила в редакцию 13 февраля 2019 года

Сведения об авторах:

Константинов Александр Викторович – младший научный сотрудник лаборатории геомеханики Института горного дела ДВО РАН. E-mail: alex-sdt@yandex.ru
Гладырь Андрей Владимирович – старший научный сотрудник лаборатории горной геофизики Института горного дела ДВО РАН. E-mail: rush3112@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-24-32

Designing universal measuring and analytical platform to investigate the state of rock massif

Aleksandr V. Konstantinov¹, Andrei V. Gladyr¹

¹ Mining Institute FEB RAS, Khabarovsk, Russia.

Abstract

Introduction. At the present time, the development of geoacoustic signalling safety systems becomes more relevant due to larger production units at mines and higher speed of mining. Such systems include instruments for rockburst hazard assessment based on computer appliance with the use of geoacoustic methods.

Research aim is to develop a range of characteristics of the existing equipment for local monitoring of rockburst hazard Prognoz L. The approach considered in the work should allow locating the sources of acoustic emission, provide wider range of working frequencies, and enlarge marginal massif control zone. As an additional advantage, it is suggested to increase comfort of use while interacting with the graphical user interface providing many additional features.

Methodology. The present research considers design solutions over the creation of universal measuring and analytical platform for rock mass investigation. The device under consideration is introduced as a substitution for the well-proven Prognoz L local control device, inheriting and enlarging its functions. New platform creation is conditioned by a number of limitations of an original device built on the basis of a microcontroller from the STM32 family using a processor core with ARM architecture.

Results. The considered approach to the design of a rockburst hazard local control device, structural, hardware, and software parts are distinguished, each of them being independent and able to be improved with no need to change other parts.

Conclusions. The use of this approach will allow to define the sources of acoustic emission, increase the effectiveness of measurements reducing the laboriousness of the process of developing and introducing new techniques.

Key words: rock massif; rockburst hazard; local control; acoustic emission; event location; geomechanical monitoring.

REFERENCES

1. Rasskazov I. Yu. *Rock pressure monitor and control at Far East mines*. Moscow: Gornaia kniga Publishing; 2008. (In Russ.)
2. Rasskazov I. Yu., Saksin B. G., Petrov V. A., Prosekin B. A. Geomechanics and seismicity of the antey deposit rock mass. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh = Journal of Mining Science*. 2012; 3: 3–13. (In Russ.)
3. Cheban A. Yu. *Improving equipment and technology of blastless rock development: monograph*. Khabarovsk: IM FEB RAS Publishing; 2017. (In Russ.)
4. Cheban A. Yu. Method of developing deep-career with application of milling machines. *Marksheideria i nedropolzovanie = Mine Surveying and Subsurface Use*. 2017; 4: 23–29. (In Russ.)
5. Gladyr A. V. Integration of microseismic and geoacoustic data of geomechanical monitoring. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2017; 6: 220–234. (In Russ.)

6. Shemiakin V. V., Strizhkov S. A. Aspects of applying the method of acoustic emission to monitor hazardous industrial facilities. *Obshchie voprosy khimicheskoi tekhnologii = General Issues of Chemical Engineering*. 2005; 7: 23–26. (In Russ.)
7. Baranov S. V. *Automatic detection of seismic event duration in real time: collected works*. Moscow; 2004; 3. (In Russ.)
8. Krasovskii A. A. Digital processing in zetlab with seismic signal parameter identification. *Tsifrovaia obrabotka signalov = Digital Signal Processing*. 3; 70–76. (In Russ.)
9. Tereshkin A. A., Migunov D. S., Anikin P. A., Gladyr A. V., Rasskazov M. I. Evaluation geo-mechanical dangerous rock mass state according to local control geoacoustic data. *Problemy nedropolzovaniia = The Problems of Subsoil Use*. 2017; 1 (12): 72–80. (In Russ.)
10. Rozanov A. O., Tsirel S. V. *Developing the approach to solve the dynamic task on the development of the seat of disturbance with the use of seismoacoustic monitoring data: Proceedings of 6th All-Russian conference with foreign scientists*. Khabarovsk. 2017; 74–80. (In Russ.)
11. Rozanov A. O., Zang A., Wagner C., Dresen G. *Acoustic Frequency Signatures of Laboratory Fractured Rocks. 63rd Conference, European Association of Geoscientists and Engineers, Extended Abstracts, paper P036, 2001*.
12. Reches Z., Lockner D. A. Nucleation and growth of faults in brittle rocks. *J. Geophys Res.* 1994; 99: 18,159–18,174.
13. Backers T., Stephansson O., Rybacki E. Fractography of rock from the new Punch-Through Shear Test. In: *International Conference on Structural Integrity and Fracture (Perth, Australia)*. 2002; 39: 755.
14. Rozanov A. O. Microseismic Event Spectrum Control and Strain Energy Release in Stressed Rocks. *GEO 2012 10th Middle East Geosciences Conference & Exhibition*. 2012; 40897.
15. Backers T., Stanchits S., Dresen G. Tensile fracture propagation and acoustic emission activity in sandstone: The effect of loading rate. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2005; 42 (7–8): 1094–1101.
16. Rozanov A. O. Ultrasonic conductivity increase as a precursor of fracture process in rocks. *75th EAGE Conference and Exhibition Incorporating Spe Europe*. 2013; 17671: 6276–6280.
17. Rasskazov I. Yu., Migunov D. S., Anikin P. A., Gladyr A. V., Tereshkin A. A., Zhelnin D. O. New-generation portable geoacoustic instrument for rockburst hazard assessment. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 2015; 3: 169–179. (In Russ.)

Received 13 February, 2019

Information about authors:

Aleksandr V. Konstantinov – junior researcher, Laboratory of Geomechanics, Institute of Mining FEB RAS. E-mail: alex-sdt@yandex.ru

Andrei V. Gladyr – senior researcher, Laboratory of Mining Geophysics, Institute of Mining FEB RAS. E-mail: rush3112@mail.ru

Для цитирования: Константинов А. В., Гладырь А. В. Проектирование универсальной измерительно-аналитической платформы для исследования состояния породного массива // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 4. С. 24–32. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-24-32

For citation: Konstantinov A. V., Gladyr A. V. Designing universal measuring and analytical platform to investigate the state of rock massif. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 4: 24–32 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-24-32

Расчет статистических характеристик паспорта прочности горных пород

Гордеев В. А.¹

¹Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

e-mail: gordeev.v@ursmu.ru

Реферат

Введение. При оценке риска в задачах горной геомеханики необходимо учитывать статистические характеристики изменчивости и взаимосвязи физических параметров горных пород – среднеквадратические отклонения и коэффициенты корреляции этих параметров для каждого инженерно-геологического элемента. В расчетах устойчивости карьерных откосов используют параметры паспорта прочности горных пород – сцепление и угол внутреннего трения. Неучет взаимной корреляции между параметрами паспорта прочности приводит к завышению/занизжению погрешностей расчетных показателей – коэффициента устойчивости и геометрических параметров откоса, к занизжению/завышению степени риска.

Цель работы и методология. На основе регрессионного анализа рассмотреть варианты получения элементов корреляционной матрицы для различных способов построения паспорта прочности по результатам лабораторных испытаний образцов – при одноосном сжатии и растяжении и методом одноплоскостного среза.

Результаты. В статье выводятся необходимые формулы для расчета ковариационной матрицы параметров паспорта горных пород. Установлено, что способ расчета ковариационной матрицы зависит от применяемого лабораторного метода испытаний образцов. На примерах показано, что коэффициент корреляции между сцеплением и коэффициентом внутреннего трения может иметь разный знак.

Область применения результатов. Вычисленные по предложенной методике значения статистических характеристик параметров паспорта прочности горных пород могут быть использованы при решении вероятностных задач горной геомеханики.

Ключевые слова: паспорт прочности; сцепление; коэффициент внутреннего трения; испытания образцов; ковариационная матрица; коэффициент корреляции.

Цель работы. Современные способы решения задач горной геомеханики в условиях риска учитывают стохастическую природу физических параметров горных пород, обусловленную их изменчивостью даже в пределах одного инженерно-геологического элемента (ИГЭ). При разработке имитационных методик оценки риска принимают во внимание законы распределения, коэффициенты вариации, среднеквадратические отклонения и другие статистические характеристики показателей свойств горных пород. Одна особенность физических параметров горных пород остается слабо изученной – корреляция (взаимосвязанность). Очевидно, что изменения в структуре и химическом составе породы даже одного типа должны приводить к взаимосвязанным изменениям физических свойств. Однако установить такие связи можно лишь между свойствами (плотность, влажность, пористость, акустические свойства), показатели которых определяются не разрушающими образец (монолит) методами, либо между этими свойствами и одним из показателей прочности.

Особенный интерес представляют параметры паспорта прочности горных пород – сцепление и угол внутреннего трения. Они используются в расчетах устойчивости карьерных откосов. В литературе отмечалось, что неучет взаимной корреляции между параметрами паспорта прочности приводит к завышению

погрешностей расчетных показателей – коэффициента устойчивости откоса, геометрических параметров откоса (предельного угла или предельной высоты) [1, 2]. Предлагались также различные способы учета корреляции – с помощью регрессионного анализа [2] и конфлюентного анализа статистических связей [3].

В лабораторных условиях паспорт прочности строится несколькими методами: по результатам испытаний образцов при одноосном сжатии и растяжении; по результатам испытания грунта методом одноплоскостного среза; по результатам определения предела прочности при срезе со сжатием.

Методика исследований. В статье рассматриваются способы оценки коэффициента корреляции между сцеплением и коэффициентом внутреннего трения по результатам испытаний при одноосном сжатии и растяжении и методом одноплоскостного среза.

ГОСТ 21153.8-88. Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии определяет расчетные процедуры для построения паспорта прочности скальных и полускальных горных пород по данным определения прочности при одноосном сжатии и растяжении. ГОСТ не содержит формул для вычисления сцепления C_0 (предельного сопротивления срезу τ_c при отсутствии нормальных напряжений) и угла внутреннего трения ϕ_0 (или коэффициента внутреннего трения $f_0 = \operatorname{tg}\phi_0$). Кроме того, рекомендуемый расчетный метод табулирован, он громоздкий и неудобный для расчетов на ЭВМ [4].

Из всего многообразия формул горной геомеханики [5, 6] возьмем две формулы, описывающие связи между прочностными характеристиками горных пород [7]:

$$C = \frac{\sqrt{\sigma_p \sigma_{cж}}}{2}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{\sigma_{cж} - \sigma_p}{2\sqrt{\sigma_p \sigma_{cж}}}, \quad (1)$$

где σ_p и $\sigma_{cж}$ – пределы прочности породы соответственно при растяжении и сжатии.

Расчеты по формулам (1) дают результаты, близкие к расчетным значениям C_0 и ϕ_0 , полученным по методике ГОСТ. Например, при $\sigma_p = 10,2$ МПа и $\sigma_{cж} = 78,7$ МПа по методике ГОСТ получим $C_0 = 17$ МПа и $\phi_0 = 49^\circ$, а по формулам (1) $C_0 = 14$ МПа и $\phi_0 = 50^\circ$.

Поставим задачу – по результатам многократных испытаний образцов, выполненных для определения прочности при одноосном сжатии и растяжении, оценить сцепление и угол внутреннего трения (коэффициент внутреннего трения), их природную изменчивость и взаимную корреляцию.

Сцепление и коэффициент внутреннего трения находим по формулам (1), используя среднеарифметические значения пределов прочности при одноосном сжатии и растяжении, полученные по результатам испытаний образцов (m – число испытаний на сжатие, n – число испытаний на растяжение):

$$\sigma_p = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{pi}}{n}; \quad \sigma_{cж} = \frac{\sum_{i=1}^m \sigma_{cжi}}{m}; \quad C = \frac{\sqrt{\sigma_p \sigma_{cж}}}{2}; \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{\sigma_{cж} - \sigma_p}{2\sqrt{\sigma_p \sigma_{cж}}}.$$

Для получения статистических характеристик параметров паспорта прочности – среднеквадратических отклонений и коэффициента корреляции – необходимо рассчитать элементы ковариационной матрицы переменных $y_1 = C$ и $y_2 = \operatorname{tg}\varphi$, являющихся функциями от переменных $x_1 = \sigma_{cж}$ и $x_2 = \sigma_p$ [8]:

$$\mathbf{K}_{C, \text{tg}\varphi} = \mathbf{B} \mathbf{K}_{\sigma_{\text{сж}}, \sigma_p} \mathbf{B}^T = \begin{pmatrix} k_1 & k_{12} \\ k_{12} & k_2 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Элементы матрицы частных производных рассчитаем по формулам:

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \frac{\partial y_1}{\partial x_1} & \frac{\partial y_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial y_2}{\partial x_1} & \frac{\partial y_2}{\partial x_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{\sigma_p}}{4\sqrt{\sigma_{\text{сж}}}} & \frac{\sqrt{\sigma_{\text{сж}}}}{4\sqrt{\sigma_p}} \\ \frac{\sigma_{\text{сж}} + \sigma_p}{4\sigma_{\text{сж}}\sqrt{\sigma_{\text{сж}}\sigma_p}} & -\frac{\sigma_{\text{сж}} + \sigma_p}{4\sigma_p\sqrt{\sigma_{\text{сж}}\sigma_p}} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Ковариационная матрица переменных x_1 и x_2 , в силу независимости результатов испытаний образцов на прочность, имеет вид диагональной матрицы:

$$\mathbf{K}_{\sigma_{\text{сж}}, \sigma_p} = \begin{pmatrix} s_{\sigma_{\text{сж}}}^2 & 0 \\ 0 & s_{\sigma_p}^2 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где $s_{\sigma_{\text{сж}}}$, s_{σ_p} – среднеквадратические отклонения (в обозначениях ГОСТ 20522-2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний) пределов прочности при одноосном сжатии и растяжении, полученные по результатам испытаний образцов:

$$s_{\sigma_{\text{сж}}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (\sigma_{\text{сж}i} - \bar{\sigma}_{\text{сж}})^2}{m-1}; \quad s_{\sigma_p}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_{pi} - \bar{\sigma}_p)^2}{n-1}.$$

Элементы k_1 , k_2 , k_{12} ковариационной матрицы $\mathbf{K}_{C, \text{tg}\varphi}$ используются для расчета среднеквадратических отклонений параметров паспорта прочности:

среднеквадратическое отклонение для сцепления

$$s_C = \sqrt{k_1}; \quad (5)$$

среднеквадратическое отклонение для коэффициента внутреннего трения

$$s_f = \sqrt{k_2}; \quad (6)$$

среднеквадратическое отклонение для угла внутреннего трения

$$s_\varphi = 57,3^\circ \cos^2 \varphi \sqrt{k_2}; \quad (7)$$

коэффициент корреляции между сцеплением и коэффициентом внутреннего трения

$$r_{C,f} = \frac{k_{12}}{\sqrt{k_1 k_2}}. \quad (8)$$

С учетом формул (5)–(8) получим:

$$S_C = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\sigma_p}{\sigma_{cж}} S_{cж}^2 + \frac{\sigma_{cж}}{\sigma_p} S_p^2}; \quad (9)$$

$$S_f(\operatorname{tg}\varphi) = \frac{\sigma_{cж} + \sigma_p}{4} \sqrt{\frac{S_{cж}^2}{\sigma_{cж}^3 \sigma_p} + \frac{S_p^2}{\sigma_{cж} \sigma_p^3}}; \quad (10)$$

$$S_p = 57,3^\circ \cos^2 \varphi \frac{\sigma_{cж} + \sigma_p}{4} \sqrt{\frac{S_{cж}^2}{\sigma_{cж}^3 \sigma_p} + \frac{S_p^2}{\sigma_{cж} \sigma_p^3}}; \quad (11)$$

$$r_{C,f} = \left(\frac{S_{cж}^2}{\sigma_{cж}^2} - \frac{S_p^2}{\sigma_p^2} \right) \Bigg/ \left(\frac{S_{cж}^2}{\sigma_{cж}^2} + \frac{S_p^2}{\sigma_p^2} \right). \quad (12)$$

Рассмотрим пример. В качестве исходных данных примем результаты построения паспорта прочности для пробы № 12 – гранодиорит на месторождении Эрденэтийн-Овоо в Монголии (*Исследование физико-механических свойств горных пород и сейсмических влияний взрывных работ в районе для разработки проекта циклично-поточной технологии (ЦПТ) при транспортировке руды на обогатительную фабрику на руднике открытых работ КОО «Предприятие Эрденэт»: отчет по НИР. Монголия. Исполнитель ИЭЦ ИГД УрО РАН. 2010. 42 с.*):

$$\sigma_{cж} = 109,4 \text{ МПа}; \quad S_{cж} = 37,3 \text{ МПа}; \quad \sigma_p = 10,3 \text{ МПа}; \quad S_p = 2,9 \text{ МПа}.$$

По формулам (2) вычисляем параметры паспорта прочности: $C = 16,8 \text{ МПа}$; $\operatorname{tg}\varphi = 1,476$; $\varphi = 55,9^\circ$. По таблицам ГОСТ получим $C = 19,3 \text{ МПа}$; $\varphi = 53,5^\circ$.

Расчет ковариационной матрицы по формулам (2)–(4):

$$\mathbf{K}_{C, \operatorname{tg}\varphi} = \mathbf{B} \mathbf{K}_{cж, op} \mathbf{B}^T = \begin{pmatrix} 13,77 & 0,2766 \\ 0,2766 & 0,1554 \end{pmatrix}.$$

Статистические характеристики параметров паспорта прочности – по формулам (9)–(12):

$$S_C = 3,71 \text{ МПа}; \quad S_f = 0,394; \quad S_p = 7,1^\circ; \quad r_{C,f} = 0,19.$$

Формулы (9)–(12) можно выразить через коэффициенты вариации:

$$\begin{aligned} S_C &= \frac{\sqrt{\sigma_p \sigma_{cж}}}{4} \sqrt{V_{cж}^2 + V_{op}^2}, \\ S_f &= \frac{\sigma_p + \sigma_{cж}}{4 \sqrt{\sigma_p \sigma_{cж}}} \sqrt{V_{cж}^2 + V_{op}^2}, \\ r_{C,f} &= \frac{V_{cж}^2 - V_{op}^2}{V_{cж}^2 + V_{op}^2}, \end{aligned} \quad (13)$$

где $V_{\sigma_{сж}} = s_{\sigma_{сж}} / \sigma_{сж}$ – коэффициент вариации предела прочности при сжатии; $V_{\sigma_p} = s_{\sigma_p} / \sigma_p$ – коэффициент вариации предела прочности при растяжении.

Из формулы (13) следует, что коэффициент корреляции

$$r_{C,f} = \begin{cases} 0 & \text{при } V_{\sigma_{сж}} = V_{\sigma_p}; \\ < 0 & \text{при } V_{\sigma_{сж}} < V_{\sigma_p}. \end{cases}$$

Паспорт прочности для дисперсных грунтов – песков (кроме гравелистых и крупных), глинистых и органо-минеральных грунтов – строят по результатам испытания грунта методом одноплоскостного среза в соответствии с ГОСТ 12248-2010. *Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.* Характеристики прочности грунта – угол внутреннего трения и удельное сцепление – определяются через параметры линейной зависимости $\tau = \sigma \operatorname{tg}\varphi + C$ между касательными τ и нормальными σ напряжениями, возникающими при срезе образца. При этом измеряемой величиной является горизонтальная срезающая нагрузка при различных значениях заданной нормальной нагрузки.

Ковариационная матрица параметров C и $\operatorname{tg}\varphi$ линейной зависимости будет вычисляться по формуле [8, 10]:

$$\mathbf{K}_{C,\operatorname{tg}\varphi} = (\mathbf{A}^T \mathbf{K}_\tau^{-1} \mathbf{A})^{-1} = \begin{pmatrix} k_1 & k_{12} \\ k_{12} & k_2 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Элементы матрицы частных производных уравнений связи $\tau_i = \sigma_i \operatorname{tg}\varphi + C$, которые составляются для каждого из n испытаний, рассчитываются по формулам:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \tau_1}{\partial C} & \frac{\partial \tau_1}{\partial \operatorname{tg}\varphi} \\ \dots & \dots \\ \frac{\partial \tau_n}{\partial C} & \frac{\partial \tau_n}{\partial \operatorname{tg}\varphi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \sigma_1 \\ \dots & \dots \\ 1 & \sigma_n \end{pmatrix}.$$

Ковариационная матрица \mathbf{K}_τ , в силу независимости измеренных значений касательных напряжений, имеет вид диагональной матрицы:

$$\mathbf{K}_\tau = \begin{pmatrix} s_{\tau 1}^2 & & \\ & \dots & \\ & & s_{\tau n}^2 \end{pmatrix},$$

где $s_{\tau 1}, \dots, s_{\tau n}$ – среднеквадратические отклонения касательных напряжений. Естественно принять для испытуемой пробы среднеквадратические отклонения равными, т. е. $s_{\tau 1} = s_{\tau n} = s_\tau$. Тогда формула (14) примет вид:

$$\mathbf{K}_{C,\operatorname{tg}\varphi} = s_\tau^2 (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} = s_\tau^2 \begin{pmatrix} n & \sum_{i=1}^n \sigma_i \\ \sum_{i=1}^n \sigma_i & \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \end{pmatrix}^{-1} = \frac{s_\tau^2}{n \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \sigma_i \right)^2} \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 & -\sum_{i=1}^n \sigma_i \\ -\sum_{i=1}^n \sigma_i & n \end{pmatrix}.$$

Используя формулы (5)–(8), получим:
среднеквадратическое отклонение для удельного сцепления

$$s_C = s_\tau \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2}{n \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \sigma_i\right)^2}}; \quad (15)$$

среднеквадратическое отклонение для коэффициента внутреннего трения

$$s_f = s_\tau \sqrt{\frac{n}{n \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \sigma_i\right)^2}}; \quad (16)$$

среднеквадратическое отклонение для угла внутреннего трения

$$s_\varphi = 57,3^\circ \cos^2 \varphi s_\tau \sqrt{\frac{n}{n \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \sigma_i\right)^2}}; \quad (17)$$

коэффициент корреляции между удельным сцеплением и коэффициентом внутреннего трения

$$r_{C,f} = -\frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n \sigma_i^2}}.$$

Заметим, что для рассмотренного способа определения параметров паспорта прочности коэффициент корреляции между удельным сцеплением и коэффициентом внутреннего трения всегда отрицательный.

Удельное сцепление и коэффициент внутреннего трения оцениваются по методу наименьших квадратов:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} C \\ f \end{pmatrix} &= (\mathbf{A}^T \mathbf{K}_\tau^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{K}_\tau^{-1} \boldsymbol{\tau} = \\ &= \frac{\Delta_\tau^2}{n \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \sigma_i\right)^2} \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 & -\sum_{i=1}^n \sigma_i \\ -\sum_{i=1}^n \sigma_i & n \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\Delta_\tau^2} \begin{pmatrix} 1 & \dots & 1 \\ \sigma_1 & \dots & \sigma_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \vdots \\ \tau_n \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

т. е.

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \sum_{i=1}^n \tau_i - \sum_{i=1}^n \sigma_i \sum_{i=1}^n \sigma_i \tau_i}{n \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \sigma_i \right)^2};$$

$$f = \operatorname{tg} \varphi = \frac{n \sum_{i=1}^n \sigma_i \tau_i - \sum_{i=1}^n \sigma_i \sum_{i=1}^n \tau_i}{n \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \sigma_i \right)^2}. \quad (18)$$

Среднеквадратическое отклонение касательных напряжений, необходимое для расчетов по формулам (15)–(17), находим по формуле:

$$s_\tau = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tau_i - C - \sigma_i \operatorname{tg} \varphi)^2}{n-2}}. \quad (19)$$

Формулы (18)–(19) приведены в ГОСТ 20522-2012. Надежные оценки получаются при статистической обработке опытных значений нормальных и касательных напряжений как единой совокупности для монолитов, принадлежащих одному инженерно-геологическому элементу (ИГЭ).

Рассмотрим пример. В качестве исходных данных примем результаты 27 лабораторных определений сопротивлений срезу τ в девяти сериях при трех значениях нормального напряжения $\sigma_1 = 100$ кПа, $\sigma_2 = 200$ кПа, $\sigma_3 = 300$ кПа, выполненных для инженерно-геологического элемента, сложенного суглинками [11] (таблица).

Результаты лабораторных определений сопротивлений срезу [11]
The results of cut resistance laboratory determinations [11]

Нормальные напряжения, кПа	Касательные напряжения, кПа								
$\sigma_1 = 100$	73	71	75	67	80	69	85	62	70
$\sigma_2 = 200$	96	99	120	110	108	90	117	101	119
$\sigma_3 = 300$	116	122	159	148	135	137	150	136	133

По данным таблицы сформируем матрицу \mathbf{A} и вектор $\boldsymbol{\tau}$:

$$\mathbf{A}^T = \begin{pmatrix} 1 & \dots & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 100 & \dots & 100 & 200 & \dots & 200 & 300 & \dots & 300 \end{pmatrix};$$

$$\boldsymbol{\tau}^T = (73 \ \dots \ 70 \ 96 \ \dots \ 119 \ 116 \ \dots \ 133).$$

Оценки удельного сцепления и коэффициента внутреннего трения:

$$\begin{pmatrix} C \\ f \end{pmatrix} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \boldsymbol{\tau} = \begin{pmatrix} 40,6 \text{ кПа} \\ 0,324 \end{pmatrix}, \quad \varphi = 18,0^\circ.$$

Среднеквадратические отклонения и коэффициент корреляции:

$$s_{\tau} = \sqrt{(\boldsymbol{\tau}^T \boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\tau}^T \mathbf{A} (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \boldsymbol{\tau}) / (n-2)} = 10,6 \text{ кПа};$$

$$\mathbf{K}_{C,\text{tg}\varphi} = s_{\tau}^2 (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} = s_{\tau}^2 \begin{pmatrix} \frac{7}{27} & -\frac{1}{900} \\ -\frac{1}{900} & \frac{1}{180\,000} \end{pmatrix}.$$

$$s_C = 5,4 \text{ кПа}; \quad s_f = 0,025; \quad s_{\varphi} = 1,3^\circ; \quad r_{C,f} = -0,926.$$

Отметим высокую отрицательную корреляцию между параметрами паспорта прочности.

ГОСТ 21153.5-88. Породы горные. Метод определения предела прочности при срезе со сжатием содержит методику определения предела прочности при срезе τ_0 и нормального сжимающего напряжения σ_0 для образцов, помещаемых в стальные наклонные матрицы испытательного устройства [12]. Характеристики прочности грунта – угол внутреннего трения и сцепление – определяются через параметры линейной зависимости $\tau_0 = \sigma_0 \operatorname{tg}\varphi + C$ между касательными τ и нормальными σ напряжениями, возникающими при срезе образца по методике регрессионного анализа [2]. Однако регрессионный анализ при данном методе испытаний применять нельзя, так как в обе переменные – τ_0 и σ_0 – входят погрешности определения разрушающей силы P . Здесь следует применять формулы конфлюентного анализа. Теория конфлюентного анализа для прямолинейной зависимости и пример обработки данных приведены в [8]. Там же показано, что значения параметров паспорта прочности, рассчитанные по методике регрессионного анализа, могут быть искажены на 20 %, а их статистические характеристики – в несколько раз.

Выводы. В статье рассмотрена методика корреляционного анализа результатов испытаний образцов для построения паспорта прочности горных пород. Установлено, что способ расчета ковариационной матрицы параметров паспорта прочности зависит от применяемого лабораторного метода испытаний образцов.

В статистических расчетах при решении задач горной геомеханики учет коэффициента корреляции производится по формуле:

$$s_F = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial C}\right)^2 s_C^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial f}\right)^2 s_f^2 + 2r_{C,f} \left(\frac{\partial F}{\partial C}\right) \left(\frac{\partial F}{\partial f}\right) s_C s_f}, \quad (20)$$

где F – функция от параметров паспорта прочности.

Примеры на применение формулы (20) при решении задачи обеспечения устойчивости карьерных откосов приведены в работе [13].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гордеев В. А. Основы геометризации геотехнических условий разработки на карьерах: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург, 1994. 32 с.
2. Попов В. Н., Шпаков П. С., Юнаков Ю. Л. Управление устойчивостью карьерных откосов. М.: МГГУ, 2008. 683 с.
3. Gordeev V. Zur parameterschätzung ausgleichender funktionen ohne fehlerfreie variable // Vermessungstechnik. 1989. N. 9. S. 310–313.
4. Манаков А. В. Построение паспортов прочности по опытным данным // ГИАБ. 2004. № 11. С. 94–95.
5. Певзнер М. Е., Иофис М. А., Попов В. Н. Геомеханика. М.: МГГУ, 2005. 438 с.
6. Латышев О. Г. Разрушение горных пород. М.: Теплотехник, 2007. 672 с.

7. Баклашов И. В. Геомеханика. В 2 т. Т.1. Основы геомеханики. М.: МГГУ, 2004. 208 с.
8. Гордеев В. А. Теория ошибок измерений и уравнительные вычисления. Екатеринбург: УГГУ, 2004. 429 с.
9. Wolf H. Ausgleichungsrechnung I. 3. Aufl. Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn. 1998. 322 s.
10. Draper N., Smith T. Applied regression analysis. 1998, by John Wiley & Sons, Inc. 736 p.
11. Определение сопротивления грунтов сдвигу методом одноплоскостного среза: методические указания к лабораторным работам по механике грунтов / сост. В. В. Фурсов, М. В. Балюра. Томск: ТГАСУ, 2016. 34 с.
12. Борщ-Компониец В. И. Практическая механика горных пород. М.: Горная книга, 2013. 322 с.
13. Гордеев В. А. Геометризация геотехнических условий разработки на карьерах: науч. моногр. Екатеринбург: УГГУ, 2017. 250 с.

Поступила в редакцию 27 февраля 2019 года

Сведения об авторах:

Гордеев Виктор Александрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой маркшейдерского дела Уральского государственного горного университета. E-mail: gordeev.v@ursmu.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-33-42

Calculation of statistical characteristics of rock strength certificate

Viktor A. Gordeev¹

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. At risk assessment in problems of mining geomechanics it is necessary to consider statistical characteristics of rock physical parameters variability and interconnection – mean square deviations and coefficients of correlation of these parameters for each engineering-geological element. In calculations of career slopes stability rock strength certificate parameters are used – coupling and internal friction angle. Neglection of mutual correlation between rock strength certificate parameters leads to settlement indicator errors overestimate/understating, while the neglection of the coefficient of stability and geometrical parameters of a slope leads to understating/overestimate of degree of risk.

Research aim and methodology. On the basis of the regression analysis the present research aims to consider ways of receiving elements of a correlation matrix for various ways of creating rock strength certificate according to the results of laboratory researches of the samples – at monoaxial compression and stretching and by the one-plane cut method.

Results. The formulae necessary to calculate rock strength certificate parameters covariance matrix are introduced in the article. It is established that the way of calculating covariance matrix depends on the applied samples laboratory test method. The examples have shown that the correlation coefficient between coupling and of internal friction coefficient can be of various signs.

Scope of results. Values of rock strength certificate parameters statistical characteristics, calculated by the offered technique, can be used to solve rock geomechanics probabilistic problems.

Key words: rock strength certificate; coupling; internal friction coefficient; tests of samples; covariance matrix; correlation coefficient.

REFERENCES

1. Gordeev V. A. *The fundamentals of geotechnical development conditions geometrization at open pits. DSc (Engineering) abstract of dissertation.* St. Petersburg; 1994. (In Russ.)
2. Popov V. N., Shpakov P. S., Iunakov Yu. L. *Open pit slopes stability control.* Moscow: MSMU Publishing; 2008. (In Russ.)
3. Gordeev V. Zur parameterschätzung ausgleichender funktionen ohne fehlerfreie variable. *Vermessungstechnik.* 1989; 9: 310–313.
4. Manakov A. V. Building strength certificates according to experimental data. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal).* 2004; 11: 94–95. (In Russ.)
5. Pevzner M. E., Iofis M. A., Popov V. N. *Geomechanics.* Moscow: MSMU Publishing; 2005. (In Russ.)
6. Latyshev O. G. *Rock breaking.* Moscow: Teplotekhnika Publishing; 2007. (In Russ.)
7. Baklašov I. V. *Geomechanics. In 2 volumes. Volume 1. The fundamentals of geomechanics.* Moscow: MSMU Publishing; 2004. (In Russ.)
8. Gordeev V. A. *The theory of measurement errors and compensation computations.* Ekaterinburg: UrSMU Publishing; 2004. (In Russ.)
9. Wolf H. *Ausgleichungsrechnung I. 3. Aufl.* Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn. 1998. 322 s.
10. Draper N., Smith T. *Applied regression analysis.* 1998, by John Wiley & Sons, Inc. 736 p.

11. V. V. Fursov, M. V. Baliura (eds.) *Determination of soil shear resistance by the method of single-plane cut: guidelines for laboratory work on soil mechanics*. Tomsk: TSUAB Publishing; 2016. (In Russ.)
12. Borshch-Komponiets V. I. *Applied rock mechanics*. Moscow: Gornaia kniga Publishing; 2013. (In Russ.)
13. Gordeev V. A. *Geometrization of geotechnical development conditions at open pits: scientific monograph*. Ekaterinburg: UrSMU Publishing; 2017. (In Russ.)

Received 27 February, 2019

Information about authors:

Viktor A. Gordeev – DSc (Engineering), Professor, the Head of the Department of Mine Surveying, Ural State Mining University. E-mail: gordeev.v@ursmu.ru

Исследование разрушения продуктивного пласта урана взрывом камуфлетного заряда взрывчатых веществ

Мислибаев И. Т.¹, Заиров Ш. Ш.^{1*}, Солиев Б. З.¹, Норов А. Ю.¹

¹ Навоийский государственный горный институт, г. Навои, Республика Узбекистан

*e-mail: sher-z@mail.ru

Реферат

Введение. Несмотря на неоспоримые преимущества метода скважинного подземного выщелачивания (СПВ), имеет место тенденция повышения себестоимости добываемых полезных ископаемых в связи с освоением и вовлечением в эксплуатацию глубокозалегающих месторождений со сложными горно-геологическими и горнотехническими условиями и обособленныхрудных тел с незначительным содержанием полезных ископаемых, а также краевых участков месторождений с высоким содержанием полезных ископаемых. Фактором, оказывающим существенное влияние на повышение себестоимости добычи полезных ископаемых методом СПВ, является увеличение трудовых и материальных затрат на восстановление достигнутой при освоении производительности скважин, снижающейся, как правило, вследствие кольматации прифильтровой зоны продуктивного пласта. Ввиду безуспешных попыток раскольматации прифильтровой зоны пласта с применением известных способов и средств эксплуатационные скважины, как правило, ликвидируют и сооружают новые, что предопределяет существенное снижение прибыли. Поэтому обоснование и разработка новых технологий и технических средств при эксплуатации технологических скважин с целью повышения их производительности является актуальной задачей для науки и практики горного производства.

Цель работы. Разработка технологии и технических средств раскольматации прифильтровой зоны продуктивного пласта физическим воздействием путем применения камуфлетного заряда взрывчатых веществ.

Методология. Выполнены теоретические исследования способа подземного выщелачивания, анализ и математическое моделирование действия камуфлетных зарядов взрывчатого вещества в скважинах.

Результаты. Предложены решения по повышению эффективности работы геотехнологических скважин урана путем ликвидации кольматации продуктивного пласта взрывным воздействием с применением торпедных зарядов.

Выводы. На основе теоретического исследования разработана математическая модель действия взрыва камуфлетного цилиндрического заряда, описывающая зону трещинообразования в глубине продуктивного пласта урана. Установлено, что при взрыве камуфлетного цилиндрического заряда под воздействием ударной и отраженной от свободной поверхности уступа волн напряжения в глубине продуктивного пласта урана образуется зона трещинообразования массива. На основе использования законов теории упругости определен радиус трещинообразования в глубине продуктивного пласта урана, зависящий от радиуса камуфлетного скважинного заряда, коэффициента, определяющего условия взрыва, акустической жесткости массива, коэффициента Пуассона и прочностных свойств пород продуктивного пласта урана на растяжение.

Ключевые слова: уран; геотехнология; подземное выщелачивание; трещинообразование пласта; кольматация; классификация способов подготовки рудных залежей; интенсификация добычи; торпедирование; зона трещинообразования; взрывное воздействие; заряд взрывчатых веществ; раскольматация пласта.

Введение. Для определения представления о развитии взрыва камуфлетного скважинного заряда в твердой среде рассмотрим физическую картину взрывного разрушения продуктивного пласта урана, в основу которого положено экспериментальное подтверждение и ставшая классической схема, предложенная в работе [1].

Согласно этой схеме (рис. 1), после практически одновременной детонации сферического заряда взрывчатого вещества (ВВ), в момент, когда детонационная волна доходит до поверхности заряда, на породу действуют взрывные газы с весьма высоким давлением. В результате в среде возникает волна сжатия, которая сжимает, раздавливает и переводит в текучее состояние слои пород на контакте *продукты взрыва–среда*. Материалы здесь будут испытывать состояние всестороннего сжатия. Размеры образовавшейся при этом зоны сжатия всецело зависят от давления, развиваемого в продуктах взрыва в этой зоне, прочностных и упругих свойств окружающей заряд породы [2].

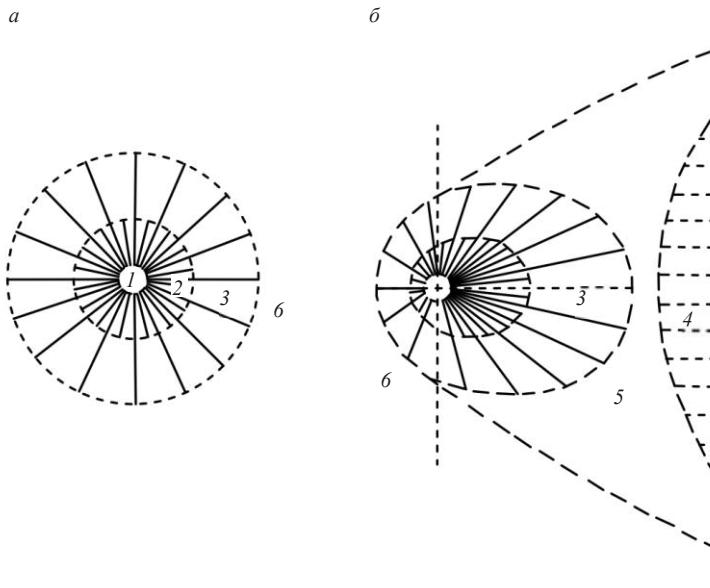


Рис. 1. Разрушение массива пород при взрыве в безграничной среде – *а* и вблизи свободной поверхности – *б*:

1 – взрывная полость; *2* – зона раздавливания; *3* – зона радиальных трещин; *4* – зона трещин, развивающихся от свободной поверхности; *5* – зона трещин, развивающихся от совокупного разрушения; *6* – неразрушенная зона

Fig. 1. Rock mass blasting destruction in infinite medium – *a* and near the free surface – *b*:

1 – explosion chamber; *2* – crushing zone; *3* – zone of profound fissures; *4* – zone of fissures propagating from the free surface; *5* – zone of fissures propagating from the aggregate destruction; *6* – undisturbed zone

При дальнейшем удалении от центра взрыва интенсивность напряжений, вызванных волной сжатия, снижается и процесс разрушения носит иной характер. Частицы породы, вовлеченные в движение волной сжатия, продолжают перемещаться вдоль радиусов, исходящих из центра взрыва. В результате каждый элементарный сферический слой, мысленно выделяемый в среде, растягивается, увеличивая свой радиус, что приводит к появлению системы радиальных трещин, расходящихся во все стороны от заряда. Иначе говоря, нарушение сплошности материала пород в зоне происходит путем образования трещин, направленных по нормалям к поверхности сферы. Появление радиальных трещин обусловлено наличием тангенциальных растягивающих напряжений, превышающими предел прочности материала горных пород на разрыв. При дальнейшем удалении от центра камуфлетного взрыва деформации, вызванные растягивающими напряжениями, прекращаются и новые трещины не образуются. Однако возникшие ранее трещины могут распространяться еще на некоторое расстояние благодаря перераспределению напряжений около их концов, где происходит концен-

трация растягивающих усилий. Размеры зоны радиальных трещин зависят от трещиноватости массива пород, их физико-механических и горнотехнологических свойств, передачи энергии ВВ в волну напряжений и времени их воздействия на среду (рис. 1). На размеры этих зон существенное влияние оказывают и расширяющиеся газообразные продукты взрыва.

В остальной части среды за пределами отмеченных зон волна сжатия приводит к накоплению некоторого запаса потенциальной энергии упругой деформации, которая реализуется в работу разрушения лишь при наличии свободной поверхности. В этом случае при достижении волной сжатия свободной поверхности частицы приграничного слоя получают возможность расширяться в ее сторону. Такое расширение породы будет передаваться все более удаленным слоям среды. В результате возникает волна растяжения (или отражения), распространяющаяся от свободной поверхности в глубь массива. Эта волна вызывает растягивающее напряжение в породе, а так как предел прочности горных пород на разрыв в десятки раз ниже предела их прочности на сжатие, это приводит к интенсивному разрушению среды. Трещины, образовавшиеся под действием волны растяжения, развиваются перпендикулярно направлению ее распространения.

В некоторых случаях наложение прямых и отраженных волн приводит к явлению откола [3–5].

Участок породы, ограниченный с одной стороны зоной радиальных трещин, с другой – зоной трещин, идущих от свободной поверхности, разрушается под совокупным действием волновых процессов и газообразных продуктов взрыва [2]. При взрыве в безграничной среде после падения давления продуктов взрыва (ПВ) в полости сильно сжатая вокруг нее порода незначительно смещается в сторону центра заряда, возбуждая волну разрежения, в результате чего в среде появляются кольцевые тангенциальные трещины.

Таким образом, основное разрушение скальных горных пород происходит под действием волн напряжений, возбуждаемых в среде взрывом заряда ВВ, и самих газообразных продуктов взрыва. При этом видимый контур массива не изменяет своего начального положения. Далее оставшиеся в полости продукты взрыва до-разрушают отбивающую часть массива и сообщают ей дополнительную кинетическую энергию. В результате раздробленная масса получает механическое движение и занимает определенное конечное положение в пространстве. В сильно уплотняемых породах (грунтах) роль волновых процессов в разрушении сводится к минимуму и разрушение осуществляется за счет сообщения среде кинетической энергии газообразных продуктов взрыва ВВ.

Разработка математической модели и ее анализ. Для решения задачи о прочностной характеристике пород в условиях всестороннего взрывного нагружения по аналогии с работами [2–5] будем считать, что расширение полости прекратится при наличии большого внутреннего трения в раздробленной среде тогда, когда статически напряженное состояние, обусловленное прочностью среды, будет в состоянии удержать давление продуктов детонации.

Чтобы вычислить величину максимального давления в полости в безграничной среде, которую способны удержать силы, обусловленные прочностью среды, положим, что взрыв в каждом элементарном слое по высоте заряда произошел мгновенно. Рассмотрим сечение заряда, находящееся на достаточном расстоянии от его концов. Среду в направлении радиуса слоя будем считать бесконечно протяженной. Решение, полученное при этих допущениях, будет соответствовать взрыву достаточно длинного цилиндрического заряда в неограниченной среде [6–11].

Следуя [12], разрушение скальной породы представим происходящим при постепенном нарастании давления внутри полости от бесконечности к оси заряда (рис. 2). При малых давлениях в полости скальный массив можно рассматривать как упругую среду. В этом случае с повышением давления на границе полости будут расти растягивающие тангенциальные и сжимающие радиальные напряжения.

При достижении тангенциальными напряжениями некоторого предельного значения σ_p на границе полости появятся трещины, направленные по радиусу. Протяженность каждой отдельной трещины предполагается значительно меньше радиуса зоны трещинообразования. Это необходимое условие сохранения симметрии зоны разрушения и того, что граница зоны определяется значением тангенциального напряжения, равным пределу прочности породы на растяжение.

При дальнейшем повышении давления в полости образуемые радиальными трещинами конические куски породы начнут раздавливаться. С ростом давления зона раздавливания будет расширяться. Причем в конце зоны раздавливания радиальные напряжения достигнут некоторой предельной величины $\sigma_{ск}$, соответствующей значению напряжения на раздавливание при одноосном сжатии. Внутри этой зоны материал довольно сильно переизмельчен и по своей структуре приближается к зернистой среде типа песок с плотной упаковкой частиц.

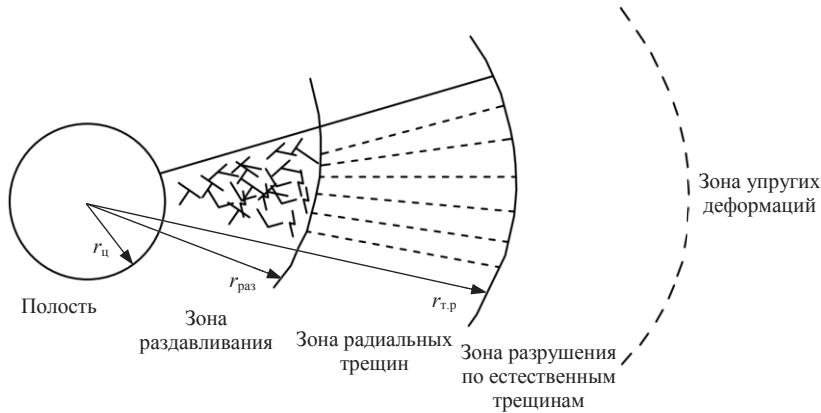


Рис. 2. Зоны разрушения в безграничной среде (по В. Н. Родионову):
 r_u – радиус полости от центра заряда; $r_{раз}$ – радиус зоны раздавливания; $r_{т.р}$ – радиус зоны радиальных трещин

Fig. 2. Zones of destruction in infinite medium (according to V. N. Rodionov):
 r_u – the radius of a cavity from the center of a charge; $r_{раз}$ – the radius of a crushing zone;
 $r_{т.р}$ – the radius of radial fissures zone

Исходя из описанной схемы разрушения, уравнение равновесия, выраженное через смещение $u = u(r)$, для упругой области в случае осевой симметрии можно записать в виде:

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = 0,$$

где r – текущий радиус.

Это обыкновенное линейное уравнение второго порядка, общий интеграл которого выражается как

$$u = Ar + A/r, \quad (1)$$

где A и B – постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий.

Уравнение (1) рассматривается совместно со следующими двумя условиями: условием об ограниченности смещения на бесконечности и условием того, что на внешней границе зоны радиальных трещин тангенциальное напряжение принимает предельное значение σ_p :

$$u = 0 \text{ при } r = \infty; \quad \sigma_\theta = \sigma_p \text{ при } r = r_1,$$

где σ_θ – тангенциальное напряжение; r_1 – радиус зоны радиальных трещин.

Из первого условия следует, что $A = 0$. Тогда

$$\sigma_r = -\frac{EB}{1 + vr^2}; \quad \sigma_\theta = -\frac{EB}{1 + vr^2}, \quad (2)$$

где σ_r – радиальное напряжение; E – модуль упругости; v – коэффициент Пуассона.

Используя второе граничное условие (2), находим B .

Таким образом, в упругой области для напряжений и перемещения имеем

$$\sigma_r = -\sigma_p \left(\frac{r_1}{r} \right)^2; \quad \sigma_\theta = -\sigma_p \left(\frac{r_1}{r} \right)^2; \quad u = \frac{1+v}{E} \sigma_r r_1 \frac{r_1}{r}.$$

Смещение границы упругой зоны при $r = r_1$

$$u_1 = \frac{1+v}{E} \sigma_p r_1. \quad (3)$$

Оно определяет расстояние, на которое сместились граница за счет деформирования упругой зоны.

В зоне радиальных трещин $\sigma_\theta = 0$. С учетом этого запишем уравнение равновесия в рассматриваемой зоне:

$$\sigma_r + r \frac{d\sigma_r}{dr} = 0. \quad (4)$$

Решением уравнения (4) является $\sigma_r \kappa = \text{const}$, где κ – коэффициент интенсивности напряжений.

Граничное условие для внутренней границы этой зоны

$$\sigma_r = -\sigma_{cж} \quad \text{при } r = r_2, \quad (5)$$

где r_2 – радиус зоны раздавливания.

Согласно зависимости (5) распределение напряжений в этой зоне подчиняется закономерности

$$\sigma_r = -\sigma_{cж} (r_2/r). \quad (6)$$

Для установления связи между r_1 и r_2 рассмотрим систему

$$\sigma_r = \frac{E}{1-v^2} \left(\frac{du}{dr} + v \frac{u}{r} \right); \quad \sigma_\theta = \frac{E}{1-v^2} \left(\frac{u}{r} + v \frac{du}{dr} \right),$$

где σ_θ – тангенциальное напряжение.

Так как в этой области $\sigma_\theta = 0$, то

$$\sigma_r = -\frac{E}{v} \frac{u}{r}. \quad (7)$$

Используя свойство неразрывности границы между упругой зоной и зоной радиальных трещин, т. е. условие непрерывности смещения, и подставляя (3) в выражение (7), получаем

$$\sigma_r = -\frac{E}{v} \frac{u_1}{r_1} = -\frac{1+v}{v} \sigma_p. \quad (8)$$

На основании (5), (6), с учетом (8) имеем

$$\sigma_{cж} r_2 = \frac{1+v}{v} \sigma_p r_1. \quad (9)$$

Радиальное напряжение в рассматриваемой зоне связано с деформацией законом Гука $\sigma_r = E e_r$ [8]. Тогда распределение деформации имеет вид

$$e_r = \frac{\sigma_{cж}}{E} \frac{r_2}{r}.$$

Перемещение u_2 внутренней границы радиальных трещин под действием напряжения $\sigma_r = -\sigma_{cж}$ определяется выражением

$$u_2 = u_1 + \int_{r_1}^{r_2} e_r dr = \frac{1+v}{E} \sigma_p r_1 + \frac{1}{E} \sigma_{cж} r_2 \ln \frac{r_1}{r_2}.$$

С учетом зависимости (9)

$$u_2 = \frac{\sigma_{cж} r_2}{E} \left(v + \ln \frac{v}{1+v} \frac{\sigma_{cж}}{\sigma_p} \right).$$

Так как для типичных горных пород окончательно $\ln \frac{v}{1+v} \cdot \frac{\sigma_{cж}}{\sigma_p} \approx 1$, имеем

$$u_2 = \frac{1+v}{E} \sigma_{cж} r_2.$$

В зоне раздавливания с определенной степенью точности может быть использовано условие [14]:

$$\sigma_r - 2\sigma_\theta = 0.$$

Пользуясь уравнением равновесия в виде

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{1}{r} (\sigma_r - \sigma_\theta) = 0,$$

с учетом того, что радиальное напряжение на внешней границе рассматриваемой зоны ($r = r_2$) известно, получим

$$\sigma_r = -\sigma_{cж} - (r_2/r)^{1/2}.$$

При этом давление P на стенки цилиндрической полости составит

$$P = \sigma_{cж} (r_2/r_n)^{1/2}.$$

Применив закон неразрывности, который справедлив в зоне раздавливания, определим соотношение r_2/r_n , r_n – радиус цилиндрической полости.

Объемная деформация, как известно, равна

$$\Delta = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z}{3K} = -\frac{3}{4} \frac{\sigma_{cж}}{K} \left(\frac{r_2}{r} \right)^{1/2}, \quad (10)$$

где K – модуль объемного сжатия, $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$; σ_z – продольное напряжение.

При выводе зависимости (10) использованы известные положения из теории упругости и пластичности о том, что при цилиндрической симметрии $\sigma_z = (\sigma_r + \sigma_\theta)/2$ [12], в случае среды типа песок $\sigma_r = 2\sigma_\theta$.

Поскольку $\Delta = 1 - \rho_1/\rho_0$, то из закона объемного деформирования получим

$$\rho_1 = \rho_0 + \frac{3}{4} \rho_0 \frac{\sigma_{cж}}{K} \left(\frac{r_2}{r} \right)^{1/2},$$

где ρ_0, ρ_1 – плотность до и после деформации.

Уравнение неразрывности или баланса массы имеет вид:

$$\rho_0(r_2^2 - r_0^2) = 2 \int_{r_0}^{r_2 + \nu_2} \rho_1 r dr. \quad (11)$$

Интегрирование выражения (11) в указанных пределах дает

$$\frac{r_2}{r_n} = \sqrt{\frac{1 + \frac{\sigma_{cж}}{K} \left(\frac{r_2}{r} \right)^{1/2} - \left(\frac{r_0}{r_n} \right)^2}{\left(1 + \frac{1+\nu}{E} \sigma_{cж} \right)^2 - 1 + \frac{\sigma_{cж}}{K} \left(1 + \frac{1+\nu}{E} \sigma_{cж} \right)^{3/2}}}.$$

Разложив слагаемые в знаменателе в ряд и ограничившись членами первого порядка малости, получим

$$\frac{r_2}{r_n} = \sqrt{\frac{1 + \frac{\sigma_{cж}}{K} \left(\frac{r_2}{r} \right)^{1/2} - \left(\frac{r_0}{r_n} \right)^2}{2 \frac{1+\nu}{E} \sigma_{cж} + \frac{\sigma_{cж}}{K}}}.$$

Максимальное значение давления, удерживаемого средой, достигается при $r_0/r_n \rightarrow 0$. Следовательно,

$$\left(\frac{r_2}{r_n} \right)_m = \sqrt{\frac{1 + \frac{\sigma_{cж}}{K} \left(\frac{r_2}{r_n} \right)^{1/2}}{2 \frac{1+\nu}{E} \sigma_{cж} + \frac{\sigma_{cж}}{K}}}, \quad (12)$$

где m – коэффициент поглощения энергии.

Учитывая, что $K = \frac{5}{6} E$, а $E = \frac{3}{4} \rho_0 c^2$ при $\nu = 0,3$ и $\rho_0 c^2$ для горных пород (c – скорость волны в цилиндрической полости) на два-три порядка больше $\sigma_{cж}$,

вторым слагаемым в числителе подкоренного выражения можно пренебречь. Тогда из уравнения (12) имеем

$$\left(\frac{r_2}{r_n} \right)_m = \sqrt{\frac{3}{4}} \frac{\rho_0 c^2}{(3,2 + 2v)\sigma_{сж}}$$

В соответствии с этим максимальное давление в цилиндрической полости в однородном скальном массиве при $v = 0,3$

$$P_c = \sigma_{сж} \left(\frac{\rho_0 c^2}{5\sigma_{сж}} \right)^{1/4}. \quad (13)$$

Выражение (13) получено из рассмотрения квазистатического расширения полости, которое имеет место на заключительной стадии взрыва [12]. Поскольку в начальный момент действие взрыва на стенки полости носит ударный характер, в уравнение (13) следует внести поправку, учитывающую это условие.

В работе [15] обосновано, что напряжения, возникающие при динамическом (ударном) давлении на упругое тело, могут быть определены по формуле:

$$\sigma_d = \sigma_{ct} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{T_0}{U_c(1+\beta)}} \right] = k_d \sigma_{ct}, \quad (14)$$

где σ_{ct} – напряжение в упругом теле при статическом приложении нагрузки; T_0 – кинетическая энергия ударяющего тела (в данном случае ПД) к моменту начала удара; U_c – потенциальная энергия деформации породы; β – отношение массы ударяемого тела (окружающей полости породы) к массе ударяющего тела (заряда ВВ); k_d – коэффициент динамичности.

Формула (14) при решении задач взрыва была впервые применена в работе [15]. Так как отношение массы отбивающей части массива к массе заряда в обычных условиях взрывания составляет не менее $3 \cdot 10^3$, а отношение T_0/U_c не превышает одного порядка, то величина $T_0/U_c(1+\beta)$ будет весьма малой. В результате коэффициент динамичности в начале действия взрывной нагрузки по формуле (14) будет равен 2.

С учетом того что к моменту достижения полостью предельного положения расширение носит статический характер, средний коэффициент динамичности на протяжении всего этого процесса можно принять равным 1,5.

Обоснованность приведенного значения коэффициента подтверждается экспериментами. Так, разрушающее напряжение при взрывном нагружении для стекла увеличивается на 50 %, полиметилметакрилата – на 65 %. Согласно данным [13], динамический предел прочности для чугуна составляет 1,50, меди – 1,35 и магниевых сплавов – 1,25 его статического значения. В соответствии с изложенным максимальное давление в полости, образованной при взрыве цилиндрического заряда:

$$P_c = \sigma_{сж} \left(\frac{\rho_0 c^2}{\sigma_{сж}} \right)^{1/4}. \quad (15)$$

Как видно из уравнения (15), прочностная характеристика зависит как от сжимаемости, так и от предела прочности породы на раздавливание. Выражение

в скобках представляет собой безразмерную величину, учитывающую условие всестороннего динамического нагружения среды при действии взрыва ВВ. Иначе говоря, это число показывает, во сколько раз увеличивается сопротивляемость пород разрушению в ближней зоне взрыва при всесторонней динамической нагрузке. Эта характеристика различна для разных видов пород и определяется их механическими и упругими свойствами.

Для описания процесса разрушения продуктивного пласта урана продуктами детонации рассмотрим схему гидродинамического процесса трещинообразования горного массива, создаваемого взрывом камуфлетного скважинного заряда ВВ.

Для определения величины разрушения продуктивного пласта установим радиус трещинообразования в глубине массива согласно методике, приведенной в работе [16]. При этом будем считать, что радиус трещинообразования массива определяется действием взрыва камуфлетного цилиндрического заряда ВВ диаметром d_0 .

Согласно законам теории упругости, радиус трещинообразования горного массива зависит от величины тангенциальных напряжений на растяжение, возникающих в горном массиве, которые определяются по эмпирической формуле:

$$\sigma_{\text{pac}} = \mu \sigma_{\text{сж}} / (1 - \mu),$$

где μ – коэффициент Пуассона.

Радиальные напряжения на сжатие на фронте детонационной волны и скорость массового смещения массива горных пород связаны между собой следующей зависимостью:

$$\sigma_{\text{сж}} = U \rho C_p / g,$$

где ρC_p – акустическая жесткость массива горных пород, $\rho C_p = (1,5-15) \times 10^5 \text{ гс} \cdot \text{см}/\text{см}^3 \cdot \text{с}$; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$.

Скорость массового смещения продуктивного пласта определяется по известной формуле М. А. Садовского:

$$U = A \left(\sqrt[3]{Q} / R_{\text{т.п}} \right)^m, \quad (16)$$

где A – коэффициент, зависящий от условия взрывания, $A = 200-250$; Q – масса заряда ВВ, кг; $R_{\text{т.п}}$ – расстояние от центра заряда до рассматриваемой точки, м; m – коэффициент поглощения энергии для камуфлетного цилиндрического заряда ВВ, $m = 2$ [17].

Подставляя в уравнение (16) значения $Q = 2\pi R_0^3$, имеем:

$$U = 3,54 \left(\frac{R_0}{R_{\text{т.п}}} \right)^n. \quad (17)$$

Решив уравнение (17) относительно R и подставив значения U , $\sigma_{\text{сж}}$, получим следующую эмпирическую формулу:

$$R_{\text{т.п}} = R_0 \sqrt{\frac{3,5 A \rho C_p \mu}{\sigma_{\text{pac}} (1 - \mu)}}.$$

Максимальный радиус зон трещинообразования в глубине продуктивного пласта урана окончательно определяется из условия $\sigma_{\text{pac}} = [\sigma_p]$.

$$R_{\text{t,p}} = R_0 \sqrt{\frac{3,5 A \rho C_p \mu}{[\sigma_p] (1 - \mu)}}.$$

Заключение. Таким образом, на основе теоретического исследования разработана математическая модель действия взрыва камуфлетного цилиндрического заряда, описывающая зону трещинообразования в глубине продуктивного пласта урана. Установлено, что при взрыве камуфлетного цилиндрического заряда под воздействием ударной и отраженной от свободной поверхности уступа волн напряжения в глубине продуктивного пласта урана образуется зона трещинообразования массива. На основе использования законов теории упругости определен радиус трещинообразования в глубине продуктивного пласта урана, зависящий от радиуса камуфлетного скважинного заряда, коэффициента, определяющего условия взрывания, акустической жесткости массива, коэффициента Пуассона и прочностных свойств пород продуктивного пласта урана на растяжение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Покровский Г. И., Федоров И. С. Действие удара взрыва в деформируемых средах. М.: Госстройиздат, 1957. 276 с.
2. Ракищев Б. Р. Энергоемкость механического разрушения горных пород. Алматы: Баспаер, 1998. 210 с.
3. Atchison T. C., Porter S. J. and Duvall W. I. Comparison of two methods for evaluating explosive performance // Int. Symp. on Mining Research. London: Pergamon Press, 1962. P.135–146.
4. Brawner C. O. Recent lessons that have been learned in open-pit mine stability // Mining Engineering. 1986. Vol. 38. No. 8. P. 823–830.
5. Donzé F. V., Bouchez J., Magnier S. A. Modeling Fractures in Rock Blasting // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 1997. No. 34(8), P. 1153–1163.
6. Maerz N. H. Reconstructing 3-D block size distributions from 2-D measurements on sections // Proc. ISRM / N. H. Maerz // Fragblast 5 Workshop and Short Course on Fragmentation Measurement. Montreal, A. A. Balkema Publishing, 1996. P. 39–43.
7. Maerz N. H., Palangio T. C., Franklin J. A. Wip Frag Image Based Granulometry System // Proc. of the FRAGBLAST5 Workshop on Measurement of Blast Fragmentation. Montreal, Quebec, Canada, 1996. P. 91–99.
8. Munjiza A., Owen R. J., Bianic N. A Combined Finite-discrete Element Method in Transient Dynamics of Fracturing Solids // Computations. 1995. No. 12. P. 145–174.
9. Pears O. E. Rock Blasting. Some aspects on the theory and practice // Mine and Quarry Eng. 1985. Vol. 21. No. 1. P. 25–30.
10. Rustan A. Spacing and Borehole Diameter at Rock Blasting // 3rd Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting. Brisbane, 1990. P. 303–310.
11. Selberg H. L. Transient compression waves from spherical and cylindrical cavities // Archive for physics. 1995. Band 5. No. 7. P. 307–314.
12. Механический эффект подземного взрыва / В. Н. Родионов [и др.]. М.: Недра, 1971. 224 с.
13. Ракищев Б. Р. Прогнозирование технологических параметров взорванных пород на карьерах. Алма-Ата: Наука, 1983. 240 с.
14. Кутузов Б. Н., Рубцов В. К. Физика взрывного разрушения горных пород применительно к взрывным работам // Взрывное дело. 1963. № 53/10. С. 31–36.
15. Беленко Ф. А. Исследование полей напряжения и процесса образования трещин при взрыве колонновых зарядов в скальных породах // Вопросы теории разрушения горных пород под воздействием взрыва. М., 1958. С. 126–139.
16. Жигур Л. Ю., Мезин А. И. Исследование механизма взрывного нагружения горных пород в зоне недозаряда в скважине // Взрывное дело. 1984. № 86/43. С. 221–225.
17. Мосинец В. Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. М.: Недра, 1976.

Поступила в редакцию 25 декабря 2018 года

Сведения об авторах:

Мислибаев Илхом Туйчибаевич – доктор технических наук, доцент, декан горного факультета Навоийского государственного горного института. E-mail: mislibaev65@mail.ru

Зairoв Шерзод Шарипович – доктор технических наук, доцент, заместитель декана горного факультета Навоийского государственного горного института. E-mail: sher-z@mail.ru

Солиев Бекзод Зокирбаевич – заместитель декана горного факультета Навоийского государственного горного института. E-mail: bek-848120@mail.ru

Норов Акмал Юнусович – соискатель базовой докторантуры Навоийского государственного горного института. E-mail: akmal.norov.88@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-43-54

Study of uranium productive strata destruction by camouflet explosive charge detonation

Ilkhom T. Mislibaev¹, Sherzod Sh. Zairov¹, Bekzod Z. Soliev¹, Akmal Iu. Norov¹

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

Abstract

Introduction. Despite the undeniable advantages of the underground downhole leaching method (UDL), there is a tendency to increase the cost of mined minerals due to the development and involvement of deep deposits with complex mining-geological and mining-engineering conditions and isolated ore bodies with insignificant mineral content, as well as marginal areas of deposits with high mineral content. The factor that significantly influences the prime cost rise of mineral extraction with UDL method is rise in labour costs and material costs to restore the rating of well achieved during the development as long as it usually decreases as a result of productive strata filter zone colmatage. Due to unsuccessful attempts to unclog strata filter zone with existing methods and means, production wells are usually liquidated and new ones are usually built, which causes significant decrease in profits. Therefore, the substantiation and development of new technologies and technical equipment for production wells operation in order to increase their productivity is a relevant task for mining science and practice.

Research aims to develop the technology and technical equipment unclogging productive strata filter zone by physical action through the use of a camouflet explosive charge.

Methodology includes theoretical research of underground leaching method, analysis and mathematical simulation of the action of camouflet explosive charges in wells.

Results. Decisions have been made on geotechnological uranium wells efficiency improvement by eliminating productive strata colmatage by explosive impact using torpedo charges.

Summary. Based on the theoretical research, a mathematical model has been worked out of cylindrical camouflet charge detonation, describing the fissuring zone in the depth of uranium productive strata. It has been determined that during cylindrical camouflet charge detonation under the influence of shock stress wave and stress wave reflected from the free surface, massif fracture zone is formed at the depth of the productive strata. Based on the laws of elasticity theory, cracking radius in the depth of the uranium productive strata is determined which depends on the radius of the camouflet borehole charge, the coefficient determining the blasting conditions, acoustic rigidity of the array, Poisson ratio and tensile strength of uranium productive strata.

Key words: uranium; geotechnology; underground leaching; strata fracturing; colmatage; ore deposits preparation methods classification; production intensification; torpedoing; fracture zone; explosive impact; explosion load; explosive charge; strata unclogging.

REFERENCES

1. Pokrovskii G. I., Fedorov I. S. *The action of detonation shock in deformable media*. Moscow: Gosstroizdat Publishing; 1957. (In Russ.)
2. Rakishev B. R. *Energy content of mechanical disintegration of rock*. Almaty: Baspager Publishing; 1998. (In Russ.)
3. Atchison T. C., Porter S. J. and Duvall W. I. Comparison of two methods for evaluating explosive performance. *Int. Symp. on Mining Research*. London: Pergamon Press; 1962:135–146.
4. Brawner C. O. Recent lessons that have been learned in open-pit mine stability. *Mining Engineering*. 1986; 38 (8): 823–830.
5. Donzé F. V., Bouchez J., Magnier S. A. Modeling Fractures in Rock Blasting. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 1997; 34(8): 1153–1163.
6. Maerz N. H. Reconstructing 3-D block size distributions from 2-D measurements on sections. In: *Proc. ISRM. N.H. Maerz, Fragblast 5 Workshop and Short Course on Fragmentation Measurement*. Montreal: A. A. Balkema Publishing; 1996. P. 39–43.
7. Maerz N. H., Palangio T. C., Franklin J. A. Wip Frag Image Based Granulometry System. In: *Proc. of the FRAGBLAST5 Workshop on Measurement of Blast Fragmentation*. Montreal, Quebec, Canada, 1996. P. 91–99.
8. Munjiza A., Owen R. J., Banic N. A Combined Finite-discrete Element Method in Transient Dynamics of Fracturing Solids. *Computations*. 1995; 12: 145–174.
9. Pears O. E. Rock Blasting. Some aspects on the theory and practice. *Mine and Quarry Eng.* 1985; 21 (1): 25–30.

10. Rustan A. Spacing and Borehole Diameter at Rock Blasting. In: *3rd Int. Symp. on Rock Frequentation by Blasting. Brisbane*, 1990. P. 303–310.
11. Selberg H. L. Transient compression waves from spherical and cylindrical cavities. *Archive for physics*. 1995; Band 5; 7: 307–314.
12. Rodionov V. N. et al. *Mechanic effect from underground detonation*. Moscow: Nedra Publishing; 1971. (In Russ.)
13. Rakishev B. R. *Forecasting technological parameters of exploded rock at wells*. Alma-Ata: Nauka Publishing; 1983. (In Russ.)
14. Kutuzov B. N., Rubtsov V. K. Physics of rock blasting destruction as applied to blasting operations. *Vzryvnoe delo = Explosion Technology*. 1963; 53/10: 31–36. (In Russ.)
15. Belenko F. A. Study of stress fields and the process of fissuring during column charges explosion in hard rock. In: *Theory of rock breaking under the action of a blast*. Moscow; 1958: 126–139. (In Russ.)
16. Zhigur L. Iu., Mezin A. I. Investigating the mechanism of explosive loading of rock in the zone of undercharging in a well. *Vzryvnoe delo = Explosion Technology*. 1984; 86/43: 221–225. (In Russ.)
17. Mosinets V. N. *Crushing and seismic effect from a blast in rock*. Moscow: Nedra Publishing; 1976. (In Russ.)

Received 25 December, 2018

Information about authors:

Ilkhom T. Mislibaev – DSc (Engineering), Associate professor, Dean of Mining Faculty, Navoiy State Mining Institute. E-mail: mislibaev65@mail.ru

Sherzod Sh. Zairov – DSc (Engineering), Associate professor, Vice Dean of Mining Faculty, Navoiy State Mining Institute. E-mail: sher-z@mail.ru

Bekzod Z. Soliev – Vice Dean of Mining Faculty, Navoiy State Mining Institute. E-mail: bek-848120@mail.ru

Akmal Iu. Norov – applicant PhD, Navoiy State Mining Institute. E-mail: akmal.norov.88@mail.ru

Для цитирования: Мислибаев И. Т., Заиров Ш. Ш., Солиев Б. З., Норов А. Ю. Исследование разрушения продуктивного пласта урана взрывом камуфлетного заряда взрывчатых веществ // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 4. С. 43–54. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-43-54

For citation: Mislibaev I. T., Zairov Sh. Sh., Soliev B. Z., Norov A. Iu. Study of uranium productive strata destruction by camouflet explosive charge detonation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 4: 43–54 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-43-54

ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА. АЭРОГАЗОДИНАМИКА

УДК 622.023.62

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-55-60

Анизотропия физико-механических свойств сланцевых пород Баженовской свиты

Шустов Д. В.¹

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия

e-mail: denispstu@mail.ru

Реферат

Введение. Определение физико-механических свойств анизотропных глинистых пород является важной и актуальной задачей, так как отложения глин, глинистых сланцев и аргиллитов весьма часто встречаются на нефтяных и газовых месторождениях. Есть данные, что аргиллиты и сланцы создают от 70 до 90 % всех проблем, связанных со стабильностью скважин, что обусловлено особенностями их физических и механических свойств.

Цель работы. На основе испытания образцов керна слоистых аргиллитов получить характеристики анизотропии упругих свойств пород.

Методология. Лабораторные исследования физико-механических свойств аргиллитов и сланцев имеют существенные особенности как в плане отбора керна и подготовки образцов, так и в методике проведения и обработки экспериментов. Эти особенности обусловлены чрезвычайно низкой проницаемостью, чувствительностью к буровым растворам на водной основе, анизотропией упругих и прочностных свойств вследствие их слоистой структуры. Рассмотрен опыт проведения испытаний образцов керна слоистых аргиллитов, выполнены испытания на оборудовании по программе консолидированно-недренированного нагружения в соответствии со стандартами ASTM.

Результаты. В результате экспериментов на образцах керна, выделенных вдоль и поперек слоистости, изучены анизотропные упругие свойства пород, а также их зависимости от геофизических параметров.

Выводы. Анизотропия упругих свойств существенным образом влияет как на напряженно-деформированное состояние при решении конкретных задач механики сплошной среды, так и на расчетные значения исходного поля напряжений в целом. Учет параметров анизотропии, полученных в данной работе, позволит решать задачи геомеханики применительно к слоистым аргиллитам Баженовской свиты.

Ключевые слова: геомеханика; анизотропия; прочность; упругость; слоистость; аргиллиты; лабораторные испытания; керн.

Введение. Определение физико-механических свойств анизотропных глинистых пород является важной и актуальной задачей, поскольку отложения глин, глинистых сланцев и аргиллитов весьма часто встречаются на нефтяных и газовых месторождениях. Есть данные, что аргиллиты и сланцы создают от 70 до 90 % всех проблем, связанных со стабильностью скважин, что обусловлено особенностями их физических и механических свойств [1, 2]. Лабораторные исследования физико-механических свойств аргиллитов и сланцев имеют существенные особенности как в плане отбора керна и подготовки образцов, так и в методике проведения и обработки экспериментов [3, 4]. Эти особенности обусловлены чрез-

вычайно низкой проницаемостью, чувствительностью к буровым растворам на водной основе, анизотропией упругих и прочностных свойств вследствие их слоистой структуры.

Объекты и методы исследований. По сравнению с изотропным массивом, для трансверсально-изотропной среды требуется определение пяти упругих констант вместо двух (E_1 , E_2 , G_2 , v_1 , v_2), что подразумевает изготовление образцов разной ориентировки относительно слоистости [3, 4]. Кроме этого, предъявляются повышенные требования к отбору, транспортировке и хранению керна, поскольку его свойства весьма существенно меняются при нарушении природного состояния. Нарушение технологий отбора и подготовки керна может привести к полной невозможности изготовления образцов.

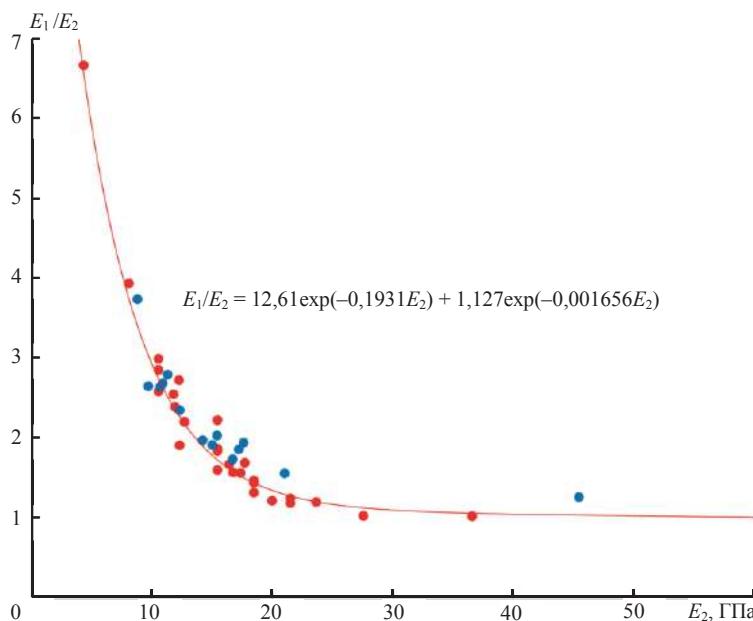


Рис. 1. Зависимость отношения модулей упругости E_1/E_2 от модуля упругости E_2

Fig. 1. Dependence between the ratio of elasticity moduli E_1/E_2 and elasticity modulus E_2

Подобные проблемы возникли при исследовании керна Фроловской, Баженовской и Абалакской свит Средне-Назымского месторождения Западной Сибири. Статические и динамические упругие и прочностные характеристики пород были необходимы для создания геолого-геомеханической 3D-модели месторождения с целью последующего анализа устойчивости скважин и проектирования операций многозонного гидроразрыва пласта (ГРП) [1].

Керновый материал, полученный по одной из скважин, был в неудовлетворительном состоянии: керн практически утратил природную влажность, произошло растрескивание и разрушение по слоистости. Однако из отдельных неповрежденных монолитов удалось изготовить образцы нестандартного размера диаметром 77–79 мм, ориентированные перпендикулярно слоистости. Проведение испытаний нестандартных образцов потребовало доработки установки ПИК-УИДК/ПЛ.

Результаты испытаний на таких образцах позволили получить деформационные и прочностные характеристики для образцов, ориентированных по оси скважины, т. е. перпендикулярно слоистости.

Образцы испытывались в сухом состоянии, поскольку их естественная влажность была утеряна, а насыщение могло повлечь дополнительные изменения структуры и свойств образцов. То есть фактически при испытаниях данных образцов определялись упругие модули E_2 и v_2 в дренированных условиях. В дальнейшем при бурении двух новых скважин удалось получить керн стандартного размера 30 × 60 мм, естественной влажности и в кратчайшие сроки провести на нем испытания. Образцы выпиливались как вдоль, так и поперек слоистости и исследовались по схеме консолидированно-недренированного нагружения, так как в случае низкопроницаемых пород для обеспечения дренированных условий требуются предельно низкие скорости нагружения (10^{-7} – 10^{-8} с⁻¹), что означает неприемлемо большие затраты времени [5–8].

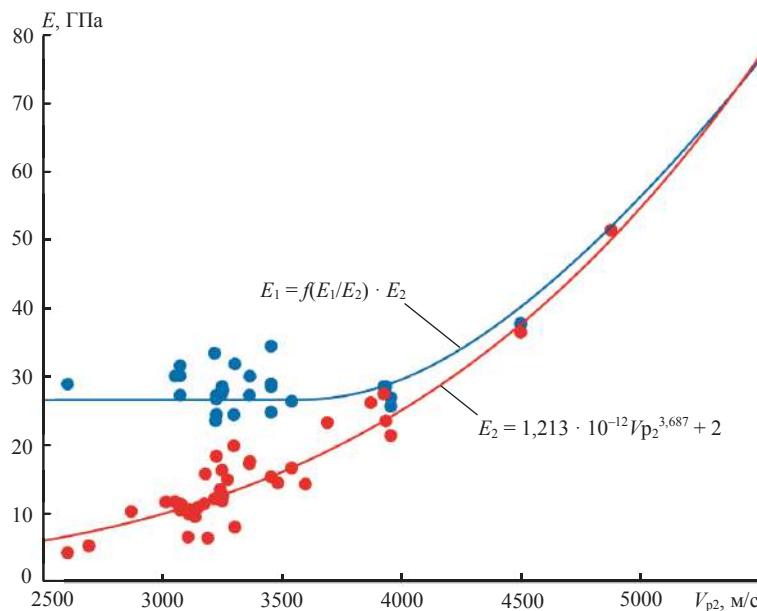


Рис. 2. Зависимость упругих параметров, полученных при недренированном нагружении, от скорости продольной волны

Fig. 2. Dependence between elastic parameters obtained under undrained loading and compression wave velocity

Исследования образцов, ориентированных перпендикулярно и параллельно слоистости, позволили определить упругие константы E_2 , v_2 (перпендикулярно слоистости) и E_1 (параллельно слоистости). Коэффициент Пуассона v_1 на образцах цилиндрической формы определить невозможно. Модуль сдвига G_2 крайне сложно определить экспериментальным путем, вследствие чего использовалась приближенная зависимость, приведенная в [2, 6]: $G_2 \approx 0,5E_2/(1-v_2)$.

Результаты. Для определения анизотропии упругих свойств необходимы испытания расположенных рядом образцов, выпиленных вдоль и поперек слоистости, со схожими свойствами и минералогическим составом. При выполнении данной работы выпиливать образцы в непосредственной близости друг от друга удавалось не всегда. Исходя из этого, максимальное расстояние между соседними образцами принималось 0,15 м, также производилась оценка схожести образцов по минералогическому составу. Для каждого образца определялись скорости прохождения продольных и поперечных волн, а также статические упругие модули (рис. 1).

На рис. 1 красными точками показаны результаты текущих испытаний, синими приведены данные испытаний слоистых аргиллитов Северной Америки [9]. Можно видеть, что испытания дали достаточно близкие результаты.

В ходе проведения экспериментов определялась скорость прохождения продольной волны [10–12], что позволило получить зависимость соответствующих упругих модулей от данного параметра. На рис. 2 представлены зависимости модуля упругости как перпендикулярно, так и параллельно слоистости от скорости продольной волны. Модуль упругости E_1 в интервале скоростей продольной волны 2500–4000 м/с практически не изменяется и составляет 25–35 ГПа, в то время как модуль упругости E_2 на данном интервале закономерно падает с 25 до 7 ГПа.

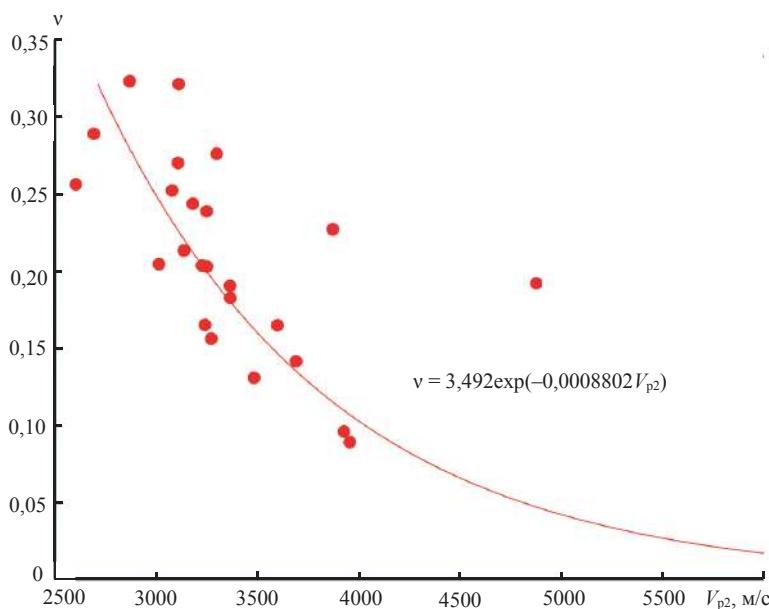


Рис. 3. Зависимость коэффициента Пуассона образцов, ориентированных перпендикулярно напластованию, от скорости продольной волны
Fig. 3. Dependence between the Poisson coefficient of samples oriented perpendicular to bedding and longitudinal wave velocity

Разница в количестве образцов, выпиленных вдоль и поперек слоистости – точек, приведенных на рис. 1 – вызвана способом их отображения. Вследствие того, что осью ординат выбрана скорость пробега продольной волны поперечных образцов V_{p2} (в соответствии с направлением прохождения упругих волн при акустических исследованиях в вертикальной скважине), поперечные образцы могут быть приведены все, а продольные – только парные к поперечным.

Вторым, не менее значимым, параметром является коэффициент Пуассона. Его определение для анизотропной среды сопряжено с более серьезными трудностями, нежели определение модулей упругости E_1 и E_2 . В рамках проведения эксперимента удалось получить только значения v_2 пород, расположенных перпендикулярно слоистости. На рис. 3 представлена зависимость данного параметра от скорости продольной волны. Как видно, имеется определенная зависимость статического коэффициента Пуассона от скорости продольной волны в интервале скоростей 2500–4000 м/с.

Выводы. Таким образом, удалось получить зависимости для анизотропных модулей упругости от единого параметра, характеризующего скорость пробега

продольных волн, с целью последующей привязки ГИС и использования при построении геомеханической модели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ашихмин С. Г., Кашников Ю. А., Шустов Д. В., Кухтинский А. Э. Влияние анизотропии упругих и прочностных свойств пород на устойчивость наклонной скважины // Нефтяное хозяйство. 2018. № 8. С. 21–24.
2. Fjaer E. et al. Petroleum related rock mechanics. 2nd edition. Elsevier, 2008. 515 с.
3. Вахрушева И. А., Гильманов Я. И., Костин Д. К. Современные технологии отбора и транспортировки керна как основа качественного его исследования // Научно-технический вестник ОАО НК «РОСНЕФТЬ». № 2. 2014. С. 68–70.
4. Тихоцкий С. А., Фокин И. В., Баюк И. О., Белобородов Д. Е., Березина И. А., Гафурова Д. Р., Дубния Н. В., Краснова М. А., Корост Д. В., Макарова А. А., Патонин А. В., Пономарев А. В., Хамидуллин Р. А., Цельмович В. А. Комплексные лабораторные исследования керна в ЦПГИ ИФЗ РАН // Наука и технологические разработки. 2017. Т. 96. № 2. С. 17–32.
5. Amadei B. Rock anisotropy and the theory of stress measurements. Springer-Verlag, 1983.
6. Cheng A. H.-D. Material coefficients of anisotropic poroelasticity. Int. J. Rock Mech. Miner. Sci. 1997. No. 34 (2). P. 199–205.
7. ASTM D7012-14. Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures. URL: <https://www.astm.org/Standards/D7012.htm> (дата обращения 19.04.2019)
8. Loret B., Rizzi E., Zerfa Z. Relations between drained and undrained moduli in anisotropic poroelasticity // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2001. No. 49 (11). P. 2593–2619.
9. Hiroki Sone. Mechanical properties of shale gas reservoir rocks and its relation to the in-situ stress variation observed in shale gas reservoirs. PhD thesis, 2012.
10. Berryman J. G., Nakagawa S. Inverse problem in anisotropic poroelasticity: drained constants from undrained ultrasound measurements // Journal of the Acoustical Society of America. 2010. No. 127(2). P. 720–729.
11. Youn H., Tonon F. Multi-stage triaxial test on brittle rock // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2010. No. 47. P. 678–684.
12. Charlez F. P. Rock mechanics. Petroleum applications. Vol. 2. Paris, 1997.

Поступила в редакцию 4 февраля 2019 года

Сведения об авторах:

Шустов Денис Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры маркшейдерского дела, геодезии и геоинформационных систем Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: denispstu@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-55-60

Bazhen Formation shale rock physical and mechanical properties anisotropy

Denis V. Shustov¹

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia.

Abstract

Introduction. Anisotropic clay rocks mechanical properties determination is an important and relevant problem, because the sediments of clays, clay shales and argillites are quite often present in oil and gas fields. It is reported that mudstones and shales are the reason for 70–90% of all problems associated with wells stability, which is due to the peculiarities of their physical and mechanical properties.

Research aims to obtain the anisotropy characteristics of rocks elastic properties based on bedded argillites core samples testing.

Methodology. Laboratory studies of argillites and shales physical and mechanical properties have significant features in both core sampling and sample preparation and experimental procedure and processing methodology. These features are due to extremely low permeability, sensitivity to water-based drilling mud, and strong anisotropy of elastic and strength properties caused by their bedded structure. The experience of testing bedded argillites core samples is considered. The tests were carried out on the equipment available under the consolidated undrained loading program in accordance with ASTM standards.

Results. Anisotropic elastic properties of the rocks and their dependence on geophysical parameters were studied in the course of tests on core samples drilled along and across the bedding.

Conclusion. The elastic properties anisotropy significantly affects both the stress-strain state when solving specific problems of continuum mechanics and the calculated values of the initial stress field as a whole. Accounting for the anisotropy parameters obtained in this work will allow solving the problems of geomechanics as applied to bedded argillites of the Bazhen Formation.

Key words: geomechanics; anisotropy; strength; elasticity; bedding; argillites; laboratory tests; core sample.

REFERENCES

1. Ashikhmin S. G., Kashnikov Iu. A., Shustov D. V., Kukhtinskii A. E. Anisotropic effect of elastic and strength properties of rock on the downhole stability. *Neftianoe khoziaistvo = Oil Industry*. 2018; 8: 21–24. (In Russ.)
2. Fjaer E. et al. *Petroleum related rock mechanics. 2nd edition*. Elseveir, 2008. 515 p.
3. Vakhrusheva I. A., Gilmanov Ia. I., Kostin D. K. Modern technologies of coring and core transportation as basement for good quality core analysis. *Nauchno-tehnicheskii vestnik OAO NK «ROSNEFT» = Rosneft Research and Technology Bulletin*. 2014; 2: 68–70. (In Russ.)
4. Tikhotskii S. A., Fokin I. V., Baiuk I. O. Complex of laboratory core analysis at CPGR IPE RAS. *Nauka i tekhnologicheskie razrabotki = Science and Technological Developments*. 2017; 96 (2): 17–32. (In Russ.)
5. Amadei B. *Rock anisotropy and the theory of stress measurements*. Springer-Verlag, 1983.
6. Cheng A. H.-D. Material coefficients of anisotropic poroelasticity. *Int. J. Rock Mech. Miner. Sci.* 1997; 34 (2): 199–205.
7. ASTM D7012-14. Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures. Available from: <https://www.astm.org/Standards/D7012.htm> [Accessed 19th April 2019]
8. Loret B., Rizzi E., Zerfa Z. Relations between drained and undrained moduli in anisotropic poroelasticity. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2001; 49 (11): 2593–2619.
9. Hiroki Sone. *Mechanical properties of shale gas reservoir rocks and its relation to the in-situ stress variation observed in shale gas reservoirs*. PhD thesis, 2012.
10. Berryman J. G., Nakagawa S. Inverse problem in anisotropic poroelasticity: drained constants from undrained ultrasound measurements. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2010; 127(2): 720–729.
11. Youn H., Tonon F. Multi-stage triaxial test on brittle rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2010; 47: 678–684.
12. Charlez F. P. *Rock mechanics. Petroleum applications*. Vol. 2. Paris, 1997.

Received 4 February, 2019

Information about authors:

Denis V. Shustov – PhD (Engineering), associate professor of the Department of Mine Surveying, Geodesy, and Geoinformation Systems, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: denispstu@mail.ru

Для цитирования: Шустов Д. В. Анизотропия физико-механических свойств сланцевых пород Баженовской свиты // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 4. С. 55–60. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-55-60

For citation: Shustov D. V. Bazhen Formation shale rock physical and mechanical properties anisotropy. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 4: 55–60 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-55-60

ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ И НЕФТЕГАЗОВАЯ ГЕОЛОГИЯ, ГЕОФИЗИКА

УДК 551.24+550.83

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-61-70

Generalizing the experience of forecasting dynamic events at the Upper Kama potassium salt deposit according to geological and geophysical data

Vladimir V. Filatov¹, Liubov A. Bolotnova^{2*}

¹ Vladimir State University, Vladimir, Russia

² Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

*e-mail: l.bolotnova@yandex.ru

Abstract

Introduction. Mineral deposits opencast and underground mining is accompanied by excavation and conveyance of enormous rock masses. As a result, geological medium natural stress state is disturbed. Its balance restoration is accompanied by dynamic events of various forms and intensity, often catastrophic. That is why the problem of deposits safe exploitation is relevant in scientific and practical terms. At the territory of the Ural region there are several regions where the level of technogenic load is estimated to be potentially dangerous. One such region is Solikamsk-Berezniki region; the largest in the world, the Upper Kama (Verkhnekamskoe) potassium salt deposit (VKMKS) has been mined there since 1932, along with hydrocarbon, underground waters, and other mineral deposits. There is also a large reservoir there. Geological medium within the deposit is in the state of unstable balance. Catastrophic dynamic events of 1995, 1999, and 2006 give evidences of this.

Research aim is to generalize the experience of studying dynamic events at VKMKS and substantiate the criteria of their forecasting.

Research methodology. Generalization and analysis of the results of geological and geophysical survey made at VKMKS.

Research results. Structural-tectonic models of the Upper Kama deposit and its separate parts have been built, within the limits of which hazardous dynamic events took place.

Conclusions. Features characterizing deposit sites within which dynamic events took place have been formulated. These features can be considered as criteria for potential dynamic events forecast.

Key words: Upper Kama (Verkhnekamskoe) potassium salt deposit; dynamic events; forecasting; criteria; geological and geophysical data.

Object and aim of research. When studying geological medium, the problem of determining genesis and nature of this or that event or object is fundamental. This problem has got satisfactory solution if we know the mechanism or mechanisms through which the event took place or the object formed. Having answered this question, we can forecast the development of an event in time and space.

Time-space sequence of geological events, their interrelation and conditions they happen under, are complex and often difficult to study. That is why geological events are studies at the phenomenological level, i. e. without their nature determination. And, nevertheless, descriptive research of geological events often allows to describe the observable facts correctly and even forecast their space-time evolution.

Empirical facts generalization and systematization is finished by the construction of a model (or models) of the studied event. Models in the form of maps are the most

widespread in geology: geological, tectonic, structural, petrophysical, geological-physical, etc.

Research methodology. As regards methodology, the problem of building a model of an event or an object is assigned to inverse problems; multiple solutions (theoretically infinite) are their main feature. This means that several models can be built as a result

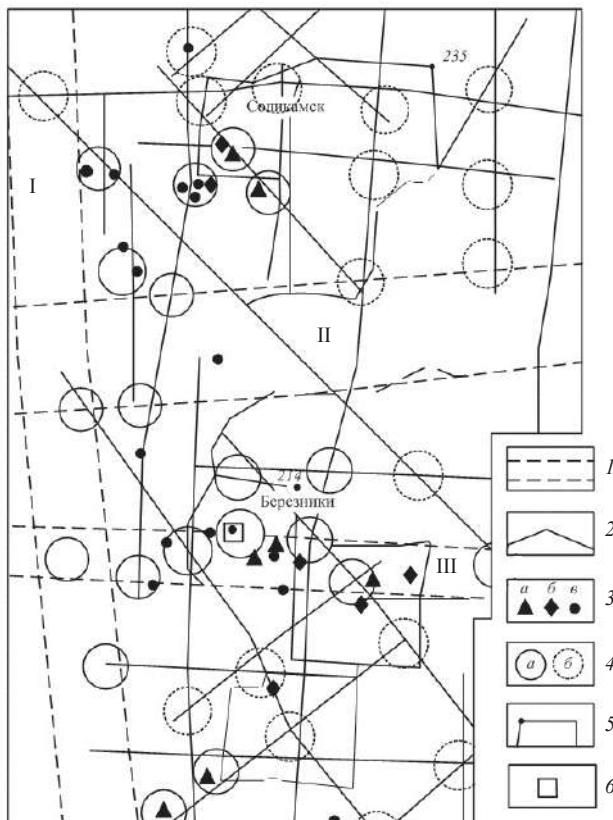


Fig. 1. Structural-tectonic scheme of VKMKS and the location of the forecasted sites of dynamic events:

1 – fracture zones: I – Krasnoufimskii, II – Durinskii, III – Zyrianskii; 2 – the axial lines of fracture zones; 3 – the epicentres of earthquakes – *a*, seismic events – *b*; caves-in and the sites of earth's surface increased subsidence – *e*; 4 – the sites of the forecasted dynamic events: steadily marked out – *a*, less steadily marked out – *b*; 5 – the location of wells and contours of mine fields; 6 – the site of the accident, October 2006.

Рис. 1. Структурно-тектоническая схема ВКМКС и положение прогнозируемых участков динамических событий:

1 – зоны разломов: I – Красноуфимского, II – Дуринского, III – Зырянского; 2 – осевые линии разломных зон; 3 – эпицентры землетрясений – *a*, сейсмопроявления – *b*, провалы и участки ускоренного оседания дневной поверхности – *e*; 4 – участки прогнозируемых динамических событий: выделяемые уверенно – *a*, выделяемые менее уверенно – *b*; 5 – положение скважин и контуров шахтных полей; 6 – место аварии в октябре 2006 г.

of generalizing and interpreting one set of actual data. Which one of them is going to be the most probable? Unfortunately, the criterion, allowing to make an unambiguous choice, has not been formulated yet. The priority should be given to the model describing the major part of the observed facts. Apparently, this model will make it possible to forecast the development of this or that event sufficiently.

The mentioned criterion is particularly suited for the study of technogenic dynamic events taking place within relatively short periods of time, amounting to years or decades. They are common with the regions of intensive urbanization, regions, where deposits are mined, and geological medium loses its balance under significant technogenic load, and the restoration of balance is accompanied with such dynamic events as induced earthquakes, rock bursts, caves-in, and the earth's surface collapse.

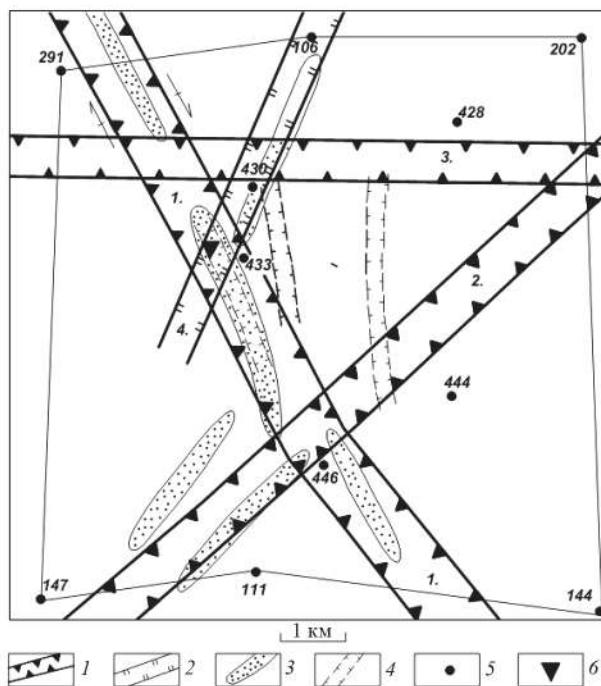


Fig. 2. The scheme of Balakhontsevskii (BKRU-3) site tectonics elements according to geophysical data:

1 – fracture zones of the 3rd order, marked out mainly by gravimetric data; 2 – the same, 4th order (according to L. D. Noiaksova and G. G. Kassin); 3 – zones of increased rock fracture at the suprasalt strata, marked out by gravimetric data; 4 – zones of increased electrical conductivity conditioned by suprasalt strata fractured rock (according to V. P. Beliaev); 5 – the location of wells and their numbers; 6 – the point of brines outflow

Рис. 2. Схема элементов тектоники Балахонцевского (БКРУ-3) участка по геофизическим данным:

1 – зоны разломов 3-го ранга, выделенные преимущественно по гравиметрическим данным; 2 – то же, 4-го ранга (по Л. Д. Нояксовой и Г. Г. Кассину); 3 – зоны повышенной трещиноватости пород надсолианой толщи, выделенные по гравиметрическим данным; 4 – зоны повышенной электропроводности, обусловленные трещиноватыми породами надсолианой толщи (по В. П. Беляеву); 5 – положение скважин и их номера; 6 – место истечения рассолов

The problem concerning dynamic zoning and spatial forecasting of the areas with the most probable dynamic events manifestation is an important problem of urban lands study. The basis for its solution is the model of structural-tectonic and dynamic structure and properties of geological medium at various scale levels, as soon as these are the exact factors which determine dynamic behaviour conditioned by natural and technogenic force fields [1–5].

Research results. This problem has been solved (to some extent) through the study of VKMKS. By means of generalizing various empirical data: geological, structural-tectonic, geomorphological, petrophysical, geophysical (the results of detailed high-

precision gravimetric observation with a scale of 1 : 25 000, the results of gravimetric observation with a scale of 1 : 100 000, the results of high-precision detailed aeromagnetic survey with a scale of 1 : 10 000) and other [6–8], based on the principles of similarity and hierarchy, a structural-tectonic model of the deposit (fig. 1) has been built in the form of the system of ganged faults with their kinematic type characteristics at various development stages, activation time and penetration depth estimations, determination of their monitoring role under the modern dynamic behaviour, and the establishment of the main types of local structures, strongly influencing the formation of a technogenic stress field (force field).

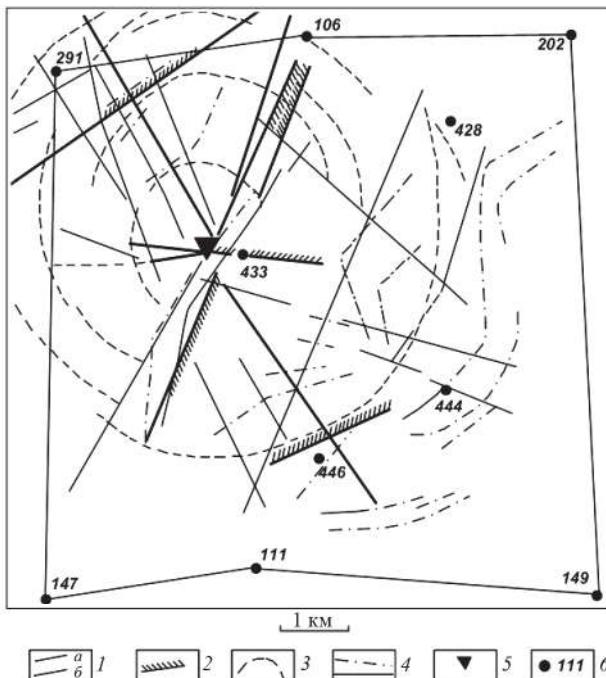


Fig. 3. The scheme of the elements fracture tectonics of Balakhontsevskii site (BKRU-3) by geomorphological data (according to S. Yu. Kvitskin):

1 – lineaments reflecting fracture zones in the sedimentary cover – α , with the increased fractures propagation – β (according to Yu. A. Ilyinykh); 2 – the zones of the predicted increased infiltration of surface waters according to Yu. A. Ilyinykh; 3 – the outlines of landscape anomaly according to Yu. A. Ilyinykh; 4 – tectonic zones (according to Yu. A. Tretiakov); 5 – the point of brines outflow; 6 – the location of wells and their numbers
Рис. 3. Схема элементов разрывной тектоники Балахонцевского участка (БКРУ-3) по геоморфологическим данным (по С. Ю. Квиткину):

1 – линеаменты, отображающие трещинно-разрывные зоны в осадочном чехле – α , с повышенным раскрытием трещин – β (по Ю. А. Ильиных); 2 – зоны предполагаемой повышенной инфильтрации поверхностных вод (по Ю. А. Ильиных); 3 – контуры ландшафтной аномалии (по Ю. А. Ильиных); 4 – тектонические зоны (по Ю. А. Третякову); 5 – место истечения рассолов; 6 – положение скважин и их номера

During the study of VKMKS tectonic structure and dynamic behaviour, it has been stated that the epicentres of dynamic events (induced earthquakes, rock bursts, etc.) are spatially and genetically connected with the following tectonic structures: fracture zones, active faults of various ranks and the intersection nodes of faults.

As the blocks of geological medium move along the fracture zones, elastic energy accumulates and discharges in the form of various dynamic events. It is generally

accepted that earthquakes (as a type of dynamic events), especially minor, are generated by crust fractures. This conclusion is considered to be one of the most significant achievements of modern seismology [3].

In this regard, let us refer to the study of dynamic events at the territory of VKMKS:

- 24 epicentres of dynamic events out of 25 are located within the fracture zones;
- more than half of epicentres of dynamic events are in the intersection nodes of two or more fracture zones;

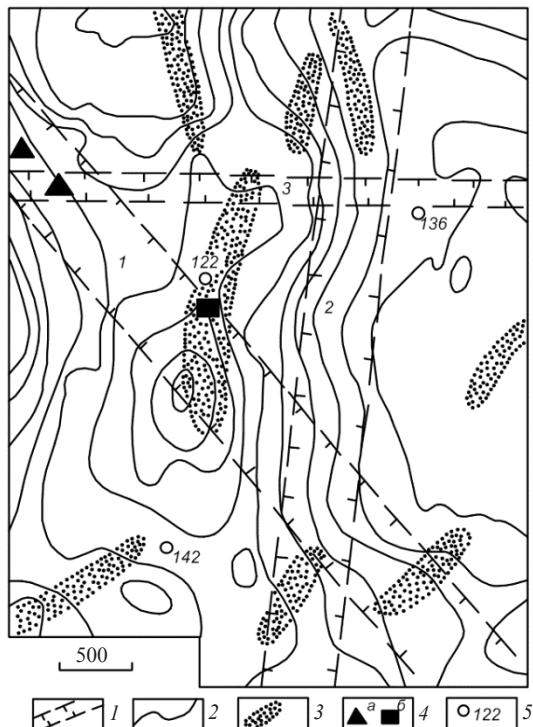


Fig. 4. The scheme of Solikamsk node structure (SKRU-2):
1 – fracture zones established by geophysical data (1 – Timan-Kokshetau fault); 2 – isoanomalies of the gravity field; 3 – local negative anomalies in the gravity field; 4 – the location of earthquake's epicentre – a and other dynamic events – b; 5 – the location of wells and their numbers

Рис. 4. Схема Соликамской узловой структуры (СКРУ-2):
1 – зоны разломов, установленные по геофизическим данным (1 – Тимано-Кокчетавский разлом); 2 – изоаномалии поля силы тяжести; 3 – локальные отрицательные аномалии в поле силы тяжести; 4 – положение эпицентра землетрясения – a и других динамических событий – b; 5 – положение скважин и их номера

– the major part of dynamic events took place in the east part of VKMKS, the activity of which is conditioned by three factors: the influence of the Upper Kama Reservoir, Krasnoufimsky deep fault, active at the modern stage of tectogenesis, and high speed of the earth's surface motion (up to 6 mm per year) [1].

The nodes, the elements of which are faults and fracture zones, have got the most complex structure; node structures strongly influence the formation of natural and technogenic force fields (stress fields).

The analysis of these structures properties has shown that the probability of forecasting dynamic events within their epicentres is very high and depends on a great number of factors [4]:

- the number and the type of dynamic events which occurred within the area of the node;
- the presence of active faults in the node structure;
- the number of faults forming the structure;
- the presence of the sites of increased fracturing at the area of node structure;
- the distance to the nearest dynamic event epicentre;
- the presence of negative anomaly in the gravity field at the area of node structure;
- the presence of helium anomaly at the area of node structure;
- the presence of structural complications in the relief of crust deep horizons within the area of node structure;
- the distance between the node structure and the edge part of a growing salt dome;
- the distance between the node structure and the nearest large reservoir;
- the presence of a mine within the area of node structure;
- kinematic type and azimuth of strike of faults, forming the node structure;
- variation of the earth's surface relief height at the area of node structure;
- the distance to the nearest node structure;
- the character of lineaments at the area of node structure according to the results of space and aero images interpretation;
- the character of river system at the area of node structure;
- the presence of troubles in shearing kinematics among the faults forming the tectonic node [9].

The set of the enumerated features (criteria) with the account of the results of seismic monitoring [10, 11] is not random. It reflects the state of geological medium under the action of two force fields, natural and technogenic. It is impossible to estimate the weight and the role of each feature as well as the informative completeness of the whole set of the features and what should be done for this set to grow into a new quality, i. e. into the system of forecasting features. Nevertheless, structural-tectonic scheme of VKMKS (fig. 1), which has got the features described earlier at bottom, should be considered as adequately substantiated and used to forecast dynamic events.

Up to 1986 technogenic loads never led to geological medium disturbances at VKMKS. The first catastrophic event happened in autumn, 1986. That event resulted in mine BKRU-3 flooding (fig. 2, 3). In 1995 there was an induced earthquake in SKRU-2 mine with collapse of significant rock mass into the goaf (fig. 4). In 1999 in the vicinity of Novaia Zyrianka village within the limits of BKRU-1 mine, a chain of caves-in appeared at the earth's surface (fig. 5). In October 2006 there was a catastrophic flooding of BKRU-1 mine (fig. 6). These events testify to the presence of systematic disturbances of geological medium happened under the action of technogenic load conditioned by the deposit exploitation.

In the course of studying these events, structural-tectonic conditions they occur under, have been analysed.

The region of flooded mine BKRU-3 (Balakhontsevskii site) is characterized by hierarchical node structure and represents three blocks put one into another and limited by the faults of various ranks of north-south, north-west, and north-east strike (fig. 2). The flooded region epicentre, the point of brine outflow, is the intersection node of faults of east-west north-west, and north-east strike, and fracture zone which is steadily mapped in gravity and electric fields. Faults in the plan coincide with the lineaments. It testifies to the fact that motions along the faults occurred in the contemporary history. The faults are strike-slip faults. At the earth's surface relief, the node structure is connected with the landscape anomaly – the upheaval with the radius of 6–7 km, complicated by the ring-type tectonic troubles conforming to relief isohypsuses. In the plan, the centre of landscape anomaly coincides with the point of brines outflow. The dynamic influence area radius of faults forming the node structure has been ranked

at 3–4 km. According to [2], within the mine field of BKRU-3, polygene dislocations are developed which are formed during underground water migration in the suprasalt and salt parts of the salt-marl strata in the points of ancient discharge channels. These locations should be considered as one feature of node structure tectonic activity, while brines could inflow through the channels.

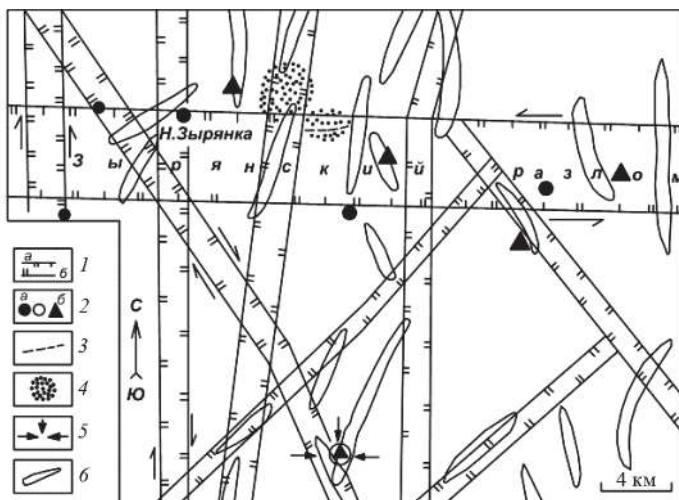


Fig. 5. The fragment of the Upper Kama deposit tectonic scheme in the area of Zyrianskii fault:

1 – fracture zones and the time of their activation by geophysical data:
 α – Paleozoic and earlier, δ – contemporary (arrows indicate the direction of shift along the fracture zone); 2 – the location of dynamic events epicentres (according to V. M. Nezhdanov): α – earthquakes and seismic events, δ – earth's surface subsidence; 3 – linear zone of caves-in of the earth's surface in 1999; 4 – the points of rock and gas pressure manifestation; 5 – the location of the cave-in at the place of BKRU-3 mine flooding; 6 – the sites of increased fracturing of geological medium

Рис. 5. Фрагмент тектонической схемы Верхнекамского месторождения в районе Зырянского разлома:

1 – зоны разломов и время их активизации по геофизическим данным:
 α – палеозойское и более позднее, δ – новейшее (стрелками показано направление сдвигания вдоль разломной зоны); 2 – положение эпицентров динамических событий (по В. М. Нежданову): α – землетрясения и сейсмопроявления, δ – оседание дневной поверхности; 3 – линейная зона провалов дневной поверхности в 1999 г.; 4 – места проявления горного и газового давления; 5 – положение провала на месте затопления рудника БКРУ-3; 6 – участки повышенной трещиноватости геологической среды

The epicentre of the induced earthquake of 1995 was also located in the node structure limited by three faults: ancient deep Timan-Kokshetau fault of north-west strike, submeridional fault of Paleozoic age, and latitudinal fault of post-Paleozoic age; gravity field of a node structure is characterized by isometric, negative in the plan, anomaly (fig. 4). Geological structure of a node is complex both at suprasalt horizons (disjunctive and fracture zones), salt (halitization of sylvinites), and undersalt (tectonic troubles, Pashkovsky reefogenic upheaval). Seismic works in the node stated the increased fragmentation of cover rocks and tectonic troubles permeating the undersalt and suprasalt strata. The results of gravity force anomaly interpretation testify to the fact that the anomaly is conditioned by rock weakening and that the weakening process spreads to both productive and suprasalt rock. Weakening is not of lithological, but of tectonic nature pointing to the deposit's waterproof strata trouble.

At the course of VKMKS territory geodynamic zoning according to the set of geological and geophysical data, a sublatitudinal Novo-Zyrianskii fault with shear kinematics (fig. 5) has been mapped and assigned to the category of active faults.

The fault lies in the south part of the mine field of BKRU-1 mine. The conclusion about the fault's activity was proved in May, 1999 when within several days along the whole axis at the earth's surface, an echelon chain of caves-in occurred 2–4 m deep and about 1 m wide. Caves-in formed two sublatitudinal zones in the plan. The most pronounced of them was the southern one, about 2 km long. The planimetric position of some caves-in coincided with the earth's surface projections of das-dynamic manifestation sites in mine workings, which pointed at their possible interconnection. Caves-in were of tectonic nature and, apparently, formed as a result of a horizontal shear along the axial part of the Novo-Zyrianskii fault.



Fig. 6. Cave-in in Berezniki city at BKRU-1, October, 2006.
Рис. 6. Провал в г. Березники на БКРУ-1, октябрь 2006 г.

Another catastrophe occurred in October, 2006 within the limits of BKRU-1 mine field [12]. As the results of underground water inburst, the mine was flooded. The epicentre of the accident was situated within the dynamic influence of Novo-Zyrianskii active fault (fig. 5). In structural-tectonic terms the area of the accident represents a node structure formed by the sublatitudinal fracture zone and Novo-Zyrianskii fault. Tectonic node structure is situated at the west slope of the growing Bereznikovskii salt dome. Fracture zone (FZ) – is the fault of the fourth or fifth order, being the fragment of the system of deformational structures of Krasnoufimskii deep fault; according to gravimetrical data, FZ troubles the continuity of VKMKS sedimentary strata increasing its permeability for hundreds of meters vertically [12].

Results analysis and discussion. Thus, all dynamic events which occurred within the past thirty years at the territory of VKMKS, in structural-tectonic terms, are genetically and spatially connected to the fracture zones, active faults, and tectonic node structures, which are characterized by a large number of factors and features.

Conclusions and scope of results. The experience of studying forecasting features has shown that they are stable and they repeat within the limits of all investigated sites of the deposit where hazardous dynamic events occurred. That is why they should be used to forecast dynamic events.

REFERENCES

1. Blumin M. A., Ulitin R. V. The scheme of Ural earth's surface contemporary vertical motions velocities gradients. Scale 1 : 2500000. Sverdlovsk: USC AS USSR Publishing; 1983. (In Russ.)
2. Dzhinoridze N. M. Petrotectonic fundamentals of safe exploitation of the Upper Kama potassium-magnesium salt deposit. St. Peterburg–Solikamsk: OGUP Publishing; 2000. (In Russ.)

3. Kasakhara K. Earthquake mechanics. Moscow: Mir Publishing; 1985. (In Russ.)
4. Kassin G. G., Filatov V. V. On the problem of forecasting geodynamic events at the territory of the Upper Kama potassium salt deposit. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*; 2002; 3: 153–164. (In Russ.)
5. Konstantinova S. A., Chernopazov S. A., Gulyaev A. A. Estimate of initial stresses in rock mass of the Upper Kama region based on block hierarchical model. *Journal of Mining Science*. 2001; 37(5): 447–454. (In Russ.)
6. Khristenko L. A., Stepanov Iu. I., Parshakov E. I. Content analysis of the results of electrical prospecting within the limits of the Upper Kama potassium-magnesium salt deposit. In: *Theory and practice of geological interpretation of gravity, magnetic, and electric fields: proceedings*. Issue 1(46). Perm: MI UB RAS, Perm State University Publishing; 2019: 361–363. (In Russ.)
7. Shkiria M. S., Bogdanovich D. V., Aikasheva N. A., Belova A. Iu., Bukhalov S. V., Zhukov A. A., Davydenko Iu. A. Estimation of the state of the waterproof strata at the Upper Kama salt deposit according to the results of the three-dimensional inversion of surface electromagnetic sounding. In: *Theory and practice of geological interpretation of gravity, magnetic, and electric fields: proceedings*. Issue 1(46). Perm: MI UB RAS, Perm State University Publishing; 2019: 385–389. (In Russ.)
8. Iaitskii N. N., Kas'ianov V. V., Mel'nikova M. V., Khalilin I. E. Detection and mapping of fluid saturated cavern-fracture zones by the complex of geophysical fields. In: *Theory and practice of geological interpretation of gravity, magnetic, and electric fields: proceedings*. Issue 1(46). Perm: MI UB RAS, Perm State University Publishing; 2019: 395–397. (In Russ.)
9. Philatov V., Bolotnova L., Vandyshova K. Horizontal shear zones and their reflection in gravitational fields. Practical and Theoretical Aspect of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Eleceric Filds. In: *Proc. of the 45th Uspensky Int. Geophysical Seminar, Kazan, Russia*. 2019: 339–347.
10. Sanfirrov I. A., Stepanov Y. I., Fatkin K. B., Gerasimova I. Y., Nikiforova A. I. Shallow geophysical exploration of the Upper Kama potash salt deposit. *Journal of Mining Science*. 2013; 49 (6): 902–907.
11. Shulakov D. Yu., Butyrin P. G., Verkholtsev A. V. Seismological monitoring at the Upper Kama potash deposit: objectives, problems, solutions. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2018; 6: 25–29.
12. Filatov V. V., Bolotnova L. A. The forecast of dynamic events by the data of gravity prospecting at the Upper Kama potassium salt deposit. In: *Theory and practice of geological interpretation of gravity, magnetic, and electric fields: proceedings*. Issue 1(46). Perm: MI UB RAS, Perm State University Publishing; 2019: 352–356. (In Russ.)

Received 27 February, 2019

Information about authors:

Vladimir V. Filatov – DSc (Geology and Mineralogy), Professor, the Head of the Department of Strength of Materials, Vladimir State University. E-mail: filatov47@bk.ru

Liubov A. Bolotnova – PhD (Geology and Mineralogy), associate professor of the Department of Geophysics, Ural State Mining University. E-mail: l.bolotnova@yandex.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-61-70

Обобщение опыта прогнозирования динамических явлений на Верхнекамском месторождении калийных солей по геолого-геофизическим данным

Филатов В. В.¹, Болотнова Л. А.²

¹ Владимирский государственный университет, Владимир, Россия.

² Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.

Реферат

Введение. Эксплуатация месторождений полезных ископаемых, добываемых открытым и подземным способами, сопровождается выемкой и перемещением огромных масс горной породы. В результате происходит нарушение естественного напряженного состояния геологической среды. Восстановление ее равновесия сопровождается различными по форме и интенсивности динамическими явлениями, нередко катастрофическими. Поэтому проблема безопасной эксплуатации месторождений актуальна в научном и практическом отношениях. На территории Уральского региона есть несколько районов, в пределах которых уровень техногенной нагрузки на геологическую среду оценивается как потенциально опасный. Одним из таких районов является Соликамско-Березниковский, где с 1932 г. ведется разработка крупнейшего в мире Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМК), месторождений углеводородов, подземных вод, других полезных ископаемых, а также имеется крупное водохранилище. Геологическая среда в пределах месторождения находится в состоянии неустойчивого равновесия, о чем свидетельствуют катастрофические динамические явления, произошедшие в 1986, 1995, 1999 и 2006 гг.

Целью работы является обобщение опыта изучения динамических событий, произошедших на ВКМК, и обоснование критериев их прогнозирования.

Методика исследований. Обобщение и анализ результатов геолого-геофизических исследований, выполненных на ВКМКС.

Результаты исследований. Построены структурно-тектонические модели Верхнекамского месторождения и его отдельных участков, в пределах которых произошли опасные динамические события.

Выводы. Сформулированы признаки, характеризующие участки месторождения, в пределах которых произошли динамические события. Эти признаки можно рассматривать в качестве критерии для прогнозирования мест возможного проявления динамических событий.

Ключевые слова: Верхнекамское месторождение калийных солей; динамические явления; прогнозирование; критерии; геолого-геофизические данные.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Блюмин М. А., Улитин Р. В. Схема градиентов скоростей современных вертикальных движений земной поверхности Урала. Масштаб 1 : 2500000. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983.
2. Джиноридзе Н. М. Петротектонические основы безопасной эксплуатации Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. СПб–Соликамск: ОГУП, 2000. 400 с.
3. Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264 с.
4. Кассин Г. Г., Филатов В. В. К проблеме прогнозирования геодинамических явлений на территории Верхнекамского месторождения калийных солей // Известия вузов. Горный журнал. 2002. № 3. С. 153–164.
5. Konstantinova S. A., Chernopazov S. A., Gulyaev A. A. Estimate of initial stresses in rock mass of the Upper Kama region based on block hierarchical model // Journal of Mining Science. 2001. Vol. 37. No. 5. P. 447–454.
6. Христенко Л. А., Степанов Ю. И., Паршаков Е. И. Содержательный анализ результатов классификации данных электроразведки в пределах Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: сб. науч. трудов. Вып. 1(46). Пермь: ГИ УрО РАН, ПГНИУ. 2019. С. 361–363.
7. Шкиря М. С., Богданович Д. В., Айкашева Н. А., Белова А. Ю., Бухалов С. В., Жуков А. А., Давыденко Ю. А. Оценка состояния водозащитной толщи на Верхнекамском месторождении солей по результатам трехмерной инверсии наземных электромагнитных зондирований // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: сб. науч. трудов. Вып. 1(46). Пермь: ГИ УрО РАН, ПГНИУ. 2019. С. 385–389.
8. Яницкий Н. Н., Касьянов В. В., Мельникова М. В., Халиулин И. Э. Выявление и картирование флюидонасыщенных каверново-трещинных зон по комплексу геофизических полей // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: сб. науч. трудов. Вып. 1(46). Пермь: ГИ УрО РАН, ПГНИУ. 2019. С. 395–397.
9. Philitov V., Bolotnova L., Vandyshova K. Horizontal shear zones and their reflection in gravitational fields // Practical and Theoretical Aspect of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Eleceric Filds. Proc. of the 45th Uspenskyy Int. Geophysical Seminar, Kazan, Russia. 2019. P. 339–347.
10. Sanfirov I. A., Stepanov Y. I., Fatkin K. B., Gerasimova I. Y., Nikiforova A. I. Shallow geophysical exploration of the Upper Kama potash salt deposit // Journal of Mining Science. 2013. Vol. 49. No. 6. P. 902–907.
11. Shulakov D. Yu., Butyrin P. G., Verkholtsev A. V. Seismological monitoring at the Upper Kama potash deposit: objectives, problems, solutions // Gornyi Zhurnal. 2018. No. 6. P. 25–29.
12. Филатов В. В., Болотнова Л. А. Прогноз динамических явлений по данным гравиразведки на Верхнекамском месторождении калийных солей // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: сб. науч. трудов. Вып. 1(46). Пермь: ГИ УрО РАН, ПГНИУ. 2019. С. 352–356.

Сведения об авторах:

Филатов Владимир Викторович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов Владимирского государственного университета. E-mail: filatov47@bk.ru

Болотнова Любовь Анатольевна – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизики Уральского государственного горного университета. E-mail: l.bolotnova@yandex.ru

Для цитирования: Филатов В. В., Болотнова Л. А. Обобщение опыта прогнозирования динамических явлений на Верхнекамском месторождении калийных солей по геолого-геофизическим данным // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 4. С. 61–70 (In Eng.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-61-70

For citation: Filatov V. V., Bolotnova L. A. Generalizing the experience of forecasting dynamic events at the Upper Kama potassium salt deposit according to geological and geophysical data. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal.* 2019; 4: 61–70. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-61-70

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.7

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-71-79

Влияние рентгенорадиометрической сепарации на технологические показатели глубокого обогащения забалансовой цинковой руды

Цыпин Е. Ф.^{1*}, Попова Е. В.², Ефремова Т. А.²

¹ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

² Научно-исследовательский и проектный институт «Уралмеханобр», г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: tsipin.e@mail.ru

Реферат

Введение. В последнее время в переработку вовлекаются руды сложного химического и минералогического состава, в том числе и забалансовые руды. Для забалансовых руд характерно невысокое содержание ценного компонента. Одним из наиболее перспективных методов повышения качества сырья является рентгенорадиометрический.

Целью работы является изучение влияния предварительного обогащения рентгенорадиометрическим методом на технологические показатели флотационного обогащения забалансовой цинковой руды.

Методика. Исследование проведено на забалансовой цинковой руде крупностью $-50+0$ мм. Из исходной руды выделены несортируемый класс крупности и один машинный класс $+30$ мм. Машинный класс разделен на рентгенорадиометрическом сепараторе с получением концентрата рентгенорадиометрической сепарации (RPC) и хвостов RPC. Путем смешивания концентрата RPC в заданной пропорции с содержанием несортируемого класса 80, 60, 30 % сформированы объединенные продукты, являющиеся продуктами питания флотации. Проведено флотационное обогащение данных продуктов с получением грубого цинкового концентрата и флотационных хвостов. Рассчитаны технологические показатели.

Выводы. Совместное применение рентгенорадиометрической сепарации и флотационного обогащения забалансовой цинковой руды позволяет существенно повысить технологические показатели и пересмотреть подходы к построению технологии обогащения данной руды.

Ключевые слова: предварительная концентрация; флотация; рентгенорадиометрическая сепарация; забалансовая цинковая руда; технологические показатели; предварительное обогащение.

Введение. Потребность расширения рудной сырьевой базы диктуется ростом потребления сырья и производимой из него продукции. Запасы богатых руд со временем истощаются. В связи с этим в переработку вовлекаются относительно бедные и забалансовые руды. Традиционно используемые технологии глубокого обогащения, такие как флотационные, не позволяют достичь на них столь же высоких технологических показателей как при обогащении богатых руд. Эффективность обогащения может быть повышена за счет использования предварительной концентрации в стадиях рудоподготовки [1, 2]. Такой подход находит применение в разных странах при переработке различных видов минерального сырья [3–6]. Наибольшее распространение получили информационные или сенсорные методы обогащения [7, 8].

В кластер информационных входят следующие методы: радиометрические, применяемые для сортировки радиоактивных руд; оптические, применяемые для сортировки нерудного сырья, марганцевых, золотосодержащих руд; группа ней-

тронных (нейтронно-радиационный, нейтронно-активационный, нейтронно-абсорбционный), которые потенциально могут быть применены к широкому кругу разнообразных руд; фотонейтронный, использующий фотоядерную реакцию (γ, n) и применяемый для сортировки бериллиевых руд; радиорезонансные и теплометрические, применяемые для руд, содержащих минералы и горные породы,



Рис. 1. Схема проведения опытов
Fig. 1. Research design scheme

отличающиеся соответственно электрическими и магнитными или теплофизическими свойствами [1, 7]. Особо следует отметить наиболее широко используемую в промышленности многообразную группу рентгеновских методов, это рентгенофлуоресцентный, рентгеноабсорбционный, рентгенолюминесцентный методы.

Таблица 1. Показатели рентгенорадиометрического разделения, %
Table 1. Indicators of X-ray radiometric separation, %

Продукт PPC	Выход	Массовая доля цинка	Извлечение цинка
Концентрат PPC	46,14	3,731	88,51
Хвосты PPC	53,86	0,415	11,49
<i>Итого</i>	100,00	1,945	100,00

Рентгенофлуоресцентный метод отличает возможность сортировки сырья по содержанию химических элементов, начиная с Ca, разнообразие специфических алгоритмов, используемых для разделения многообразных видов минерального сырья [9–11]. В промышленных условиях этот метод показывает высокую эффек-

тивность при предварительном обогащении с выделением отвальных кусковых хвостов и части кусковых концентратов руд цветных, редких и благородных металлов [1, 9, 12, 13], урановых руд [14, 15], руд черных металлов [1], неметаллических полезных ископаемых [9, 16, 17].

Таблица 2. Результаты флотационного обогащения, %
Table 2. Results of flotation, %

Продукт	Суммарные характеристики					
	Концентрат			Хвосты		
	Выход	Массо- вая доля	Извлече- ние	Выход	Массо- вая доля	Извлече- ние
<i>Без использования PPC</i>						
1-я фракция пенного продукта	2,40	22,35	35,29	100,00	1,52	100,00
2-я фракция пенного продукта	7,13	14,05	65,91	97,60	1,01	64,71
3-я фракция пенного продукта	11,82	9,26	72,05	92,87	0,56	34,09
4-я фракция пенного продукта	15,69	7,19	74,29	88,18	0,48	27,95
5-я фракция пенного продукта	16,92	6,72	74,86	84,31	0,46	25,71
Флотационные хвосты	100,00	1,52	100,00	83,08	0,46	25,14
<i>80 % несортируемого класса</i>						
1-я фракция пенного продукта	2,39	30,20	40,10	100,00	1,80	100,00
2-я фракция пенного продукта	6,68	17,86	66,29	97,61	1,10	59,90
3-я фракция пенного продукта	11,71	11,29	73,47	93,32	0,65	33,71
4-я фракция пенного продукта	18,45	7,47	76,62	88,29	0,54	26,53
5-я фракция пенного продукта	22,34	6,28	78,00	81,55	0,52	23,38
Флотационные хвосты	100,00	1,80	100,00	77,66	0,51	22,00
<i>60 % несортируемого класса</i>						
1-я фракция пенного продукта	2,25	38,91	37,90	100,00	2,31	100,00
2-я фракция пенного продукта	6,54	24,41	69,12	97,75	1,46	62,10
3-я фракция пенного продукта	10,53	16,76	76,43	93,46	0,76	30,88
4-я фракция пенного продукта	15,43	11,87	79,29	89,47	0,61	23,57
5-я фракция пенного продукта	18,22	10,20	80,53	84,57	0,57	20,71
Флотационные хвосты	100,00	2,31	100,00	81,78	0,55	19,47
<i>30 % несортируемого класса</i>						
1-я фракция пенного продукта	2,29	42,75	35,99	100,00	2,72	100,00
2-я фракция пенного продукта	5,15	33,02	62,52	97,71	1,79	64,01
3-я фракция пенного продукта	9,20	22,78	77,04	94,85	1,08	37,48
4-я фракция пенного продукта	13,66	16,32	81,93	90,80	0,69	22,96
5-я фракция пенного продукта	17,18	13,32	84,17	86,34	0,57	18,07
Флотационные хвосты	100,00	2,72	100,00	82,82	0,52	15,83

При решении задачи предварительной концентрации часть хвостов удаляется в кусковом виде, что приводит к потерям ценных компонентов в этой стадии обогащения. При глубоком (например, флотационном) обогащении также удаляются хвосты, с которыми теряется часть полезных компонентов. Вместе с тем содержание полезных компонентов в питании глубокого обогащения возрастает. Это может повлиять на извлечение ценных компонентов в стадиях глубокого обогащения и компенсировать потери ценных компонентов в стадиях предварительной концентрации, а также позволит получать более богатые концентраты глубо-

кого обогащения. В отдельных случаях предварительная концентрация может привести к изменению кинетических характеристик флотационного процесса, что позволит усовершенствовать технологическую схему флотационного обогащения с вытекающими из этого благоприятными экономическими и экологическими последствиями.

Теоретический подход к выявлению взаимосвязи потерь ценных компонентов с хвостами предварительной концентрации и технологическими показателями технологии в целом проанализирован в [1]. Однако для каждого вида сырья упомянутые эффекты могут проявляться в разной степени и потому должны быть подтверждены экспериментально.

Целью исследования является установление взаимосвязи технологических показателей обогащения с условиями и показателями предварительной концентрации руды рентгенофлуоресцентной сепарацией и последующей флотацией концентрата рудосортировочного комплекса на примере забалансовой цинковой руды.

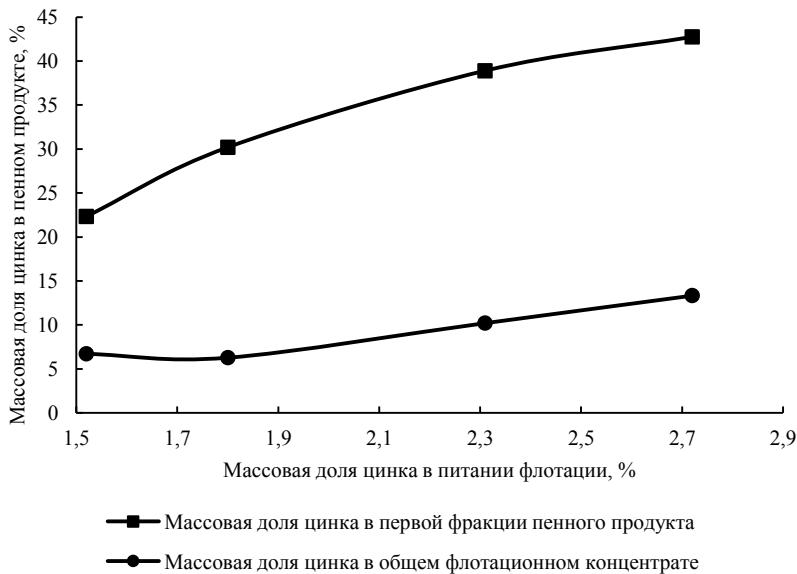


Рис. 2. Изменение массовой доли цинка в пенным продукте флотации в зависимости от содержания цинка в питании флотации

Fig. 2. Zinc mass fraction variation in flotation froth depending on the content of zinc in flotation feed

Методика. Исследования проведены на пробе забалансовой цинковой руды крупностью $-50+0$ мм, содержащей 1,52 % цинка. От исходной руды выделены машинный класс крупности $+30$ мм и несортируемый класс $-30+0$ мм.

Машинный класс разделен на рентгенорадиометрическом сепараторе с получением обогащенного цинком продукта и продукта с массовой долей цинка, соответствующей массовой доле цинка во флотационных хвостах. На основании изучения характеристических рентгеновских спектров кусков, разделение выполнено по спектральному отношению интенсивностей в спектральных областях: области вторичного характеристического рентгеновского излучения цинка N_{Zn} и области рассеянного первичного рентгеновского излучения N_s .

На рис. 1 представлена схема проведения исследований по рентгенорадиометрической сепарации (RPC) с последующей флотацией продуктов разделения. Для оценки влияния RPC на эффективность флотации искусственно составлены

смеси из концентрата сепарации и несортируемого класса. Содержание несортируемого класса составило 80, 60 и 30 %, при этом массовая доля цинка в имитируемой исходной руде (смесь классов +30 мм и –30+0 мм в указанных соотношениях) составила: 1,573; 1,695; 1,730 % соответственно. В питании измельчения и флотации (объединенный продукт концентрата сепарации и несортируемого класса) массовая доля цинка соответственно составила 1,80; 2,31; 2,72 %. Для сравнения результатов поставлен флотационный опыт на исходной руде с массовой долей цинка 1,52 % без предварительного обогащения РРС.

Таблица 3. Технологические показатели обогащения относительно исходной руды, %
Table 3. Technological parameters of dressing regarding the initial ore, %

Продукт	Выход	Массовая доля цинка	Извлечение цинка
<i>Без использования РРС</i>			
Грубый цинковый концентрат	16,92	6,72	74,86
Флотационные хвосты	83,08	0,46	25,14
<i>Итого</i>	100,00	1,52	100,00
<i>80 % несортируемого класса</i>			
Грубый цинковый концентрат	18,73	6,270	74,67
Флотационные хвосты	65,11	0,510	21,09
Хвосты РРС	16,16	0,415	4,24
Суммарные хвосты	81,27	0,491	25,33
<i>Итого</i>	100,00	1,573	100,00
<i>60 % несортируемого класса</i>			
Грубый цинковый концентрат	12,33	10,190	74,14
Флотационные хвосты	55,35	0,550	17,96
Хвосты РРС	32,32	0,415	7,90
Суммарные хвосты	87,67	0,500	25,86
<i>Итого</i>	100,00	1,695	100,00
<i>30 % несортируемого класса</i>			
Грубый цинковый концентрат	9,78	13,350	75,44
Флотационные хвосты	47,13	0,520	14,20
Хвосты РРС	43,09	0,415	10,36
Суммарные хвосты	90,22	0,470	24,56
<i>Итого</i>	100,00	1,730	100,00

Поступающий на глубокое обогащение продукт измельчается в щелочной среде до 83–85 % содержания класса –0,071 мм. Измельченный продукт подвергается агитации с медным купоросом, расход медного купороса при этом составляет 500 г/т, и аэрации с CaO. Содержание свободного CaO в жидкой фазе пульпы 868 г/м³. Время флотации составляет 25 мин, расход собираителя – бутилового ксантофената калия – 200 г/т. Предусмотрена дробная подача собираителя. Съем пенного продукта осуществляется по фракциям.

Результаты исследований. В табл. 1 представлены результаты рентгенорадиометрической сепарации забалансовой цинковой руды.

Массовая доля цинка в хвостах сепарации составляет 0,415 %, что по данным практики соответствует массовой доле цинка во флотационных хвостах. Выход хвостов РРС относительно сепарируемого класса крупности составил 53,86 %, что указывает на возможность применения РРС на забалансовой цинковой руде.

В табл. 2 представлены суммарные характеристики результатов флотационных опытов, рассчитанные относительно питания флотации.

Анализ результатов. Применение РРС позволяет удалить часть флотоактивного пирита, что косвенно подтверждается данными табл. 2. Уменьшение потерь цинка с флотационными хвостами с 25,14 до 15,83 % с одновременным увеличением массовой доли цинка в суммарном флотационном концентрате с 6,72 до 13,32 % указывает на то, что в концентрат извлекается больше сфалерита и соответственно меньше пирита.

На рис. 2 приведены зависимости массовой доли цинка в первой фракции пенного продукта и в грубом цинковом флотационном концентрате от массовой доли цинка в питании флотации.

Таблица 4. Сводная таблица показателей обогащения

Table 4. Dressing indicators summary

Массовая доля цинка	Степень концентрации	Концентрат			Хвосты			
		Выход	Массовая доля	Извлечение	Выход	Массовая доля	Извлечение	
<i>Относительно питания флотации</i>								
В питании флотации	1,520	1,00	16,92	6,72	74,86	83,08	0,46	25,14
	1,800	1,18	22,34	6,28	78,00	77,66	0,51	22,00
	2,310	1,52	18,22	10,20	80,53	81,78	0,55	19,47
	2,720	1,79	17,18	13,32	84,17	82,82	0,52	15,83
<i>Относительно исходной руды</i>								
В имитирующей исходной руде	1,520	1,00	16,92	6,72	74,86	83,08	0,46	25,14
	1,573	1,04	18,73	6,28	74,67	81,27	0,49	25,33
	1,695	1,12	12,33	10,20	74,14	87,67	0,50	25,86
	1,730	1,14	9,78	13,32	75,44	90,22	0,47	24,56

С увеличением массовой доли цинка в питании флотации увеличивается массовая доля цинка как в суммарном пенном продукте (общий флотационный концентрат), так и в первой флотационной фракции пенного продукта, причем при массовой доле цинка в питании флотации, равной 2,72 % (где доля несортируемого класса составляет 30 %), первая фракция соответствует кондиционному концентрату и сразу может быть выведена в готовый цинковый концентрат.

В табл. 3 представлены результаты обогащения с учетом хвостов РРС, рассчитанные по схеме рис. 1.

С увеличением выхода сепарируемого класса (сопровождается повышением содержания цинка в исходной руде с 1,52 до 1,73 %) отмечено повышение массовой доли цинка во флотационном цинковом концентрате с 6,27 до 13,32 %, при этом снижается выход концентрата, а потери цинка с суммарными хвостами меняются незначительно 24,5–25,9 %.

Обобщенные данные обогащения представлены в табл. 4. Под степенью концентрации цинка понимается отношение массовой доли цинка исходной руды с применением рентгенорадиометрической сепарации к массовой доле цинка без использования предварительного обогащения.

Степень концентрации цинка в питании флотации с уменьшением доли несортируемого класса значительно увеличивается. Следует отметить существенное повышение технологических показателей, особенно массовой доли цинка в концентрате, при увеличении содержания цинка в питании флотации начиная с 2,3 %.

Степень концентрации относительно исходной руды в искусственно созданных смесях изменяется незначительно, но при этом значительно повышается качество суммарного флотационного концентрата (до 13,32 %), а потери цинка с суммарными хвостами остаются практически на одном уровне.

Выводы. Совместное применение рентгенорадиометрической сепарации и флотационного обогащения забалансовой цинковой руды позволяет существенно повысить технологические показатели (повышение массовой доли цинка в грубом флотационном цинковом концентрате с 6,27 до 13,32 % без увеличения потерь цинка с хвостами обогащения) и пересмотреть подходы к построению технологии обогащения данной руды.

Повышение массовой доли в питании флотации ведет к увеличению массовой доли цинка в первой флотационной фракции, что указывает на перспективы изменения схемы флотационного обогащения с введением РРС, а именно на возможность введения операции флотации цинковой «головки» с получением кондиционного концентрата.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Цыпин Е. Ф. Обогащение в стадиях рудоподготовки: науч. монография. Екатеринбург: УГГУ, 2015. 303 с.
2. Бочаров В. А., Игнаткина В. А. Технология обогащения полезных ископаемых. Т. 1. М.: Руда и металлы, 2007. 952 с.
3. Härkki K. Overcoming sustainability challenges of future concentrator plants // Proceedings of the XXVII International Mineral Processing Congress. Santiago, Chile: Gecamin, 2014. Chap. 1.
4. Moore P. Processing performance // International Mining. 2018. January. P. 66–73.
5. Максимов И. И. XXVII Международный конгресс по обогащению полезных ископаемых. Часть 1 // Обогащение руд. 2015. № 3. С. 3–11. DOI: 10.17580/or.2015.03.01
6. Максимов И. И., Баранов В. Ф., Богданович А. В., Кибиров В. И. XXVII Международный конгресс по обогащению полезных ископаемых. Часть 2 // Обогащение руд. 2015. № 6. С. 50–58. DOI: 10.17580/or.2015.06.10
7. Цыпин Е. Ф. Информация и обогатительные процессы // Известия вузов. Горный журнал. 2012. № 1. С. 86–92.
8. Kolacz J. Sensor based sorting with signal pattern recognition: The new powerful tool in mineral processing // Proceedings of the XXVII International Mineral Processing Congress. Santiago, Chile: Gecamin, 2014. Chap. 16. P. 106–115.
9. Федоров Ю. О., Кацер И. У., Коренев О. В., Короткевич В. А., Цой В. П., Ковалев П. И., Федоров М. Ю., Поповский Н. С. Опыт и практика рентгенорадиометрической сепарации руд // Известия вузов. Горный журнал. 2005. № 5. С. 21–37.
10. Цыпин Е. Ф., Овчинникова Т. Ю., Ефремова Т. А., Пестов В. В. Построение технологических схем предварительного обогащения многокомпонентных руд // Обогащение руд. 2016. № 5. С. 8–13. DOI: 10.17580/or.2016.05.02
11. Пестов В. В. Разработка и использование программно-методического обеспечения рентгенофлуоресцентной сепарации минерального и техногенного сырья // Известия вузов. Горный журнал. 2011. № 8. С. 111–117.
12. Санакулов К. С., Руднев С. В. Комплекс рентгенорадиометрического обогащения сульфидных руд месторождения Кокпатас // Горный вестник Узбекистана. 2010. № 1 (40). С. 3–7.
13. Санакулов К. С., Руднев С. В., Канцель А. В. О возможности отработки месторождения Учкулач с использованием технологии рентгенорадиометрического обогащения свинцово-цинковых руд // Горный вестник Узбекистана. 2011. № 1 (44). С. 17–20.
14. Повышение эффективности подземной разработки урановых месторождений: научное издание / В. И. Култышев [и др.]. М.: МГИУ, 2007. 212 с.
15. Колесаев В. Б., Литвиненко В. Г., Култышев В. И. Комбинированная технология переработки бедных урановых руд // Горный журнал. 2008. № 8. С. 50–53.
16. Шемякин В. С., Скопов С. В., Маньковский Р. В., Красильников П. А., Мамонов Р. С. Предварительное обогащение кварцевого сырья // Известия вузов. Горный журнал. 2016. № 8. С. 74–79.
17. Зверев В. В., Литвинец Э. Г., Рябкин В. К., Гусев С. С., Кузнецова О. В., Глушко Т. В., Ратнер В. Б., Рябкина З. П. Радиометрическая сепарация как основной процесс в технологической схеме обогащения минерального сырья // Обогащение руд. 2001. № 5. С. 3–6.

Сведения об авторах:

Цыпин Евгений Федорович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых Уральского государственного горного университета. E-mail: tsipin.e@mail.ru

Попова Елена Владимировна – старший научный сотрудник отдела обогащения лаборатории обогащения руд цветных металлов и техногенного сырья Научно-исследовательского и проектного института «Уралмеханобр». E-mail: popova_EV@umbr.ru

Ефремова Татьяна Александровна – научный сотрудник отдела обогащения лаборатории обогащения руд цветных металлов и техногенного сырья Научно-исследовательского и проектного института «Уралмеханобр». E-mail: efremova_ta@umbr.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-71-79

The influence of X-ray radiometric separation on the technological parameters of extra-balance zinc ore deep dressing

Evgenii F. Tsypin¹, Elena V. Popova², Tatiana A. Efremova²

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

² Uralmechanobr, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. At a recent time, ore of complex chemical and mineralogical composition, including extra-balance ore, get involved into ore processing. Low assay is common with extra-balance ore. X-ray radiometric method is one perspective way of improving the quality of raw material.

Research aim is to study the influence of preliminary dressing with the X-ray radiometric method on the technological parameters of extra-balance zinc ore flotation.

Methodology. The research has been carried out with the use of extra-balance zinc ore with the size of $-50+0$ mm. Unsortable grain-size class and one jigging class $+30$ mm have been selected from the initial ore. Jigging class is separated at an X-ray radiometric separator to get the concentrate of X-ray radiometric separation (XRRS) and XRRS tailings. By mixing XRRS concentrate in the given proportion and the contents of the unsortable class 80, 60, 30%, combined products are formed being the products of flotation feed. Flotation of the given products has been carried out to get the rough concentrate and flotation tailings. Technological parameters have been calculated.

Summary. Combined application of X-ray radiometric separation and flotation of extra-balance zinc ore allows significantly improving technological parameters and reconsider approaches to the technology of the given ore dressing.

Key words: preliminary concentration; flotation; X-ray radiometric separation; extra-balance zinc ore; technological parameters; preliminary dressing.

REFERENCES

1. Tsypin E. F. *Dressing in the stages of ore preparation: scientific monograph*. Ekaterinburg: UrSMU Publishing; 2015. (In Russ.)
2. Bocharov V. A., Ignatkina V. A. *Technology of mineral processing. Vol. 1*. Moscow: Ruda i metally Publishing; 2007. (In Russ.)
3. Härkki K. Overcoming sustainability challenges of future concentrator plants. In: *Proceedings of the XXVII International Mineral Processing Congress*. Santiago, Chile: Gecamin, 2014. Chap. 1.
4. Moore P. Processing performance. *International Mining*. 2018. January. P. 66–73.
5. Maksimov I. I. *XXVII International Mineral Processing Congress. Part 1. Obogashchenie Rud = Mineral Processing*. 2015; 3: 3–11. DOI: 10.17580/or.2015.03.01 (In Russ.)
6. Maksimov I. I., Baranov V. F., Bogdanovich A. V., Kibirev V. I. *XXVII International Mineral Processing Congress. Part 2. Obogashchenie Rud = Mineral Processing*. 2015; 6: 50–58. DOI: 10.17580/or.2015.06.10 (In Russ.)
7. Tsypin E. F. Information and enrichment process. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2012; 1: 86–92. (In Russ.)
8. Kolacz J. Sensor based sorting with signal pattern recognition: The new powerful tool in mineral processing. In: *Proceedings of the XXVII International Mineral Processing Congress*. Santiago, Chile: Gecamin, 2014. Chap. 16. P. 106–115.
9. Fedorov Iu. O., Katser I. U., Korenev O. V., Korotkevich V. A., Tsoi V. P., Kovalev P. I., Fedorov M. Iu., Popovskii N. S. Experience and practice of X-ray radiometric ore separation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2005; 5: 21–37. (In Russ.)
10. Tsypin E. F., Ovchinnikova T. Iu., Efremova T. A., Pestov V. V. Development of flow sheets for pre-concentration of multi-component complex ores. *Obogashchenie Rud = Mineral Processing*. 2016; 5: 8–13. DOI: 10.17580/or.2016.05.02 (In Russ.)
11. Pestov V. V. The development and use of methodical software X-ray fluorescent separation of mineral and technogenic raw materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2011; 8: 111–117. (In Russ.)

12. Sanakulov K. S., Rudnev S. V. Complex of X-ray radiometric dressing of sulphide ore at Kokpatas deposit. *Gornyi vestnik Uzbekistana = Mining News of Uzbekistan*. 2010; 1 (40): 3–7. (In Russ.)
13. Sanakulov K. S., Rudnev S. V., Kantsel A. V. Regarding the possibility of mining Uchquloch deposit with the use of lead-zinc ore X-ray radiometric separation technology. *Gornyi vestnik Uzbekistana = Mining News of Uzbekistan*. 2011; 1 (44): 17–20. (In Russ.)
14. Kultyshev V. I. et al. *Improving the effectiveness of uranium deposits underground mining: scientific publication*. Moscow: MSIU Publishing; 2007. (In Russ.)
15. Kolesaev V. B., Litvinenko V. G., Kultyshev V. I. Combined technology for processing of poor uranium ore. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2008; 8: 50–53. (In Russ.)
16. Shemiakin V. S., Skopov S. V., Mankovskii R. V., Krasilnikov P. A., Mamonov R. S. Preliminary concentration of quartz raw material at Kyshtym deposit. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2016; 8: 74–79. (In Russ.)
17. Zverev V. V., Litvintsev E. G., Riabkin V. K., Gusev S. S., Kuznetsova O. V., Glushko T. V., Ratner V. B., Riabkina Z. P. Radiometric separation as the main process in the flow chart of mineral processing. *Obogashchenie Rud = Mineral Processing*. 2001; 5: 3–6. (In Russ.)

Received 20 March, 2019

Information about authors:

Evgenii F. Tsypin – DSc (Engineering), Professor, professor of the Department of Mineral Processing, Ural State Mining University. E-mail: tsipin.e@mail.ru

Elena V. Popova – senior researcher, Ore Dressing office, Laboratory of Non-Ferrous Metal Ore and Technogenic Raw Materials Dressing, Uralmechanobr. E-mail: popova_EV@umbr.ru

Tatiana A. Efremova – researcher, Ore Dressing office, Laboratory of Non-Ferrous Metal Ore and Technogenic Raw Materials Dressing, Uralmechanobr. E-mail: efremova_ta@umbr.ru

Для цитирования: Цыпин Е. Ф., Попова Е. В., Ефремова Т. А. Влияние рентгенорадиометрической сепарации на технологические показатели глубокого обогащения забалансовой цинковой руды // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 4. С. 71–79. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-71-79

For citation: Tsypin E. F., Popova E. V., Efremova T. A. The influence of X-ray radiometric separation on the technological parameters of extra-balance zinc ore deep dressing. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 4: 71–79 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-71-79

Совершенствование разомкнутой схемы флотации на основе дробной подачи сорбатора по фронту флотации

Морозов Ю. П.^{1*}, Валиева О. С.², Евграфова Е. Л.³

¹ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

² Политехнический институт (филиал)

Северо-Восточного Федерального университета, г. Мирный, Россия

³ Производственная компания «Таилс КО», г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: gmf.opi@urstu.ru

Реферат

Предмет и цель работы. Разработка и оптимизация схем флотации является важным направлением совершенствования технологии флотации. Перспектива совершенствования схемных решений флотации связана с использованием разомкнутых схем, в которых наиболее полно реализуются условия приближения к идеальному флотационному каскаду. Целью данной работы является изучение возможностей повышения эффективности разомкнутых схем флотации на основе рационального объединения и флотации в отдельных ступенях продуктов при дробной подаче сорбатора по фронту флотации.

Методология. Для получения закономерностей формирования разнокачественных продуктов при дробной подаче сорбатора выполнено покамерное опробование разомкнутых схем на двух обогатительных фабриках при переработке медных руд. В лабораторных условиях исследована кинетика флотации медной руды при дробной подаче сорбатора в процесс. Покамерным опробованием разомкнутых схем и исследованием кинетики флотации медной руды при дробной подаче сорбатора в процесс установлено ступенчатое формирование пенного продукта по фронту флотации. Полученные закономерности могут быть использованы при формировании разомкнутых схем флотации при снижении смешивания разнокачественных продуктов, что приводит к существенному повышению показателей флотации.

Выходы. Выявленные закономерности раскрывают дополнительные возможности совершенствования флотационного обогащения сульфидных руд на основе использования разомкнутых схем флотации с дробной подачей сорбатора по фронту флотации.

Ключевые слова: разомкнутые схемы флотации; дробная подача сорбатора; формирование потоков; технологическая схема; компоновочное решение.

Введение. При флотации чаще всего используются замкнутые канонические схемы, в которых промпродукты направляются в предыдущие операции флотации. Объем циркулирующих продуктов для развитых схем флотации составляет значительную величину, которая в отдельных случаях на порядок превышает объемный расход исходного питания схемы. Циркулирующие потоки приводят к увеличению машиноемкости схемы, увеличивают нахождение отдельных частиц в пульпе, что отрицательно сказывается на показателях флотации.

Разработка и реализация оптимальных схем флотации является важным направлением совершенствования технологии флотации [1, 2]. Теоретическому обоснованию идеальных флотационных каскадовделено большое внимание в работах [3–5]. Показано, что оптимизация флотационных каскадов должна основываться на учете кинетики флотации минералов в каждой ступени флотационного каскада, на минимальном разубоживании продуктов при смешивании [5]. При этом должен быть реализован оптимальный реагентный режим.

Сформулированные условия приближения к идеальному флотационному каскаду наиболее полно реализуются в разомкнутых схемах флотации. Логика построения разомкнутых схем заключается в исключении циркуляций потоков, объединении и флотации в отдельной ступени продуктов по значениям массовой доли и флотируемости компонентов в них. Реализация в лабораторных условиях разомкнутой схемы, составленной на приведенных принципах, показала возможность значительного снижения машиноемкости схемы при существенном повышении технологических показателей обогащения [6].

Большое значение в технологии флотации имеет реагентный режим, включающий ассортимент реагентов, их расход и точки подачи в процесс [7–12].

При использовании разомкнутых схем флотации повышение показателей обогащения возможно путем дробной подачи собираителя по фронту флотации [13, 14], при которой реализуется «голодный режим» флотации. При таком режиме собиратель в первую очередь закрепляется на более гидрофобных богатых частицах флотируемого минерала, обеспечивая высокое качество пенного продукта в начальных камерах флотации. Подача следующей порции собираителя после окончания флотации богатых легкофлотируемых частиц флотируемого минерала приводит к флотации среднефлотируемых частиц и далее – труднофлотируемых частиц.

Реализация такого реагентного режима флотации в разомкнутых схемах должна обеспечить повышение показателей обогащения.

Методология и результаты исследования. Закономерности формирования качества пенных продуктов по фронту флотации исследованы в промышленных условиях на Сибайской и Балхашской обогатительных фабриках путем покамерного опробования разомкнутых схем основной и контрольной флотаций.

Таблица 1. Группировка разнокачественных продуктов по фронту разомкнутой схемы флотации на Сибайской обогатительной фабрике

Table 1. Grouping the products of different quality in the front of open flotation scheme at Sibai Concentrator

Камеры	Показатели флотации, %	
	Массовая доля меди	Извлечение меди
1–13	17,42	51,11
14–20	9,72	21,15
21–35	2,00	9,99

На Сибайской обогатительной фабрике для реализации открытого цикла флотации промпродукты испытываемой секции направляли в голову процесса на другую секцию. На испытываемой секции, работающей в открытом цикле, выполнено покамерное опробование 35 камер основной и контрольной флотаций при производительности секции по твердому питанию 50 т/ч.

Дробную подачу ксантогената осуществляли: в первую камеру – 50 г/т, в седьмую – 30 г/т, в двадцать первую – 20 г/т. Установлено, что дробная подача собираителя в разомкнутой схеме приводит к ступенчатому изменению качества пенных продуктов по фронту флотации. Группировка разнокачественных пенных продуктов по фронту флотации приведена в табл. 1.

Из данных табл. 1 следует, что ступенчатое формирование качества пенного продукта по фронту разомкнутой схемы флотации при дробной подаче собираителя позволяет выделить более 50 % меди в кондиционный концентрат с массовой долей меди в нем 17,4 % и 21,2 % меди – в промпродукт с массовой долей меди в нем 9,7 %.

При покамерном опробовании замкнутой схемы флотации на Сибайской обогатительной фабрике ступенчатость качества пенных продуктов не наблюдалась.

Аналогично покамерное опробование основной медной флотации выполнено на Балхашской обогатительной фабрике при переработке руды месторождения Шатыркуль. Руда перерабатывается на фабрике по схеме с основной медной флотацией, работающей в открытом цикле с получением на трех секциях пенных продуктов, которые объединяются и направляются на флотацию по стандартной схеме с циркуляциями промпродуктов. Количество камер основной флотации на секции – 12.

В операции основной флотации реализована дробная подача собирателя по фронту флотации: в первую камеру 75 г/т; в седьмую – 9 г/т; в девятую – 23 г/т.

По результатам покамерного опробования основной флотации на первой секции Балхашской обогатительной фабрики сформированы разнокачественные пенные продукты. Баланс продуктов основной флотации при дифференцированном формировании пенных продуктов приведен в табл. 2.

Таблица 2. Баланс продуктов основной флотации на первой секции Балхашской обогатительной фабрики при дифференцированном формировании пенных продуктов

Table 2. Balance of main flotation products at the first section of Balkhash Concentrator under differential formation of froth products

Продукт	Показатели флотации, %	
	Массовая доля меди	Извлечение меди
Концентрат	20,62	59,96
Промпродукт	6,65	25,17
Хвосты	0,17	14,58
Исходное питание	1,62	100,00

Показано, что в первых камерах флотомашины получается кондиционный по меди концентрат с массовой долей меди более 20 % при извлечении меди в него 60 %. Аналогичные результаты получены для основной флотации второй секции.

Кинетика флотации при дробной подаче собирателя исследована в лабораторных условиях при флотации медной руды Еленовского месторождения. Медь в руде представлена главным образом халькопиритом. В небольшом количестве присутствуют халькозин, ковеллин и борнит. Массовая доля меди в руде составляет 2,0–3,2 %.

Руда на фабрике перерабатывается по двухстадиальной схеме с выделением в первой стадии кондиционного медного концентрата и выделением медной «головки» во второй стадии флотации.

Исследования выполнены на пробе руды с массовой долей меди 2,0 %, измельченной до 65 % и 85 % класса –0,071 мм. Расход ксантофената при исследовании кинетики изменяли в диапазоне от 10 до 200 г/т.

Исследования на руде, измельченной до 65 % класса крупности –0,071 мм, показали, что массовая доля меди в пенном продукте с течением времени изменяется от 7,5 % в начале флотации до 2,5–0,5 % в конце флотации и снижается тем быстрее, чем больше расход собирателя. При расходах собирателя 50 г/т и выше по окончании флотации получаются отвальные хвосты с массовой долей меди 0,09–0,1 % при потерях меди с хвостами 2,5–4,0 %. При этом выход хвостов находится в пределах 50–77 %. Эксперименты с дробной подачей собирателя по 10 г/т в голову процесса и через каждые 30 с флотации показали, что массовая доля меди в хвостах снижается до 0,08 % при потерях меди с хвостами 1,74 %.

Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности проведения первой стадии флотации с получением отвальных хвостов и обогащенного пен-

ного продукта, который направляется после измельчения до 85 % класса –0,071 мм во вторую стадию флотации.

Исследование кинетики флотации на руде, измельченной до 85 % класса крупности –0,071 мм выполнены при дробной подаче собираителя в голову процесса и через каждые 30 с флотации. Съем пенного продукта осуществляли через каждые 30 с флотации. Отмечается наличие ступенчатости формирования массовой доли меди в пенном продукте с течением времени. Так, за первые 30 с формируется пенный продукт с массовой долей меди 7,73 % при извлечении в него меди 81,16 %, за последующие 60 с – пенный продукт с массовой долей меди 2,55 % при извлечении в него меди 13,69 % и в конце флотации за 210 с формируется пенный продукт с массовой долей меди 0,36 % при извлечении в него меди 2,72 %. Хвосты флотации при этом содержат 0,074 % меди.

Таблица 3. Результаты исследования кинетики флотации измельченного концентратата первой стадии при дробной подаче собираителя в процесс флотации

Table 3. Research results of first-stage refined concentrate flotation under fractional feed of collecting agent into flotation process

Продолжительность флотации, с	Выход продукта, %	Массовая доля меди, %	Извлечение меди, %
0–50	9,09	19,50	28,81
51–100	6,51	18,86	19,69
101–150	5,97	16,46	15,80
<i>Итого:</i> концентрат 1	21,57	18,54	64,30
151–200	7,97	10,32	13,23
201–250	6,54	9,91	10,42
251–300	4,41	9,15	6,50
301–350	3,46	5,25	2,92
<i>Итого:</i> концентрат 2	22,29	9,23	33,09
351–600	14,07	0,86	1,94
<i>Итого:</i> концентрат 3	14,07	0,86	1,94
<i>Хвосты</i>	42,07	0,10	0,68
<i>Исходное питание</i>	100,00	6,22	100,00

Далее проведены исследования кинетики флотации на пенном продукте первой стадии флотации, измельченном до крупности 85 % класса –0,071 мм при дробной подаче собираителя в процесс. При продолжительности флотации 600 с суммарный расход собираителя во вторую стадию флотации составил 120 г/т. Ксантофенат подавался в процессе дробно: 40 г/т – до начала флотации, 40 г/т – по истечении 200 с, 40 г/т – по истечении 400 с от начала процесса флотации.

Съем пенного продукта в отдельные порции осуществляли через каждые 50 с при флотации в течение 350 с, после чего при флотации «до конца» получали пенный продукт в диапазоне времени флотации с 350 до 600 с. Опыты повторяли три раза.

Результаты экспериментов после математической обработки приведены в табл. 3.

Установлено, что качество пенного продукта в течение процесса флотации при дробной подаче собираителя в процесс формируется ступенчато.

На основе полученных экспериментальных данных выполнен расчет разомкнутой качественно-количественной схемы флотации, которая приведена на рис. 1.

Показано, что разомкнутая схема в заданном режиме флотации при дробной подаче собирателя позволяет получать концентрат с массовой долей меди 17,96 % при извлечении в него меди 91,68 % и отвальные хвосты с массовой долей меди 0,1 % при извлечении в них меди 4,12 %. Кроме того, получается промпродукт с массовой долей меди 1,05 % при извлечении в него меди 4,12 %, который может быть направлен в отдельную переработку или в «голову» процесса во вторую стадию измельчения.

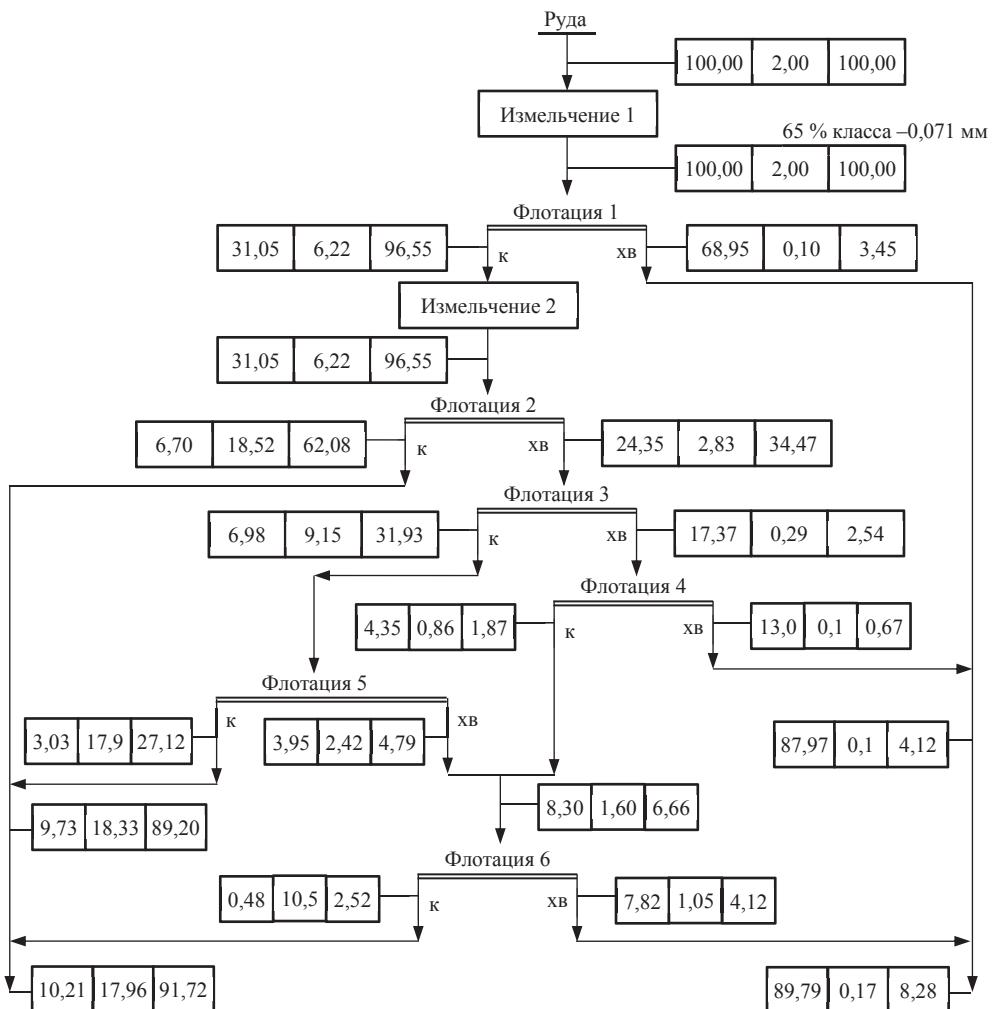


Рис. 1. Качественно-количественная разомкнутая схема флотации медной руды Еленовского месторождения

Fig. 1. Quality-quantity open circuit of copper ore flotation at Elenovsky deposit

Сравнение показателей существующей и рекомендуемой схем флотации выполнено при условии объединения промпродукта с отвальными хвостами в рекомендуемой схеме.

Результаты сравнения приведены в табл. 4.

Анализ результатов табл. 4 показывает, что предлагаемая разомкнутая схема двухстадиальной флотации с дробной подачей собирателя в процесс обеспечивает более высокие технологические показатели обогащения руды Еленовского месторождения и может быть рекомендована к внедрению.

Для предлагаемой к реализации разомкнутой схемы переработки руды Еленовского месторождения разработано компоновочное решение отделения флотации в условиях обогатительной фабрики, в которой цикл медной флотации состоит из трех параллельных ниток флотомашин. Первая нитка флотации включает 6 камер флотомашины типа РИФ-30, вторая и третья нитки флотации состоят из 8 камер флотомашины типа ОК-10.

Таблица 4. Показатели флотации руды Еленовского месторождения по существующей и рекомендуемой схемам

Table 4. Ore flotation indicators at Elenovsky deposit according to the existing and the recommended schemes

Показатель	Значение показателя, %	
	по существующей схеме	по рекомендуемой схеме
Выход концентрат	15,24	10,21
Массовая доля меди в концентрате	15,50	17,96
Извлечение меди в концентрат	87,50	91,68
Массовая доля меди в хвостах	0,39	0,17

Для реализации рекомендуемой разомкнутой схемы предлагается оставить первую нитку флотации без изменения. Вторую и третью нитки флотации существующей схемы предлагается демонтировать и установить 8 камер флотомашины типа ФПМ-6,3.

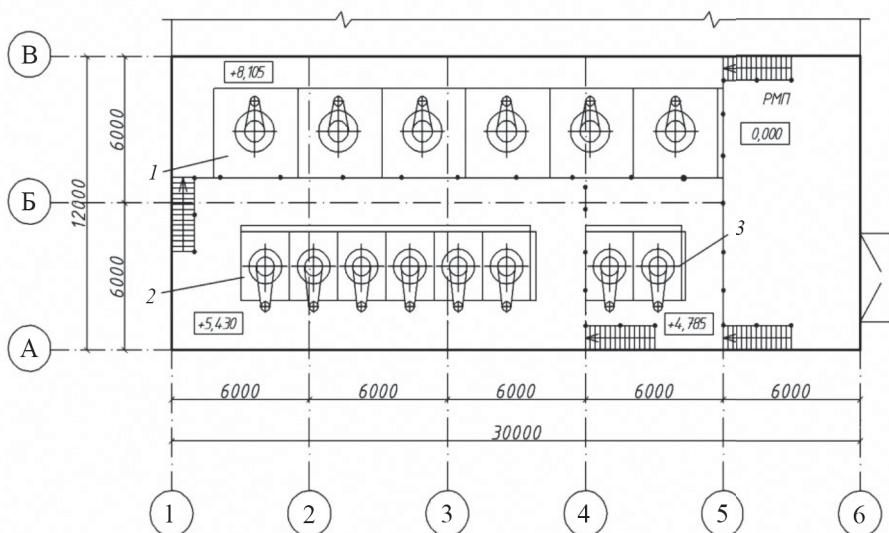


Рис. 2. Компоновочное решение отделения флотации с разомкнутой схемой:
1 – флотомашина РИФ-30 (6 камер); 2 – флотомашина ФПМ-6,3 (6 камер); 3 – флотомашина ФПМ-6,3 (2 камеры)

Fig. 2. Layout solution for flotation with open circuit:
1 – flotation machine RIF-30 (6 chambers); 2 – flotation machine FPM-6,3 (6 chambers); 3 – flotation machine FPM-6,3 (2 chambers)

Компоновочное решение отделения флотации, реализующее разомкнутую схему переработки руды, приведено на рис. 2.

Замена 16 камер флотомашины типа ОК-10 на 8 камер флотомашины типа ФПМ-6,3 одновременно со снижением занимаемой площади приведет к снижению амортизационных отчислений, расходов на электроэнергию и расходов на

ремонт. Снижение себестоимости переработки руды на фабрике за счет перехода на разомкнутую схему флотации составит около 10 % от существующей себестоимости.

Анализ и обсуждение результатов. Покамерным опробованием разомкнутых схем на двух обогатительных фабриках установлено, что дробная подача собирателя по фронту медной флотации в открытом цикле обеспечивает ступенчатое формирование качества пенного продукта, которое позволяет объединять продукты для последующих ступеней флотации с минимальным смешиванием разнокачественных продуктов и получать в «голове» процесса значительное количество кондиционного медного концентратра.

Исследование кинетики флотации медной руды Еленовского месторождения подтвердило наличие ступенчатого формирования качества пенного продукта с течением времени флотации за счет дробной подачи собирателя в процесс и показало возможность эффективного объединения пенных продуктов в разнокачественные потоки с получением в «голове» процесса кондиционного медного концентратра с массовой долей меди 18,54 % при извлечении в него меди 64,3 % по отношению к питанию операции флотации.

На основании экспериментальных данных предложена технологическая схема и разработано компоновочное решение отделения флотации, реализующего предлагаемую схему. Показано, что рекомендуемая схема флотации по сравнению с действующей на фабрике обеспечивает повышение качества медного концентратра с 15,5 % до 17,96 % при повышении извлечения меди в концентрат с 87,5 % до 91,72 %.

Реализация разомкнутой схемы флотации руды Еленовского месторождения за счет замены 16 камер флотомашины типа ОК-10 на 8 камер флотомашины типа ФПМ-6,3 обеспечит снижение занимаемой площади, амортизационных отчислений, расходов на электроэнергию и ремонт. Снижение себестоимости переработки руды на фабрике составит около 10 % от существующей себестоимости.

Область применения результатов. Результаты настоящей работы могут быть применены при совершенствовании технологии флотационного обогащения сульфидных руд путем внедрения разомкнутых схем флотации.

Выводы. Выявленные закономерности формирования разнокачественных пенных продуктов при дробной подаче собирателя по фронту разомкнутых схем флотации раскрывают дополнительные возможности совершенствования технологии флотационного обогащения сульфидных руд.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чантuria B. A., Шадрунова И. В., Горлова О. Е. Инновационные процессы глубокой и комплексной переработки техногенного сырья в условиях новых экономических вызовов // Эффективные технологии производства цветных, редких и благородных металлов: матер. междунар. науч.-произв. конф. Алматы: КНИТУ, 2018. С. 7–13.
2. Чантuria B. A., Козлов А. П. Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья // Плаксинские чтения: матер. междунар. науч. конф. 2017. Красноярск: СФУ, 2017. С. 3–6.
3. Погорелый А. Д. О флотационной характеристике промышленной пульпы // Известия вузов. Цветная металлургия. 1961. № 5. С. 58–68.
4. Погорелый А. Д. Расчет схем флотационного разделения // Известия вузов. Цветная металлургия. 1958. № 2. С. 26–32.
5. Барский Л. А., Козин В. З. Системный анализ в обогащении полезных ископаемых. М.: Недра, 1978. 486 с.
6. Динь-Нгог-Данг. Моделирование и оптимизация процесса флотационного разделения на основе вероятностных представлений: автореф. дис. ... докт. техн. наук. М., 1982. 43 с.
7. Hassanzaden A., Cagiziki S., Ozturd Z. A novel statistical insight to selection of the best flotation kinetic model // XXIX Int. min. proc. cong. IMPC. 2018. Р. 67.
8. Бочаров В. А., Игнаткина В. А. Рациональные технологии флотации труднообогатимых колчеданных руд цветных металлов // Новые технологии обогащения и комплексной переработки

труднообогатимого природного и техногенного минерального сырья: матер. междунар. совещ. Плаксинские чтения–2011. Екатеринбург: Форт Диалог–Исеть, 2011. С. 217–221.

9. Rigueme A., Desbiens A., del Villar R., Maldonado M. Identification of a nonlinear dynamic model of the bubble size distribution in a pilot flotation column // International Journal of Mineral Processing. 2015. Vol. 145. P. 7–16.

10. Minz F. E., Bolin N.-J., Lamberg P., Bachmann K., Gutzmer J., Wanhainen Ch. Distribution of Sb minerals in the Cu and Zn flotation of Rockliden massive sulphide ore in north-central Sweden // Minerals Engineering. 2015. Vol. 82. P. 125–135.

11. Zhigang H., Shujuan D. Flotation experiment research on a polymetallic sulfide ore of Cu, Pb, and Zn in Shanxi province // Journal of Chemical and Pharmaceutical Research. 2014. No. 6(4). P. 121–127.

12. John Chadwick. Float data // International Mining. 2018. November. P. 12–22.

13. Морозов Ю. П., Морозов В. В. Оптимизация технологии флотации с разомкнутыми схемами // Новые технологии обогащения и комплексной переработки труднообогатимого природного и техногенного минерального сырья: матер. междунар. совещ. Плаксинские чтения–2011. Екатеринбург: Форт Диалог–Исеть, 2011. С. 217–221.

14. Морозов Ю. П., Евграфова Е. Л., Валиева О. С. Формирование пенных продуктов в разомкнутых схемах флотации // Научная основа и практика переработки руд и техногенного сырья: матер. междунар. науч.-техн. конф. Екатеринбург: Форт Диалог–Исеть, 2015. С. 147–150.

Поступила в редакцию 6 марта 2019 года

Сведения об авторах:

Морозов Юрий Петрович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых Уральского государственного горного университета. E-mail: gmf.opi@ursmu.ru

Валиева Ольга Сергеевна – старший преподаватель кафедры горного дела Политехнического института (филиал) Северо-Восточного федерального университета. E-mail: olga.valieva.80@mail.ru

Евграфова Елена Леонидовна – кандидат технических наук, инженер производственной компании «Тайлс КО». E-mail: tails2002@inbox.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-80-88

Improving the open circuit of flotation based on collecting agent fractional feed in the front of flotation

Iurii P. Morozov¹, Olga S. Valieva², Elena L. Evgrafova³

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

² Mirny Polytechnic Institute (Branch) of North-Eastern Federal University, Mirny, Russia.

³ Tails Co., Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Research object and aim. Flotation schemes development and optimization is a significant trend in flotation technology improvement. The prospect of developing flotation schemes is connected with the use of open circuits which realize the conditions approaching the ideal flotation cascade. This research aims to study the possibilities of improving the effectiveness of open flotation circuits based on rational integration and flotation at certain stages of products under fractional feed of a collecting agent in the front of flotation.

Methodology. In order to obtain the regularities of forming the products of different qualities under fractional feed of a collecting agent, chamber assaying of open circuits have been carried out at two processing plants with copper ore processing. In laboratory conditions, copper ore flotation kinetics has been studied under fractional feed of a collecting agent into the process. Chamber assaying of open circuits and copper ore flotation kinetics study under fractional feed of a collecting agent into the process determined step-like formation of froth product in the front of flotation. The obtained regularities can be applied when forming open flotation circuits through reducing the blending of the products of different quality which leads to significant increase in flotation indicators.

Summary. Revealed regularities open up additional possibilities to improve flotation of sulphide ore dressing based on the use of open flotation circuits with fractional feed of a collecting agent in the front of flotation.

Key words: open flotation circuits; fractional feed of a collecting agent; flows formation; flow chart; layout solution.

REFERENCES

- Chanturiia V. A., Shadrunkova I. V., Gorlova O. E. Innovative processes of deep and integrated processing of technogenic raw material in the conditions of new economic challenges. In: *Effective technologies of non-ferrous, rare, and precious metals production. Proceedings of International Scientific and Production Conference*. Almaty: KNRTU Publishing; 2018: 7–13. (In Russ.)

2. Chanturia V. A., Kozlov A. P. Modern problems of complex ore and technogenic raw material comprehensive mineral processing. In: *Plaksin Readings: Proceedings of International Scientific Conference*. 2017. Krasnoyarsk: Siberian Federal University Publishing; 2012: 3–6. (In Russ.)
3. Pogorelyi A. D. On flotation characteristic of industrial pulp. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya = Universities' Proceedings. Nonferrous Metallurgy*. 1961; 5: 58–68. (In Russ.)
4. Pogorelyi A. D. Calculation of flotation separation schemes. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya = Universities' Proceedings. Nonferrous Metallurgy*. 1958; 2: 26–32. (In Russ.)
5. Barskii L. A., Kozin V. Z. *System analysis in mineral processing*. Moscow: Nedra Publishing; 1978. (In Russ.)
6. Din-Ngog-Dang. *Modeling and optimizing the process of flotation separation based on probabilistic representations*. PhD (Engineering) abstract of dissertation. Moscow. 1982. 43 p.
7. Hassanzaden A., Cagiziki S., Ozturd Z. A novel statistical insight to selection of the best flotation kinetic model. *XIX Int. min. proc. cong. IMPC*. 2018, p. 67.
8. Bocharov V. A., Ignatkina V. A. Rational technologies of non-ferrous metals complex pyrite ore flotation. In: *New technologies in complex natural and technogenic mineral raw material dressing and comprehensive processing. Proceedings of International Conference "Plaksin Readings – 2011"*. Ekaterinburg: Fort Dialog – Iset Publishing; 2011. p. 217–221. (In Russ.)
9. Rigueulme A., Desbiens A., del Villar R., Maldonado M. Identification of a nonlinear dynamic model of the bubble size distribution in a pilot flotation column. *International Journal of Mineral Processing*. 2015; 145: 7–16.
10. Minz F. E., Bolin N.-J., Lamberg P., Bachmann K., Gutzmer J., Wanhainen Ch. Distribution of Sb minerals in the Cu and Zn flotation of Rockliden massive sulphide ore in north-central Sweden. *Minerals Engineering*. 2015; 82: 125–135.
11. Zhigang H., Shujuan D. Flotation experiment research on a polymetallic sulfide ore of Cu, Pb, and Zn in Shanxi province. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*. 2014; 6(4): 121–127.
12. John Chadwick. Float data. *International Mining*. 2018; November: 12–22.
13. Morozov Yu. P., Morozov V. V. Optimizing flotation technology with open circuits.. In: *New technologies in complex natural and technogenic mineral raw material dressing and comprehensive processing. Proceedings of International Conference "Plaksin Readings–2011"*. Ekaterinburg: Fort Dialog–Iset Publishing; 2011. p. 217–221. (In Russ.)
14. Morozov Yu. P., Evgrafova E. L., Valieva O. S. Formation of froth products in open flotation circuits. In: *Scientific foundation and practice of ore and technogenic material processing. Proceedings of International Scientific and Technical Conference*. Ekaterinburg: Fort Dialog–Iset Publishing; 2015. p. 147–150. (In Russ.)

Received 6 March, 2019

Information about authors:

- Iurii P. Morozov** – DSc (Engineering), Professor, professor of the Department of Mineral Processing, Ural State Mining University. E-mail: gmf.opi@ursmu.ru
- Olga S. Valieva** – senior lecturer of the Mining Department, Mirny Polytechnic Institute (Branch) of North-Eastern Federal University. E-mail: olga.valieva.80mail.ru
- Elena L. Evgrafova** – PhD (Engineering), engineer, Tails Co. E-mail: tails2002@inbox.ru

Для цитирования: Морозов Ю. П., Валиева О. С., Евграфова Е. Л. Совершенствование разомкнутой схемы флотации на основе дробной подачи собираителя по фронту флотации // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 4. С. 80–88. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-80-88

For citation: Morozov Yu. P., Valieva O. S., Evgrafova E. L. Improving the open circuit of flotation based on collecting agent fractional feed in the front of flotation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 4: 80–88 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-80-88

Special characteristics of sustainable development models

Vladimir E. Strovskii^{1*}, Oksana G. Komarova¹, Oksana A. Logvinenko¹

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

*e-mail: ief.ftp@m.ursmu.ru

Abstract

Relevance. Insufficient elaboration of methodological foundations of sustainable development concept predetermines ambiguous conceptual-categorical framework and, consequently, imperfect methodological support for the possibilities of its realization.

Research aims to develop methodological provisions for sustainable development concept as regards the determination of relationships between the types of sustainability and approaches to their realization.

Methodology. The analysis of the ways and distinctive features of sustainable development concept formation. The development of the author's variant of systematizing the approaches to various types of sustainable development realization.

Results. The article considers certain moments of sustainable development concept formation and the special characteristics of approaches to its realization in different countries, the results of the sustainable development problem discussion at international conferences and summits, the evaluation of the degree of fulfilling the goals concerning switching to a new development model. Recommendations concerning sustainability types selection are systematized, the criterion of classification is substantiated – natural capital depletion and possibility of its substitution by physical (artificial) capital. Sustainability classification with a greater detailed elaboration is considered according to R. K. Terner. The article generalizes and analyses information characterizing methodological approaches to the realization of the main provisions of sustainability development concept: anthropocentrism, eco and biocentrism, their interrelation with scenario approaches – scientific and conservationist according to B. M. Mirkin and L. G. Naumova. The features of the approaches are revealed which are complementary to the common ones: noospheric and scenario-centrist. Author's version is proposed for the given notions integration, relation estimation between man- nature interaction character and scenarios of human development towards the creation of sustainable development society and their attitude towards the realization of different types of sustainable development.

Results. The obtained results, improving the methodology of sustainable development, ensure the elaboration of more solid methodological approaches to the realization of a new development model.

Key words: sustainable development; international cooperation; sustainability types; methodological approaches; realization.

Introduction. The recognition of the need for transition to a new development way dates back to the 1970th. At the conference in Stockholm, the problems of social-economic development coordination with environmental protection were raised for the first time, and the guidelines of the ecodevelopment concept were formulated which tolerates economic growth only within the limits of environmental restrictions. In the 1980th the concept smoothly transformed into the sustainable development concept, which is “the development that meet the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs” [1, 2]. It is generally considered that the groundwork for sustainable development ideas formation was laid by the Russian scientist V. I. Vernadsky back in the beginning of the 20th century in his noosphere concept (or the sphere of mind), which provides for the harmonisation of

interaction between the society and the nature. This explains the selection of the first stage of sustainable development concept in the historical aspect interpretation of this concept in work [3].

It should be noted that certain provisions, which were reflected in sustainable development concept, as well as endeavors to form the models of social-economic development with the account of environmental restrictions were also reflected in the earlier period in a number of works by native and foreign scientists. In this way, D. L. Armand, defining the contents of "ecoacceptable use of natural resources" in his book "For us and For Our Children" [4], notes eternal value of natural wealth, popularizes the idea of fair intergenerational distribution of nature's gifts, formulates the idea of paid use of natural resources, and proves the need for environmental costs. Work [5] proves the need for transition to a stationary development model, where stable population, constant stock of goods or capital and their correlation ensure good living conditions for the population.

An important condition, substantiated by G. Daly [6], is the introduction of restrictions on economic growth associated with resources scarcity and depletion as well as with the limits of tolerable level of contamination. In future, working out provisions of his idea and analysing the concept of social-economic development, the author of the work notes that none of them speaks about restrictions on the dimensions of economy. To Iu. K. Efimov's progress can be ascribed the substantiation of ecological-economic unity of the problem of environmental protection and use, and the account of the ecological component in sustainable development concept, whereas V. A. Anuchin's contribution is the proof of social, but not only industrial, use of natural resources. It follows from above that sustainable development concept was not entirely new to the native scientists, because its provisions were close to the statements of the concept of nature resources rational use.

The term "sustainable development" appeared for the first time in 1980 in a document *World Conservation Strategy* published by the International Union for Conservation of Nature and Natural Resources. The term itself was then defined as "the integration of conservation (environmental protection) and development to ensure that modifications to the planet do indeed secure the survival and wellbeing of all people" [7, p. 6], and development combined with conservation was considered as the very type of biosphere management which may yield the greatest sustainable benefit to present generations while maintaining biosphere's potential to meet the needs and aspirations of future generations.

Among the major **specific objectives of the strategy** are the following:

- to maintain essential ecological processes and life-support systems, on which human survival and development depend;
- to preserve genetic diversity;
- to ensure the sustainable utilization of species and ecosystems.

Methodology is based on the analysis and generalization of methodological approaches to sustainable development concept basic provisions realization and systematization of approaches to the realization of difference types of sustainable development.

In 1987 main provisions of sustainable development were raised in the *UN Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*; meanwhile, if earlier at Stockholm Conference the globality of environmental problem was emphasized together with the need to interconnect social-economic development and environmental protection, then the Report was aimed at simultaneous examination of three problems – ecological, economic, and social. Sustainable development provided for the economic growth with the account of pressing social problems resolution and friendly environment conservation to meet the needs of the future generations [8, 9].

Reporting the characteristics of sustainable development, scientists point out that in Rio the concept acquired new political and social-economic, but not only ecological, concern. New development path was supported by the representatives from 178 countries at the conference in Rio de Janeiro in 1992.

The conference resulted in accepting five important international conventions, Agenda 21 being definitely the most important. It was considered as a course of action for sustainable development national strategies development. It's natural that the priorities were not the same for different countries as well as the mechanisms of strategies realization. In this way, Canada was the first to launch the plan of action to develop national strategies of sustainable development [10]. Ecological problems have long become public priority in this country, that is why Canada successfully realizes the program determined by *Agenda 21*. In 1993 a very important document was issued there, aimed at consensus-building at environmental protection problems resolution; the document reflects the guiding principles and expands opportunities for public participation in decision-making concerning certain tasks of ensuring sustainable development in various sectors of the country's economy and regions through the organization of the Round Tables. Solution to institutional problems of transition to a new development model, based on consensus-building and wide public involvement, accepted in Canada were approved by the whole world community, which testifies to its leading role in environmental governance.

In the USA, organization of sustainable development regulation at a regional level deserves special mention. Implementing the worked out strategy of sustainable development, the government has high hopes for "a team work of educated and trained people driven by the sense of personal responsibility" [11, p. 54]. In the author's opinion, the means of human capital assets mobilization, used to provide sustainable development, can be considered as the source of constructive ideas for the selection of the means of transition to a new development model.

In Russia, transition to sustainable development provides for a stage-by-stage approach and goal-orientation at every stage (*The Concept of Russian Federation Transition to Sustainable Development, approved by the Decree of the President of 1 April 1996*). The first stage provides for the solution of the first-priority problems associated with overcoming crises in the social-economic sphere and creating proper regulatory and legal framework for industrial ecologization. The second stage provides for the realization of a number of sustainable development elements within the limits of social-economic development process ecologization in Russia, biosphere conservation and restoration with the restriction of the nature resource intensity of industry and orientation toward sensible requirements of the future generations. At the third stage, the resolution of the problem is forecasted concerning the harmonisation of the development of the society, biosphere, and economy mainly by means of improving workers' qualification and moral values.

Results. It would seem that the only thing left was to realize the strategies and the outlined plans of action. However, the conference of 1997 in New York (*Rio + 5*) stated the default of obligations and the absence of positive results in the conflict resolution between the development of civilization and the nature. The relevance of problems connected with environmental protection, economic inequality, and a range of social problems, continued to increase. At the Millennium Summit, held in New-York in 2000, in the Millennium Declaration the Millennium Development Goals were formulated for the period up to 2015, the basic part concerning social problems: poverty eradication and mortality reduction, fight against HIV/AIDS, etc [12]. Only one objective was ecological.

The results of transition to sustainable development were summed up in 2002 in Johannesburg (RSA) at the World Summit on Sustainable Development and turned out

Approaches to the realization of various types of sustainable development [2, 20, 21]
Подходы к реализации различных типов устойчивого развития [2, 20, 21]

Scenarios	Man-nature relationship	Indicator		Sustainability type	Economic growth	Natural capital interchangeability	Indicator
		Population limit (people)	Change in the value of global energy demand				
Scientistic	Anthropocentrism	30–50 bln	Increase by 10 and more times	Conservation of 50–70 %	Less than 10 %	Very weak sustainability	Complete interchangeability
Centrist	Centrism	8–11 bln	Increase by 2–3 times	Conservation of the major part	33 %	Weak sustainability	Partial interchangeability
Conservationist	Ecocentrism	0,5–1,5 bln	Decrease by 6–10 times	Absolute conservation	70 %	Permissible economic growth with critical capital conservation	Limited reduction of natural capital with its revenue investment into substitutions
						Very strong sustainability	Zero economic growth
						Natural capital irreplacability	

to be disappointing again: the destruction of nature on the planet continued under total international acceptance of the need to abandon the existing development model. According to V. I. Danilov-Danilian, “summit in Johannesburg turned out to be nothing but a colossal party... not a single significant solution was proposed, not a single new idea” [13, p. 54]. Significant change in the realization of sustainable development concept was not noted at the conference in Rio de Janeiro (2012) as well. In all relevance of transition to a new development model, the results of a twenty years period for the majority of countries turned out to be negative.

In quest of new and more effective mechanisms, the conference in *Rio + 20* concentrated greatly on “green economy” which increases human well-being and ensures social justice under significant reduction of environmental risk [14]. Main provisions of “green economy” model were reflected in the outcome document (*Outcome document of the conference Rio + 20. The Future We Want. Rio de Janeiro, 2012. Available from: <http://daccess-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N11/476/12/PDF/N1147612.pdf?OpenElement>*). Summation of accomplishing the Millennium Development Goals revealed the insignificance of the results achieved in fight against poverty, hunger, and imminent ecological crisis [15]. Population growth is recorded, increase in the scale of consumption and, consequently, more intense impact on the environment. Needles to speak about sustainable development as soon as all remained the same. The United Nations Summit for the adoption of the post-2015 development agenda and approval of Sustainable Development Goals for the period up to 2030 was held in New-York in September, 2015. New goals proved to be broader (17 goals instead of 7 goals reflected in Millennium Development Goals) with emphasis on the ecological component. Failures in sustainable development concept realization to some extent predetermined the appearance of various approaches to this problem resolution and several sustainability types selection.

Two sustainability types are commonly considered: strong sustainability and weak sustainability, formation of which conditions the consequences of man-induced impact on the natural capital [16]. Natural capital in this case is understood as the total of assets providing natural resources and environmental services for humans [17].

The concept of weak sustainability provides for the possibility to replace natural capital by physical (artificial) capital “while maintaining the total value of aggregated reserve of all types of capital” [17, p. 40], which reduces the influence of the factor of natural reserves scarcity on social-economic development. Economic growth is tolerated with the account of consumer demands change and the introduction of “green” evaluation of economic indicators.

The concept of strong sustainability only permits minimal substitution of natural (inartificial) capital and orientation toward the stabilization and reduction of population and, correspondingly, consumer demand and economy size reduction. As regards the substantiation of critical natural capital concept, which should be conserved under any variants of economic development, the opinions of researchers also differ. Some think that critical natural capital should include nature’s gifts which cannot be substituted by the artificial ones: ozone layer, rare types of plants and animals, etc.

Others focus on the extent of natural ecosystems allowing to maintain the mechanism of biotic regulations on the planet. The coordination of the given points of view is probably required to work out the definition of critical natural capital.

A doubtless advantage of the classification of ecological-economic development types, worked out by the author of [18], is the versatile characteristic of sustainability according to economy’s environmental friendliness, management strategy, and ethics. In R. K. Turner’s classification, sustainability is differentiated according to four levels [19]. Worked out in the beginning of the 1990th, it’s popular among foreign researchers. According to R. K. Turner, for very weak sustainability verging upon technogenic

economy, natural and artificial capital are considered to be interchangeable, natural resources exploitation is permitted resting hopes concerning environmental conservation in technical progress. Under weak sustainability, ecological restrictions are introduced on economic growth; the conservation of critical limit of natural capital is demanded. Strong sustainability is aimed at maximum conservation of natural resources. Natural and artificial capitals are considered as complementing each other. Moderate economic growth is permitted with the use of environmentally friendly technologies. And, finally, very strong sustainability, according to [1], does not allow economic growth, i. e. zero growth of population, economy, and "extreme conservation of natural capital".

Specific character of sustainability types also requires various approaches to sustainable development concept realization. In the present time, the presence of anthropocentric and ecocentric (biocentric) approaches is commonly acceptable. As soon as sustainability types are classified according to the level of natural capital depletion (consequences of man-induced impacts), the substantiation of approaches to their realization is based on the criterion of economic growth (man-induced impact). Main provisions of anthropocentric approach are much close to basic provisions of scientific scenario of transition to sustainable development [20], which admits the might of science, scientific and technical progress, and believes it possible for a man armed with knowledge to solve any problem. Followers of this approach admit the possibility of population growth and economic growth. They perceive nature as an infinite source of natural gifts, endow it with the capability of adapting to man's activity and set their hopes on the possibility on human control over the biosphere. While cornucopian supporters (the supporters of technocritical development model) admit the possibility of infinite economic growth, the majority of anthropocentrists admit economic growth only within the limits of ecological restrictions (environmental protection model). In general, the considered approach and scenario are aimed on subduing the nature, perception of nature as a utilization target, i. e. dichotomy of social world and natural world. Extreme form of anthropocentrism is concept "World without nature", according to which the biosphere can be replaced by technosphere with human regulation of all processes within it.

Ecocentric (biocentric) approach perceives a human as one biological type being subject to the laws of biosphere, and is at the opposite pole as compared to the anthropocentric approach, in the same way that conservationist scenario is opposite to the scientific one. The supporters of this approach give priority to natural systems, admit minimal growth of economy with its restriction according to ecological requirements, minimal reduction of natural capital and its rebalancing with industrial one. The main idea of ecocentrists is the need to conserve the mechanism of biotic regulation. Among researches supporting the given approach, the following names can be mentioned: V. G. Gorshkov, K. S. Losev, V. I. Danilov-Danilian, K. Ia. Kondratiev, T. A. Akimova, V. V. Khaskin, etc. Within conservationist scenario, the issue is raised about the reduction of population and, consequently, reduction of biotic production consumption (meeting the "one percent" principle), restoration of disturbed lands and increasing the area of natural undisturbed terrestrial ecosystems. The extreme form of ecocentrism is concept "Back to nature" aimed at the conservation of natural capital without any substitution, demands reduction, ecosystems destruction prohibition (ideology of reserve management and study).

In work [21, p. 189] these approaches are supplemented by the noospheric, which provides for the biosphere rehandling by the scientific thought into a new condition, noosphere, with man's perception of the nature as "the supreme value of social existence". Attitude toward the existence of this approach is rather ambiguous, a number of researchers consider the concept of noosphere as "a sphere of mind, the supreme stage of biospheric development" to be utopian [22]. Centrist scenario is more

acceptable [20] together with the approach to sustainable development, based on the theory of central order by V. Geizenberg, which provides for society and ecosystems harmonious development. The scenario of centrism is based on the principle of ecological development including a range of elements of scientific and conservationist scenarios and provides for the achievement of their goals balance. The table proposes the author's variant of compatibility of sustainability types under consideration and their realization approaches.

Summary. Data presented in the table under consideration testify to interconnection between the approaches and scenarios of strategies realization for various sustainability types. Research and results can be considered as the development of methodological provisions of sustainable development concept, which can serve as a basis for the development of methodological approaches to the realization of models of various types of sustainable development.

REFERENCES

1. Bedrunka K. Concepts of the sustainable development of the region. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2020; 198: 11–18.
2. Kirlı M. S. a., Fahrioglu M. b. Sustainable development of Turkey: Deployment of geothermal resources for carbon capture, utilization, and storage. *Energy Sources. Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*. 2019; 41 (14): 1739–1751.
3. Iashalova N. N. The genesis and prospects of development of the concept of sustainable development. *Ekonomika prirodopolzovaniia = Economics of Sustainable Development*. 2016; 2: 4–18. (In Russ.)
4. Armand D. L. *For us and for our children*. Moscow: Mysl; 1964. (In Russ.)
5. *Toward a Steady – State Economy*. Ed. by H. Daly. San-Franciacio: Freeman and Cotp., 1973.
6. Daly H. E. Toward a new economic model. *Bulletin of the Atomic Science*; 1986. April.
7. Kondratiev K. Ia. Problems of modern civilization sustainable development. *Ekonomika prirodopolzovaniia = Economics of Sustainable Development*. 2005; 12: 3–10. (In Russ.)
8. Li J. a. b., Lin B. c. The sustainability of remarkable growth in emerging economies. *Resources, Conservation and Recycling*. 2019; 145: 349–358.
9. Keong C. Y. From Stockholm declaration to millennium development goals: The united nation's journey to environmental sustainability. In: *Developmental State And Millennium Development Goals. Country Experiences*. 2018; April, 5: 209–256.
10. Sokolov V. I. *Towards sustainable development*. USA: EPI; 1997; 9: 84–96. (In Russ.)
11. Pisarev V. D. *The USA and sustainable development strategy*. USA: EPI; 1998; 3: 44–54. (In Russ.)
12. Zarei E. a., Khosravi A. b., Motlagh M. E. c., Afshar N. E. c., Rahimi A. c., Torkestani F. c., Eslami M. c., Dormiani A. b., Khabiri R. d. e. Maternal mortality in Iran: Realization of the millennium development goals. *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences*. 2017; 27 (149): 192–196.
13. Danilov-Danilian V. I. Sustainable development – the problem of human survival. *Chelovek = Man*. 2003; 5: 52–57. (In Russ.)
14. Matida A. For a global agenda on post millennium development goals [Por uma agenda global pós-Objetivos de Desenvolvimento do Milênio]. *Ciencia e Saude Coletiva*. 2016; 21 (6): 1939–1945.
15. Zhu J. The 2030 agenda for sustainable development and China's implementation. *Chinese Journal of Population Resources and Environment*. 2017; 15 (2): 142–146.
16. Ignatieva M. N., Kosolapov O. V. Essence of the concept “sustainable development”. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2014; 2: 21–24. (In Russ.)
17. Glazyrina I. P. *Natural capital in transition economy*. Moscow: NIA–Priroda Publishing; REFIA; 2001. (In Russ.)
18. Bobylev S. N. *Environmental economics*. Moscow: INFRA-M Publishing; 2014. (In Russ.)
19. Turner R. K. Sustainability: principles and practice. *Sustainable Environmental Economics and Management: Principles and Practice*. Chichester: Wiley; 1993: 3–36.
20. Mirkin B. M., Naumova L. G. *Course of lectures on sustainable development*. Moscow: Taideks K° Publishing; 2005. (In Russ.)
21. Lukianchikov N. N., Potravnyi I. M. *Economics and management of natural resources*. Moscow: IuNITI-DANA Publishing; 2007. (In Russ.)
22. Akimova T. A., Khaskin V. V. *Ecology*. Moscow: IuNITA-DANA Publishing; 2006. (In Russ.)

Received 28 March, 2019

Information about authors:

Vladimir E. Strovskii – DSc (Economics), Professor, professor of the Department of Economics and Management, Ural State Mining University. E-mail: ief.etp@m.ursmu.ru

Oksana G. Komarova – senior lecturer of the Department of Economics and Management, Ural State Mining University. E-mail: oxana-komazova@yandex.ru

Oksana A. Logvinenko – senior lecturer of the Department of Economics and Management, Ural State Mining University. E-mail: oksana.logvinenko@m.ursmu.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-89-97

Специфические особенности моделей устойчивого развития

Стровский В. Е.¹, Комарова О. Г.¹, Логвиненко О. А.¹

¹ Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.

Реферат

Актуальность. Недостаточная проработка методологических основ концепции устойчивого развития предопределяет неоднозначность понятийно-категорийного аппарата и, соответственно, несовершенство методического обеспечения возможностей ее реализации.

Цель исследования. Развитие методологических положений концепции устойчивого развития в части установления взаимосвязей между типами устойчивости и подходами к их реализации.

Методология. Анализ путей и особенностей становления концепции устойчивого развития. Разработка авторского варианта систематизации подходов к реализации разных типов устойчивого развития.

Результаты. В статье рассматриваются отдельные моменты становления концепции устойчивого развития и особенности подходов к ее реализации в разных странах, результаты обсуждения проблемы устойчивого развития на международных конференциях и саммитах, оценки выполнения поставленных целей, касающихся перехода на новую модель развития. Систематизированы рекомендации по выделению типов устойчивости, обоснован критерий классификации – истощение природного капитала и возможность его замещения материальным (искусственным). Рассматривается классификация устойчивости с большей детализацией по Р. К. Тернеру. Обобщен и проанализирован материал, характеризующий методические подходы к реализации основных положений концепции устойчивого развития: антропоцентризм и эко- или биоцентризм и их взаимосвязь со сценарными подходами – сценаристским и консервационистским по Б. М. Миркину и Л. Г. Наумовой. Раскрываются особенности подходов, дополняющих общеизвестные: ноосферный и сценарный центристский. Предложена авторская трактовка объединения данных понятий, установления взаимосвязи между характером взаимодействия человека с природой со сценариями развития человечества в направлении создания общества устойчивого развития и их отношения к реализации различных типов устойчивого развития.

Выводы. Полученные результаты, совершенствующие методологию устойчивого развития, обеспечивают разработку наиболее обоснованных методических подходов к реализации новой модели развития.

Ключевые слова: устойчивое развитие; международное сотрудничество; типы устойчивости; методические подходы; реализация.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bedrunka K. Concepts of the sustainable development of the region // Studies in Systems, Decision and Control. 2020. Vol. 198. P. 11–18.
2. Kırkı M. S. a., Fahrioglu M. b. Sustainable development of Turkey: Deployment of geothermal resources for carbon capture, utilization, and storage // Energy Sources. Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects. 2019. Vol. 41. Issue 14. P. 1739–1751.
3. Яшалова Н. Н. Генезис и перспективы развития концепции устойчивого развития // Экономика природопользования. 2016. № 2. С. 4–18.
4. Арманд Д. Л. Нам и внукам. М.: Мысль, 1964. 252 с.
5. Toward a Steady – State Economy. Ed. by H. Daly. San-Franciacco: Freeman and Cotp., 1973.
6. Daly H. E. Toward a new economic model // Bulletin of the Atomic Science. 1986. April.
7. Кондратьев К. Я. Проблемы устойчивого развития современной цивилизации // Экономика природопользования. 2005. № 12. С. 3–10.
8. Li J.a.b., Lin B.c. The sustainability of remarkable growth in emerging economies // Resources, Conservation and Recycling. 2019. Vol. 145. P. 349–358.
9. Keong C. Y. From Stockholm declaration to millennium development goals: The united nation's journey to environmental sustainability // Developmental State And Millennium Development Goals // Country Experiences. 2018. April. 5. P. 209–256.
10. Соколов В. И. На пути к устойчивому развитию // США: ЭПИ. 1997. № 9. С. 84–96.
11. Писарев В. Д. США и стратегия устойчивого развития // США: ЭПИ. 1998. № 3. С. 44–54.
12. Zarei E. a., Khosravi A. b., Motlagh M. E. c., Afshar N. E. c., Rahimi A. c., Torkestani F. c., Eslami M. c., Dormiani A. b., Khabiri R. d. e. Maternal mortality in Iran: Realization of the millennium development goals // Journal of Mazandaran University of Medical Sciences. 2017. Vol. 27. Issue 149. P. 192–196.
13. Данилов-Данильян В. И. Устойчивое развитие – проблема выживания человека // Человек. 2003. № 5. С. 52–57.

14. Matida Á. For a global agenda on post millennium development goals [Por uma agenda global pós-Objetivos de Desenvolvimento do Milénio] // Ciencia e Saude Coletiva. 2016. Vol. 21. Issue 6. P. 1939–1945.
15. Zhu J. The 2030 agenda for sustainable development and China's implementation // Chinese Journal of Population Resources and Environment. 2017. Vol. 15. Issue 2. P. 142–146.
16. Игнатьева М. Н., Косолапов О. В. Сущность понятия «устойчивое развитие» // Известия вузов. Горный журнал. 2014. № 2. С. 21–24.
17. Глазырина И. П. Природный капитал в экономике переходного периода. М.: НИА–Природа, РЭФИА, 2001. 204 с.
18. Бобылев С. Н. Экономика природопользования. М.: ИНФРА-М, 2014. 400 с.
19. Turner R. K. Sustainability: principles and practice // Sustainable Environmental Economics and Management: Principles and Practice. Chichester: Wiley, 1993. P. 3–36.
20. Миркин Б. М., Наумова Л. Г. Курс лекций по устойчивому развитию. М.: Тайдекс Ко, 2005. 248 с.
21. Лукьянчиков Н. Н., Потравный И. М. Экономика и организация природопользования. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2007. 591 с.
22. Акимова Т. А., Хаскин В. В. Экология М.: ЮНИТА-ДАНА, 2006. 495 с.

Сведения об авторах:

Стровский Владимир Евгеньевич – доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры экономики и менеджмента Уральского государственного горного университета. E-mail: ief.ftp@m.ursmu.ru

Комарова Оксана Геннадьевна – старший преподаватель кафедры экономики и менеджмента Уральского государственного горного университета. E-mail: oxana-komazova@yandex.ru

Логвиненко Оксана Александровна – старший преподаватель кафедры экономики и менеджмента Уральского государственного горного университета. E-mail: oksana.logvinenko@m.ursmu.ru

Для цитирования: Стровский В. Е., Комарова О. Г., Логвиненко О. А. Специфические особенности моделей устойчивого развития // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 4. С. 89–97 (In Eng.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-89-97

For citation: Strovskii V. E., Komarova O. G., Logvinenko O. A. Special characteristics of sustainable development models. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal.* 2019; 4: 89–97 DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-89-97

Экономическая оценка последствий при освоении ресурсов недр

Иванов А. Н.¹, Игнатьева М. Н.^{1*}

¹Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: ief.ftp@urstu.ru

Реферат

Актуальность. Усиление внимания к экономическим мерам государственного регулирования природопользования в современных условиях требует выяснения эволюционных изменений в инструментарии экономической оценки последствий антропогенных воздействий, обусловленных освоением ресурсов недр.

Цель исследования – выявление этапности в экономическом обосновании оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС), установление причин, тормозящих процесс экономической оценки последствий, что снижает достоверность определения экономической эффективности мероприятий, смягчающих или предупреждающих возникновение неблагоприятных воздействий.

Методология основана на обобщении и анализе методических подходов к экономической оценке последствий воздействия на окружающую среду при освоении ресурсов недр.

Результаты исследования. Обобщение и анализ результатов исследований по экономической оценке последствий позволили выделить несколько последовательных этапов этого процесса, взаимоувязанных с институциональными преобразованиями в отношении ОВОС. На первом этапе имеют место фрагментарные определения экономического ущерба от потерь природных ресурсов и изъятия земель из сельскохозяйственного оборота. На втором этапе разрабатывается методическое обеспечение по экономической оценке последствий, обусловленных загрязнением и изъятием природных ресурсов (истощением). Исключение составляют последствия, связанные с изменением форм поверхности и литосферного массива. Требование выполнения экономической оценки последствий при ОВОС в официальных документах появляется только после регламентации порядка проведения ОВОС, причем носит первоначально весьма неопределенный характер: в одних документах присутствует, в других – отсутствует. В результате появление единых требований к выполнению экономической оценки может быть отнесено лишь к моменту принятия в 1995 г. СП 11-101-95. Правда, сводная таблица показателей эколого-экономической оценки строительства (реконструкции) промышленных объектов в разделе «Эколого-экономическая эффективность инвестиций в строительстве» включает в себя лишь перечень сметной стоимости природоохранных объектов и мероприятий. В мае 2000 г. утверждается новое Положение об оценке воздействия намечаемой хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду в Российской Федерации с целью установления единых правил организации и проведения ОВОС, в которых требование проведения экономической оценки последствий своего места не находит, как впрочем и в числе основополагающих принципов ОВОС. Данное Положение служит сегодня официальным документом, регулирующим ОВОС, в котором лишь в разделе 3.2.2. «Исследования по ОВОС намечаемой хозяйственной и иной деятельности» присутствует указание об оценке эффективности намечаемых мероприятий по смягчению или предотвращению негативных воздействий. На третьем этапе, начиная с 1995 г. методические рекомендации все более детализируются, появляется ряд отраслевых методик, а также методических подходов, учитывающих региональную специфику.

Выходы. Из анализа следует, что экономическая оценка последствий при освоении ресурсов недр на предпроектной стадии не проводится, хотя методическое обеспечение для ее выполнения в определенной степени подготовлено. Невыполнение или недостаточно качественное выполнение экономических обоснований ОВОС обусловлено отсутствием единой регламентации этого процесса и отсутствием соответствующего методического инструментария, утвержденного на федеральном уровне.

Ключевые слова: экономическая оценка; последствия; методическое обеспечение; регламентация; экономический эффект; экономический ущерб; эколого-экономическая эффективность.

Введение. Изначально экологическое проектирование имело естественно-научный характер: определялись динамика состояния и устойчивость ландшафтов, формирование натурального ущерба под влиянием антропогенного воздействия на растительность, на здоровье человека, организмы животных, свойства почв и т. д. Исследования по экономической оценке последствий, при осознании всей важности их выполнения, оставались невостребованными. И это при том, что жизнь общества регулируется экономическими законами. Только с учетом экономических показателей последствий возможно создание обоснованных компенсационных выплат, принятие наиболее целесообразных решений, связанных с освоением недр, предотвращающих ущерб окружающей среде [1].

Результаты исследования. К числу первых официальных документов, позволяющих осуществлять экономическую оценку последствий, относятся *Инструкция возмещения убытков землепользователям и потерь сельскохозяйственного производства при отводе земель для государственных или общественных нужд*, утв. Постановлением Совета Министров СССР от 09.08.1974 № 636, тарифы для исчисления ущерба, причиняемого редким живым организмам, нормативные документы, определяющие порядок учета затрат на рекультивацию нерудных строительных материалов, действующие на территории Украинской и Молдавской ССР, инструктивные материалы по определению ущерба, обусловленного загрязнением водных ресурсов и др. Однако требование оценки экономической эффективности природоохранных мероприятий, как и рекультивационных работ, в законодательных документах отсутствовало, что подтверждается рядом авторов [2]. В то же время в исследованиях, связанных в частности с рекультивацией, методические подходы к экономической оценке эффективности уже частично находили свое отражение, тем более что к этому времени Постановлением Госплана СССР, Госстроя СССР и Президиума АН СССР уже была утверждена *Типовая методика определения эффективности капитальных вложений*.

Так, К. И. Коркин и В. А. Овчинников в работе [3] предлагают оценивать эффективность через срок окупаемости затрат на восстановление нарушенных земель под посевы сельскохозяйственных культур. При этом дополнительные затраты, связанные с технологическим этапом на горном предприятии, и издержки предприятий, которые принимают участие в производстве и последующей переработке продуктов сельскохозяйственного производства, сопоставляются с чистым годовым доходом от реализации сельскохозяйственной продукции. Рекомендации В. Д. Горлова существенно уточняют расчет ущерба, связанного с нарушением поверхности земли при разработке месторождений открытым способом. В числе основных потерь, формирующихся при изъятии земель из сельскохозяйственного оборота, им рассматриваются:

- ущерб от нарушения почвенного слоя земли;
- затраты на восстановление прежнего плодородия;
- ущерб от снижения валового производства сельскохозяйственной продукции в связи с изъятием земли из хозяйственного оборота;
- затраты на рекультивацию или освоение земель [4, с. 14].

Общие положения оценки экономической эффективности рекультивации с отражением составляющих суммарного эффекта, которые получили дальнейшее развитие в методике оценки экономической эффективности рекультивации, раскрыты Т. Б. Кирилловой и В. А. Овчинниковым в работе [5]. В число составляющих суммарного эффекта ими включены:

- экологический эффект охраны среды, включающий предотвращенный ущерб, причиняемый нарушенными землями окружающей среде;
- хозяйственный эффект в виде продукции, получаемой с восстановленного участка, или прироста продукции с прилегающих территорий;

- дополнительный хозяйственный эффект, получаемый от использования вскрышных пород;
- социальный эффект, получаемый от использования восстановленных территорий для отдыха населения.

В то же время авторы отмечают недостаток информации для оценки ряда факторов и, соответственно, невозможность выполнения достоверной оценки эффектов. Наиболее полно оценка экономического ущерба выполняется для условий изъятия природных ресурсов из природной среды (потери лесных ресурсов при пожаре, потери при изменении характера использования земель, потери минеральных ресурсов при добыче и транспортировке, потери при низком уровне комплексности использования ресурсов и т. д.), когда экономический ущерб от потерь природных ресурсов определяется размером их экономической оценки (недоиспользование, некомплексность использования, необоснованное списание запасов полезных ископаемых и т. д.).

Одним из первых стал обосновываться порядок определения экономического ущерба при изменении характера использования земельных ресурсов (изменение их ценности) для сельскохозяйственного производства, который проявляется в появлении потерь и убытков у прежнего землепользователя [6]. Компенсационные выплаты за земли, изымаемые из сельскохозяйственного оборота, осуществлялись в СССР до 1960-х гг. только при строительстве гидроэлектростанций. В последующие годы в ряде союзных республик, а именно в Белоруссии, Латвии, Азербайджане, Молдавии, Киргизии и других, стали разрабатываться указания о расчете компенсации [7]. Их анализ показывает, что нормативы стоимости освоения новых земель взамен изымаемых для несельскохозяйственных нужд дифференцированы в зависимости от бонитета или вида сельскохозяйственных угодий (паши, сенокосы, пастбища), при этом из общей величины стоимости освоения выделению подлежали капитальные вложения.

В середине 1970-х гг. в развитие *Постановления Совета Министров СССР от 09.08.1974 «О возмещении убытков землепользователям и потерь сельскохозяйственного производства при отводе земель для государственных и общественных нужд»* были введены компенсационные нормативы, учитывающие помимо затрат на освоение равновеликих площадей еще и затраты на окультуривание вновь осваиваемых земель и повышение плодородия почв. К числу последующих относятся нормативы стоимости новых земель взамен изымаемых сельскохозяйственных угодий для несельскохозяйственных нужд, утвержденные *Постановлением Совета Министров правительства РФ от 28.01.1993 № 77, и нормативы стоимости, отраженные в Постановлении Совета Министров РФ от 28.01.1997 № 77 «Об утверждении положения о порядке возмещения убытков собственникам земель, землевладельцам, землепользователям, арендаторам и потерь сельскохозяйственного производства»*.

При отводе для несельскохозяйственных нужд лесных земель становится необходимым обращение к базовым размерам платы за перевод земель лесного фонда в другие категории (*Постановление Правительства РФ от 17.11.2004 № 647 «О расчете и возмещении потерь лесного хозяйства при переводе лесных земель в нелесные земли для использования их в целях, не связанных с ведением лесного хозяйства, использованием лесным фондом, и при переводе земель лесного фонда в земли иных (других) категорий»*). В случае необходимости перевода лесных земель в другой вид землепользования (строительство, формирование полигона для хранения отходов) в расчеты вводятся поправочные коэффициенты с учетом срока перевода, размеры которых меняются от 0,4 до 1,0. Расчет прогнозируемых убытков прежним владельцам и пользователям при отчуждении сельскохозяйственных земель выполняется прямым счетом для конкретной ситуации.

Для расчета ущерба от вылова (уничтожения) ресурсов – живых организмов начиная с 1970-х гг. утверждались таксы, которые в последующем получили отражение в методиках.

В Сумском филиале Харьковского политехнического института, в Ворошиловградском филиале Института экономики промышленности АН УССР и других успешно выполнялись исследования по экономической оценке ущерба, обусловленного загрязнением окружающей среды, связанного в первую очередь с ростом заболеваемости, смертности населения [8–10]. В 1969 г. в Сумском филиале ХПИ были выполнены исследования по оценке экономического ущерба, обусловленного загрязнением атмосферы, а в начале 1970-х – произведены расчеты экономического ущерба от загрязнения водных ресурсов, организованные Министерством мелиорации. В результате в 1971 г. была разработана *Временная методика определения экономического ущерба от загрязнения атмосферы предприятиями черной металлургии*, а в 1973 г. подготовлена *Методика оценки экономического ущерба от загрязнения водных ресурсов* [11]. Опыт проведения практических расчетов свидетельствует об учете достаточно большого количества частных ущербов, ряд из которых и в настоящее время не оценивается в денежном выражении из-за слабости методического обеспечения и нехватки информации [12].

В конце 70-х–начале 80-х гг. появляется первая методика, определяющая порядок расчета экономической эффективности природоохранных мероприятий и непосредственно величины экономического ущерба, обусловленного последствиями загрязнения окружающей среды (*Методика определения экономической эффективности и осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды. М., 1979. 72 с.; Временная методика определения экономической эффективности затрат в мероприятия по охране окружающей среды. Экономическая газета. 1980. № 33. С. 13–14*). В 1982 г. был подготовлен проект *Временной типовой методики определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды*, ее утверждение состоялось в 1983 г., окончательное издание – в 1986. Методика, как и ее предыдущий вариант, стала базовым ориентиром разработки отраслевых методик, основой для выполнения экономической оценки при обосновании рекультивационных работ (*Методика определения экономической эффективности рекультивации нарушенных земель, 1986*), при использовании отходов (*Методика по оценке экономической эффективности использования твердых отходов производства и потребления, 1985*) и т. д. К середине 1980-х гг. методическое обеспечение выполнения экономической оценки последствий, обусловленных загрязнением природной среды, было подготовлено и находило свое применение при подготовке специального раздела по охране окружающей природной среды и рациональному использованию природных ресурсов, разработка которого определялась действующими нормативными документами по проектированию и строительству. Подобный раздел «Экономическая эффективность осуществления средозащитных мероприятий» получил детальную характеристику в Справочнике по охране окружающей среды (1986) [13], как и раздел «Экономическая эффективность природоохранных мероприятий» – в Пособии по составлению раздела проекта (рабочего проекта) «Охрана окружающей природной среды» (*Пособие по составлению раздела проекта (рабочего проекта) «Охрана окружающей природной среды», одобрено Управлением госэкспертизы проектов и смет 25.12.1987*).

Недостаточное методическое обеспечение имело последствия, обусловленные изменением формы поверхности и литосферного массива. При подземной раз-

работке это сдвижение земной поверхности без разрыва сплошности; с разрывом сплошности и образованием провалов, терриконов, впадин, трещин; шахтные отвалы. При открытой разработке – карьеры; отвалы вскрыши [14].

Определение величины экономического ущерба, формируемого под влиянием воздействий насыпного массива на окружающую среду, получило свое отражение в методических рекомендациях по оценке экономической эффективности использования техногенно-минеральных образований; что касается выемок литосферного массива, то методическое обеспечение оценки экономического ущерба от формирующихся при этом последствий весьма фрагментарно. Еще менее исследованной, в том числе и в настоящее время, остается проблема нарушения недр (литосферного массива) и экономической оценки последствий. Оценка предотвращаемого ущерба при рекультивации карьерных выработок, а тем более заполнении пустот выработанного пространства при подземной разработке месторождений полезных ископаемых не находит отражения в методических рекомендациях. Методический инструментарий, касающийся экономической оценки эффективности рекультивации техногенных пустот, в настоящее время находится на начальной стадии и не имеет официального оформления.

Требование экономической оценки при ОВОС возникает лишь после официальной регламентации оценки последствий, при этом оно носит характер весьма неопределенный. В частности, в составе требований к содержанию ОВОС (*Временная инструкция о порядке проведения оценки воздействия на окружающую среду при разработке технико-экономических обоснований (расчетов) и проектов строительства народнохозяйственных объектов и комплексов, утв. зам. председателя Госкомприроды СССР от 18.05.1990*) во Временной инструкции присутствует требование проведения эколого-экономической оценки проектов, а в Положении об ОВОС (1994) оно уже отсутствует, рассматривается лишь необходимость принятия мер и мероприятий по предотвращению неприемлемых для общества последствий осуществления принятых решений (*Положение об ОВОС в РФ, утв. Приказом министра Минприроды от 18.07.1994. № 222*). Неопределенность в решении данного вопроса обусловила отсутствие единых требований к выполнению экономической оценки, их формирование может быть отнесено лишь к моменту принятия в 1995 г. *СП 11-101-95. Порядок разработки, согласования, утверждения и состав обоснования инвестиций в строительство предприятий, зданий и сооружений*. Однако, как следует из практического пособия к СП 11-101-95 в разделе «Оценка воздействия на окружающую среду» при обосновании инвестиций в строительство предприятий, зданий и сооружений рекомендации по расчету экономического ущерба, эколого-экономического эффекта и экономической эффективности мер и мероприятий по предупреждению неблагоприятных последствий отсутствуют. Сводная таблица рекомендуемых показателей эколого-экономической оценки строительства (реконструкции) промышленных объектов в разделе «Эколого-экономическая эффективность инвестиций в строительство» заканчивается перечнем сметной стоимости природоохраных объектов и мероприятий.

В мае 2000 г. Приказом председателя Госкомэкологии России было утверждено новое *Положение об оценке воздействия намечаемой хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду в Российской Федерации* с целью установления единых правил организации и проведения государственной экологической экспертизы. Анализ типового содержания по ОВОС, приведенного в Положении, показывает, что при существенной детализации порядка общественных обсуждений необходимость экономической оценки последствий подтверждения не находит, как впрочем и в числе основных принципов ОВОС. Указание об оценке эффективности намечаемых мероприятий по смягчению или предотвращению

негативных воздействий присутствует лишь в пункте 3.2.2 «Исследования по ОВОС намечаемой хозяйственной и иной деятельности». Официальным документом на сегодня, регулирующим порядок проведения ОВОС, продолжает оставаться Практическое пособие (1998).

Из работы [15], в которой систематизирован материал по вопросам охраны окружающей среды, в том числе по экологическим требованиям при проектировании с использованием нормативно-правовых актов в Российской Федерации, действующих на 01.01.2007, следует, что раздел по ОВОС при обосновании инвестиций должен включать в себя три подраздела:

- оценка существующего состояния компонентов окружающей среды района размещения проектируемого объекта;
- влияние объекта на окружающую среду;
- эколого-экономическая эффективность инвестиций в строительство объекта.

В то же время в перечне показателей [15, с. 205–206] присутствуют лишь показатели сметной стоимости объектов и мероприятий. Выполнение оценки экономической эффективности с расчетом общей экономической эффективности, сравнительной экономической эффективности и чистого экономического эффекта предусматривается лишь в подразделе «Оценка предотвращенного экономического ущерба и экономической эффективности природоохранных мероприятий» в разделе «Охрана окружающей среды» в составе проектной документации на строительство предприятий, зданий и сооружений производственного назначения. Причем, если до 2000 г. при расчете экономической эффективности основой определения экономического ущерба служила *Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды* (1983, 1986), то позднее данную роль стала выполнять сначала *Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба* (1999), а позднее *Методика определения предотвращенного экологического ущерба* (1999).

Как следует из анализа, регламентация экономической оценки последствий на предпроектной стадии при проведении ОВОС фактически отсутствует, в усеченном виде она присутствует лишь на стадии проектирования, когда в составе себестоимости учитываются дополнительные затраты недропользователя, связанные с арендой земельного участка, причинением вреда лесной фауне, компенсацией упущененной выгоды землепользователям и т. д. Вопросы экономической оценки последствий с позиции собственника природных ресурсов (государства) не рассматриваются.

Выводы. Таким образом, к началу XXI столетия методическое обеспечение, позволяющее осуществлять экономическую оценку последствий при освоении ресурсов недр, в определенной степени было подготовлено. Причина невыполнения или выполнения экономического обоснования низкого качества кроется в отсутствии должной регламентации этого процесса, что обусловлено отсутствием соответствующего методического обеспечения, утвержденного на федеральном уровне.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bellezoni R. A., Sharma D., Villela A. A., Pereira Junior A. O. Water-energy-food nexus of sugarcane ethanol production in the state of Goiás, Brazil: An analysis with regional input-output matrix // Biomass and Bioenergy. 2018. Vol. 115. August. P. 108–119.
2. Буевский Н. М., Зорин Л. Ф. Рекультивация земель, нарушенных горными работами. Донецк: Донбасс, 1969. 222 с.
3. Коркин К. И., Овчинников В. А. Экономическая эффективность восстановления территорий, нарушенных открытыми работами // Горный журнал. 1965. № 10. С. 33–35.
4. Горлов В. Д. Оценка ущерба, связанного с нарушением поверхности земли при открытых разработках // Известия вузов. Горный журнал. 1972. № 3. С. 14–19.

5. Кириллова Т. Б., Овчинников В. А. К вопросу определения эффективности рекультивации нарушенных земель // Рекультивация земель, нарушенных при добыче полезных ископаемых. Тарту: Эстонский НИИ лесного хозяйства и охраны природы, 1975. С. 123–129.
6. Lashgari N., Ghorbani J., Zali S. H., Vahabzadeh G. Assessment of the vegetation restoration potential on coal mine wastes (case study: Karmozd Savadkoh mines, Mazandaran Province) // Journal of Environmental Studies. 2016. Vol. 41. Issue 4. P. 757–770.
7. Витт М. Б. Экономическая оценка отводимых под строительство земель. М.: Стройиздат, 1984. 120 с.
8. Liu S. H., Liu B., Li Y. Risk factors associated with multiple correlated health outcomes in the 500 Cities Project // Preventive Medicine. 2018. Vol. 112. July. P. 126–129.
9. Casey J. A., Gemmill A., Karasek D., Ogburn E. L., Goin D. E., Morello-Frosch R. Increase in fertility following coal and oil power plant retirements in California // Environmental Health: A Global Access Science Source. 2018. Vol. 17. Issue 1. 2 May. Article 44. P. 2–10.
10. Tountas Y., Georgoulis L. Natural environment and health // Archives of Hellenic Medicine. 1998. Vol. 15. Issue 5. P. 482–493.
11. Караваев Б. Б., Баранова В. В. Об экономическом ущербе, вызываемом загрязнением водных источников // Водные ресурсы. 1973. № 3. С. 143–155.
12. Охрана окружающей среды: модели управления чистотой природной среды / под ред. К. Г. Гофмана и А. А. Гусева. М.: Экономика, 1977. 231 с.
13. Сахаев В. Г., Щербинский Б. В. Справочник по охране природы. Киев: Будивельник, 1986. 152 с.
14. Лазарева И. В. Восстановление нарушенных территорий для градостроительства. М.: Издво литературы по строительству, 1972. 135 с.
15. Сорокин Н. Д. Охрана окружающей среды на предприятиях. СПб: Интеграл, 2007. 688 с.

Поступила в редакцию 28 марта 2019 года

Сведения об авторах:

Иванов Андрей Николаевич – старший преподаватель кафедры экономики и менеджмента Уральского государственного горного университета. E-mail: graykardinal@yandex.ru

Игнатьева Маргарита Николаевна – доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры экономики и менеджмента Уральского государственного горного университета, ведущий научный сотрудник Института экономики УрО РАН. E-mail: ief.ftp@ursmu.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-98-105

Economic appraisal of consequences at subsoil resources exploitation

Andrei N. Ivanov¹, Margarita N. Ignatieve¹

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Relevance. Closer attention to economic measures of state regulation of nature resources management in modern conditions requires clearing up evolution in the tools of economic appraisal of anthropogenic impacts conditioned by subsoil resources exploitation.

Research aims to determine the sequence of stages in economic substantiation of environmental impact assessment (EIA), stating the reasons slowing down the process of economic appraisal of consequences which reduces the reliability of economic effectiveness determination for measures mitigating and preventing negative impacts.

Research methodology is based on generalization and analysis of methodological approaches to economic appraisal of environmental impact consequences under subsoil resources exploitation.

Research results. Results generalization and analysis of research of consequences economic appraisal allowed to distinguish some sequent stages of this process interconnected with institutional transformations in EIA. At the first stage there are fragmentary determinations of economic damage caused by natural resources loss and lands removal from agricultural use. At the second stage, methodological supply is developed for consequences economic appraisal conditioned by contamination and removal (depletion) of natural resources. An exception is the consequences associated with surface and lithosphere massif shape variation. The requirement to consequences economic appraisal fulfillment under EIA appears in official documents only after EIA procedure regimentation, and is initially of rather uncertain character: it is present in some documents and absent in others. As a result, the development of unified requirements to execution of economic appraisal can be referred only to the moment of passing СП 11-101-95 (code practice) in 1995. Yet, summary table of ecological-economic appraisal of industrial facilities construction (reconstruction) in part "Ecological-economic effectiveness of investment in construction" includes only the list of estimated cost of environmental facilities and measures. In May 2000, new Statement on environmental assessment of future business or other activities in the Russian Federation was approved with the purpose of establishing uniform rules of EIA organization and fulfillment, and the requirement of consequences economic appraisal is out of the picture both in this Statement and in EIA guidelines. Today

the given Statement is an official document regulating EIA, in which only in part 3.2.2. "Examination of future business and other activities according to EIA" there is a directive on effectiveness assessment of future activity on mitigation and prevention of negative impact. At the third stage, beginning with 1995, methodological recommendations have been progressively detailed, a range of subject methodologies appears, as well as the methodological approaches taking into account regional specifics.

Summary. It follows from the analysis that economic appraisal of consequences is not carried out at the pre-project stage, though methodological supply for it has been prepared. Desertion or insufficient fulfillment of EIA economic substantiations is conditioned by the lack of uniform regimentation of this process and the lack of the corresponding methodological tools federally approved.

Key words: economic appraisal; consequences; methodological supply; regimentation; economic effect; economic damage; ecological-economic effectiveness.

REFERENCES

1. Bellezoni R. A., Sharma D., Villela A. A., Pereira Junior A. O. Water-energy-food nexus of sugarcane ethanol production in the state of Goiás, Brazil: An analysis with regional input-output matrix. *Biomass and Bioenergy*. 2018; 115; August: 108–119.
2. Buevskii N. M., Zorin L. F. *Revegetation of lands disturbed by mining*. Donetsk: Donbass Publishing; 1969. (In Russ.)
3. Korkin K. I., Ovchinnikov V. A. Economic effectiveness of territories reclamation disturbed by opencast mining. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 1965; 10: 33–35. (In Russ.)
4. Gorlov V. D. Assessment of damage connected with the disturbance of earth's surface under opencast mining. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 1972; 3: 14–19. (In Russ.)
5. Kirillova T. B., Ovchinnikov V. A. Economic efficiency of recultivation of the broken lands. In: *Recultivation of lands broken during mineral production*. Tatu: Estonian Environmental Research Institute; 1975. p. 123–129. (In Russ.)
6. Lashgari N., Ghorbani J., Zali S. H., Vahabzadeh G. Assessment of the vegetation restoration potential on coal mine wastes (case study: Karmozd Savadkoh mines, Mazandaran Province). *Journal of Environmental Studies*. 2016; 41 (4): 757–770.
7. Vitt M. B. *Economic appraisal of lands dedicated for construction*. Moscow: Stroizdat Publishing; 1984. (In Russ.)
8. Liu S. H., Liu B., Li Y. Risk factors associated with multiple correlated health outcomes in the 500 Cities Project. *Preventive Medicine*. 2018; 112; July: 126–129.
9. Casey J. A., Gemmill A., Karasek D., Ogburn E. L., Goin D. E., Morello-Frosch R. Increase in fertility following coal and oil power plant retirements in California. *Environmental Health: A Global Access Science Source*. 2018; 17; 1. 2 May; entry number 44: 2–10
10. Toumatis Y., Georgoulis L. Natural environment and health. *Archives of Hellenic Medicine*. 1998; 15; 5: 482–493.
11. Karaev V. B., Baranova V. V. On the economic damage caused by water resources contamination. *Vodnye resursy = Water Resources*. 1973; 3: 143–155. (In Russ.)
12. Gofman K. G., Gusev A. A. (eds.). *Environmental protection: clean environment control models*. Moscow: Economica Publishing; 1977. (In Russ.)
13. Sakhaev V. G., Shcherbinskii B. V. *Environmental protection reference*. Kiev: Budivelnik Publishing; 1986. (In Russ.)
14. Lazareva I. B. *Reclamation of disturbed lands for urban constructions*. Moscow: Izd-vo literature po stroitelstvu Publishing; 1972. (In Russ.)
15. Sorokin N. D. *Industrial environmental protection*. St. Petersburg: Integral Publishing; 2007. (In Russ.)

Received 28 March, 2019

Information about authors:

Andrei N. Ivanov – senior lecturer of the Department of Economics and Management, Ural State Mining University. E-mail: graykardinal@yandex.ru

Margarita N. Ignat'eva – DSc (Economics), Professor, professor of the Department of Economics and Management, Ural State Mining University. Leading researcher, Institute of Economics UB RAS. E-mail: ief.ftp@ursmu.ru

Для цитирования: Иванов А. Н., Игнатьева М. Н. Экономическая оценка последствий при освоении ресурсов недр // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 4. С. 98–105. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-98-105

For citation: Ivanov A. N., Ignat'eva M. N. Economic appraisal of consequences at subsoil resources exploitation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 4: 98–105 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-98-105

The calculation of heat exchange processes in the conveying pipe of a skip pneumatic winder

Vitalii M. Tauger^{1*}, Aleksandr A. Leontiev¹

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

*e-mail: tauger2016@yandex.ru

Abstract

Introduction. The article considers thermodynamic processes in the conveying pipe of a skip pneumatic winder.

Research aim is to analyse the establishment of temperature regime of pipeline's operation and estimate the influence of air refrigeration on the velocity of a skip in the conveying pipe of a skip pneumatic winder.

Methodology. A mathematical model has been built of "mining blower–skip–lifting pipeline–surrounding media" system, which will make it possible to get the dependence of conveying medium temperature and loaded skip velocity on depth. The formulae are introduced to estimate pipeline wall heating and air refrigeration inside the pipeline. The ratio has been found, which makes it possible to determine the time of heating upon the expiry of which the process of heat exchange in the initial part of the pipe will be steady.

Results. The relevance of the problems has been justified. Dependences of air-flow rate and air velocity in the pipeline on the vertical height coordinate are presented together with skip winding velocity variation conditioned by air flow refrigeration. The solution to the inverse problem is described: the calculation of air blowing station capacity required to provide the calculated value of average velocity, the results of which will allow to determine the value of mining blower capacity which provides for skip calculated average winding velocity, predetermined cycle duration, and unit capacity.

Summary. The ratios, obtained as a result of the calculation, make it possible to determine the value of mining blower capacity required to provide for skip calculated average winding velocity, predetermined cycle duration, and unit capacity.

Ключевые слова: winder; skip; pneumatic system; pipeline; heat exchange processes; mathematical model; mine winding.

Introduction. Increase in the depth of deposits and the capacity of heading machines and shearers demands larger skip capacities and winding velocity. Limited operational characteristics of cable winders condition the need for the alternative means of mine winding with higher specific capacity. The analysis of various means of transport clearly indicates the potentials of the specific type of pneumatic container conveying – skip pneumatic winders [1–5].

When developing the systems with gaseous conveying medium, the problems arise associated with the determination of the influence of physical, particularly thermodynamic, properties of a medium on the system parameters. Mathematical description of the units of heavy duty with the motion cycle being strictly determined is extremely challenging. Mine winding systems must run at a steady pace, and with high energy load, pipeline length being hundreds of meters. In such conditions, in the mathematical model of a system, it is essential to take into account physical effects, connected with the properties of air of both enclosing and conveying medium.

Methodology. Mathematical model of *mining blower–skip–lifting pipeline–surrounding media* system will make it possible to get the dependence of conveying medium temperature and loaded skip velocity on depth. The indicated dependences in turn will make it possible to determine the velocity of a container in the depth function.

Thus, mathematical description of thermodynamic processes made in this work will become the constituent part of the calculation of skip pneumatic winder duty cycle duration.

The analysis of heat exchange processes. Air blowing station delivers flow into the conveying pipe, the temperature of the flow is significantly higher than the surrounding air. This fact is explained by energy loss when pressurising with blower rotor active elements. Modern mining blowers *SIEMENS* have got the coefficient of efficiency of 80–85 % [6, 7], and this number reduces with the increase of head capacity of a unit. Although it is rather high for a turbomachine, about 20 % of the unit's power is expended to heat gas.

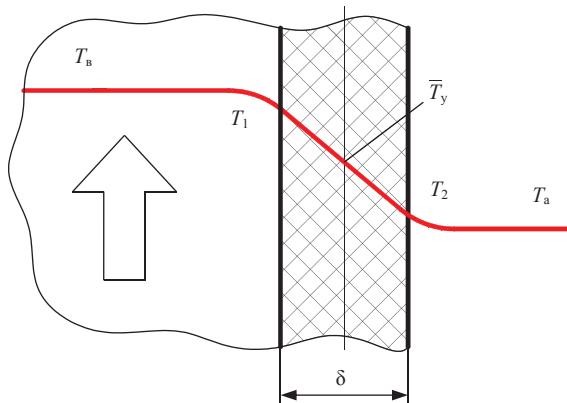


Fig. 1. A fragment of the pipe's wall
Рис. 1. Фрагмент стенки трубы

Heated air comes to the conveying pipeline under pressure and conveys the loaded skip to the surface. As a result of heat exchange the pipeline gets hot, while the air under the skip cools. This is an isobaric process; temperature drop is accompanied by air density growth and winding velocity reduction.

The study of heat exchange processes between the heated flow and pipe wall and between the pipe wall and the atmosphere provide for the solution of two problems:

- pipeline operation temperature conditions establishment;
- the estimation of air cooling influence on skip velocity.

The first problem is relevant because it is essential to determine whether pipes made of polymeric composite materials, precisely of fibreglass, are able to function at calculated temperatures.

As the skip elevates, flow cooling leads to air density growth and corresponding consumption reduction, which impacts on the velocity of a container. The determination of dependence between the loaded skip velocity and its coordinate will make it possible to calculate an average velocity of winding and the duty cycle of the unit.

Fig.1 represents a fragment of the pipe's wall. Notation: T_b – air flow temperature at the outlet of the mining blower; T_1 , T_2 – the temperature at the internal and external surfaces of the wall correspondingly; T_a – the temperature of the atmosphere; δ – the thickness of the wall.

The pipe's wall is cylindrical, but as long as its thickness is much less than the internal diameter d , the calculation can be performed using formulae for a plane wall with no significant errors.

Heat flow density q through the wall is [8]

$$q = k(T_b - T_a),$$

where k – the coefficient of heat exchange.

The value of the heat exchange coefficient is determined by the formula

$$k = \left(\frac{1}{\alpha_b} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_a} \right)^{-1},$$

where α_b – is the coefficient of the internal flow heat transmission to the wall; α_a – the coefficient of heat transmission from the wall to the atmosphere; λ – the coefficient of heat conductivity of polymeric composite materials.

The temperatures of the internal and the external surfaces of the wall are determined according to the formulae:

$$\begin{aligned} T_1 &= T_b - \frac{q}{\alpha_b}; \\ T_2 &= T_a + \frac{q}{\alpha_a}. \end{aligned} \quad (1)$$

Formulae (1) provide the value of maximum temperature T_1 , the impact of which the material at the inlet of the pipeline is exposed to; formulae (1) make it possible to calculate average wall heating temperature \bar{T}_y (fig. 1) in the condition of the steady-state heat exchange:

$$\bar{T}_y = \frac{T_1 + T_2}{2}.$$

Of interest is the time of heating, after which the process of heat exchange in the initial part of a pipe will be steady.

The problem of unsteady-state heat exchange calculation is rather labour-intensive [9]. Taking into account that at the present stage of investigation, heavy demands are not imposed on the accuracy, we will confine ourselves to rough estimate.

Let us make some assumptions:

- there is no heat transmission from the external surface of the pipe to the atmosphere ($\alpha_a = 0$);
- the pipe heats to temperature \bar{T}_y throughout the length.

Then, for a minor fragment with a mass m and internal surface area s of the pipe near the entry end, the following equality is true

$$cmd\Delta T' = \alpha_b s \Delta T' dt, \quad (2)$$

where c – the specific heat capacity of polymeric composite materials; $\Delta T' = T_b - \bar{T}_y$ – the difference of flow and pipe temperatures at a time; $d\Delta T'$ – pipe temperature increment in a time dt .

The relation $\delta \ll d$ between the thickness and the internal diameter d of the pipe means that internal and external diameters of the pipe are similar in value, consequently,

$$m \equiv \rho s \delta, \quad (3)$$

where ρ – the density of polymeric composite materials.

Substitution of (3) into (2) eliminates undetermined parameters m and s :

$$cp\delta d\Delta T' = \alpha_B \Delta T' dt,$$

from which

$$\frac{d\Delta T'}{\Delta T'} = \frac{\alpha_B}{cp\delta} dt. \quad (4)$$

Integration of (4) makes it possible to find temperatures difference dependence on the time for the initial conditions ($t = 0; \Delta T' = \Delta T_0 = T_B - T_a$):

$$\Delta T' = \Delta T_0 \left(1 - \exp \left(-\frac{\alpha_B t}{cp\delta} \right) \right). \quad (5)$$

Having expressed t in terms of (5), we get the unknown duration t_y of pipe heating up to the average temperature \bar{T}_y :

$$t_y = -\frac{cp\delta}{\alpha_B} \ln \left(1 - \frac{T_B - \bar{T}_y}{\Delta T_0} \right). \quad (6)$$

Formulae (5) and (6) provide a rough idea of the dynamics of wall heating process.

Study of heat processes influence on the winding velocity. It is convenient to build rough dependence of flow temperature on the coordinate of arbitrary cross-section of a pipe with the help of the equation by V. T. Shukhov [10], reduced to

$$\Delta T = \Delta T_0 \exp \left(-\frac{k\pi d}{Mc_B} x \right), \quad (7)$$

where ΔT – flow temperature rise over the temperature of the atmosphere at a height of x from the pipe's entry end; ΔT_0 – the same but in the entry end (at the outlet of the mining blower); M – air mass flow rate under the loaded skip; c_B – the specific heat capacity of air in the pipeline; x – the distance between the entry and arbitrary cross-sections of a pipe.

Using Gay-Lussac law [11, 12] and formula (7), we get the dependences of air-flow rate Q and air velocity v in the pipeline on the coordinate x :

$$\begin{aligned} Q &= Q_0 \left[1 - \frac{\Delta T_0}{273} \left(1 - \exp \left(-\frac{k\pi d}{Mc_B} x \right) \right) \right]; \\ v &= v_0 \left[1 - \frac{\Delta T_0}{273} \left(1 - \exp \left(-\frac{k\pi d}{Mc_B} x \right) \right) \right]; \\ v_0 &= \frac{4Q_0}{\pi d^2}, \end{aligned} \quad (8)$$

where Q_0, v_0 – consumption and average velocity at the entry end of a pipeline.

Not taking into account the periods of acceleration and braking of a skip, we get flow rate which is average for the shaft depth:

$$\bar{v} = v_0 \int_0^H \left[1 - \frac{\Delta T_0}{273} \left(1 - \exp\left(-\frac{k\pi d}{Mc_B} x\right) \right) \right] dx;$$

from which

$$\bar{v} = v_0 \left[1 - \frac{\Delta T_0}{273} + \frac{\Delta T_0 Mc_B}{273 k \pi d H} \left(1 - \exp\left(-\frac{k\pi d H}{Mc_B}\right) \right) \right], \quad (9)$$

where H – the length of a pipeline, roughly the size of the depth of a mine shaft.

According to (9), it is convenient to determine the average winding velocity of a skip during the calculation of the duty cycle of the unit.

Fig. 2 illustrates skip winding velocity variation conditioned by air flow cooling.

Air mass flow rate under the loaded skip is

$$M = \rho_t Q_0. \quad (10)$$

In (10) ρ_t – the density of air at the outlet of a mining blower is

$$\rho_t = \rho_{0t} \frac{p_0 + \Delta p_r}{p_0} = \rho_{0t} \left(1 + \frac{\Delta p_r}{p_0} \right),$$

where ρ_{0t} – the density of air under the atmospheric pressure and temperature which the air gets after passing through the mining blower; p_0 – the atmospheric pressure; Δp_r – overpressure under the loaded skip.

Overpressure Δp_r is calculated by the following formula

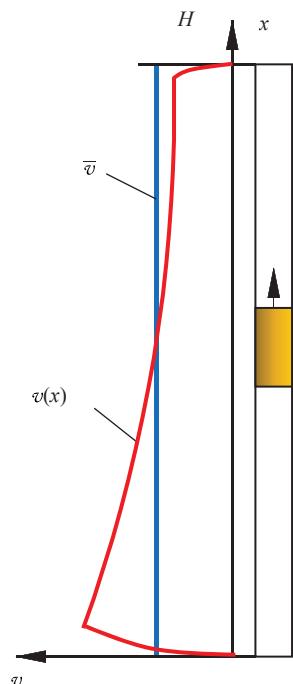
$$\Delta p_r = \frac{4(m_u + m_c)g}{\pi d^2},$$

where m_u , m_c – the mass of mineral and the proper weight of a skip correspondingly; g – gravitational acceleration; d – internal diameter of pipelines.

The formula by V. T. Shukhov is devised for horizontally oriented pipe, that is why a question arises about its applicability to the vertical pipeline. In [13], heat transmission coefficient α_a dependence on the coordinate of a point on the wall of a vertical pipe is shown. Thus, the applicability of the case under consideration is well founded.

Fig. 2. Variation of flow velocity in the pipeline: $v(x)$ – dependence between velocity and x -coordinate; \bar{v} – average velocity
Рис. 2. Изменение скорости потока в трубопроводе: $v(x)$ – зависимость скорости от координаты x ; \bar{v} – средняя скорость

Inverse problem solution also becomes possible, which is necessary for design calculation of a unit: the calculation of capacity Q_0 of an air blowing station, which is necessary to provide calculated value of average velocity \bar{v} .



Substitution of (8) and (10) into (9) allows to get the following expression

$$\bar{v} = \frac{4Q_0}{\pi d^2} \left[1 - \frac{\Delta T_0}{273} + \frac{\Delta T_0 \rho_i Q_0 c_{\text{B}}}{273 k \pi d H} \left(1 - \exp \left(-\frac{k \pi d H}{\rho_i Q_0 c_{\text{B}}} \right) \right) \right], \quad (11)$$

which is an equation towards Q_0 under the predetermined \bar{v} .

The complexity of equation (11) solution comes from the fact that the unknown value is a part of the exponent's index. With the account of the approximate character of calculations it is advisable to consider that the following equality holds

$$-\frac{k \pi d H}{\rho_i Q_0 c_{\text{B}}} \approx -\frac{k \pi d H}{\rho_0 \bar{Q} c_{\text{B}}},$$

where \bar{Q} – relative air flow rate, determined according to the average velocity:

$$\bar{Q} = \bar{v} \frac{\pi d^2}{4}.$$

Then (11), after algebraic transformations, will be written as the following equation

$$Q_0^2 + A Q_0 - B = 0$$

with the positive root

$$Q_0 = \sqrt{\frac{A^2}{4} + B} - \frac{A}{2}, \quad (12)$$

where

$$A = \left(\frac{273}{\Delta T_0} - 1 \right) \frac{k \pi d H}{\rho_i c_{\text{B}} \left[1 - \exp \left(-\frac{k \pi d H}{\rho_0 \bar{Q} c_{\text{B}}} \right) \right]};$$

$$B = \frac{68,3 \bar{v} k \pi^2 d^3 H}{\Delta T_0 \rho_i c_{\text{B}} \left[1 - \exp \left(-\frac{k \pi d H}{\rho_0 \bar{Q} c_{\text{B}}} \right) \right]}. \quad (13)$$

Summary. The ratios (11), (12), and (13) make it possible to determine the value of mining blower capacity required to provide for skip calculated average winding velocity, predetermined cycle duration, and unit capacity.

REFERENCES

1. Mine 2011. The game has changed. Review of global trends in mining industry. PWC 2011. Available from: https://www.pwc.kz/en/events/assets/mine_2011_eng.pdf [Accessed 18th December 2018].
2. Outlook: Prospects for recovery in the global mining industry. KPMG, 2010. Available from: <https://home.kpmg.com/content/dam/kpmg/pdf/2012/08/building-business-value-part-2.pdf> [Accessed 18th December 2018].
3. Litvinskii G. G. The point of the scientific doctrine "Mine of the 21st century". *Ugol = Coal*. 2006; 11: 44–46. (In Russ.)

4. Tauger V. M., Volkov E. B., Kholodnikov Iu. V. Skip pneumowinding plant with advanced energy efficiency. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal.* 2017; 2: 77–83. (In Russ.)
5. AAB AB – Mine Hoist Systems. Available from: <http://www.mining-technology.com/contractors> [Access date 20th December 2018].
6. Industrial Siemens air blowers and turbo blowers. Available from: <http://www.bibliotecar.ru> [Access date 17th December 2018].
7. Siemens air blowers and compressors (HV-turbo). Available from: [https://swedepump.by/blower%20and%20siemens%20\(hv-turbo\)%20compressor.html](https://swedepump.by/blower%20and%20siemens%20(hv-turbo)%20compressor.html) [Access date 18th December 2018].
8. Mazo A. B. *The basics and the methods of calculating heat transfer.* Kazan: Kazan university Publishing; 2013. (In Russ.)
9. Bogdanov S. N. *Refrigeration engineering. Air conditioning. Properties of the matter.* St. Petersburg: SPbAKhPT Publishing; 1999. (In Russ.)
10. Valeev A. R. *Thermal modes of pipelines. The problem of accounting oil and gas heating in the pipelines.* Available from: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Valeev/Valeev_1.pdf [Access date 18th December 2018].
11. Belokon N. I. *The framework of thermodynamics.* Moscow: Nedra Publishing; 1968. (In Russ.)
12. Ovsiannikov M. I., Orlova E. G., Kostylev I. I. *Thermal engineering technical thermodynamics and heat transfer.* St. Petersburg: Nestor-Istorija Publishing; 2013. (In Russ.)
13. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. *The basics of heat transfer.* Moscow: Energiia Publishing; 1977. (In Russ.)

Received 14 January, 2019

Information about authors:

Vitalii M. Tauger – PhD (Engineering), Associate professor, the Head of the Department of Engineering Mechanics, Ural State Mining University. E-mail: tauger2016@yandex.ru

Aleksandr A. Leontiev – PhD student of the Department of Engineering Mechanics, Ural State Mining University. E-mail: zufh123@gmail.com

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-106-113

Расчет теплообменных процессов в подъемном трубопроводе скиповой пневмоподъемной установки

Таугер В. М.¹, Леонтьев А. А.¹

¹ Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.

Реферат

Введение. В статье рассмотрены термодинамические процессы, происходящие в подъемном трубопроводе скиповой пневмоподъемной установки.

Цель работы. Проанализировать установление температурного режима эксплуатации трубопровода и оценить влияние охлаждения воздуха на скорость движения ската в подъемном трубопроводе скиповой пневмоподъемной установки.

Методология. Составлена математическая модель системы «воздуходувка–скат–подъемный трубопровод–окружающая среда», которая позволит получить зависимости температуры транспортирующей среды и скорости груженого ската от глубины. Выведены формулы для оценки нагрева стенки трубопровода и охлаждения воздуха внутри трубопровода. Найдено соотношение, позволяющее определить время нагрева, по истечении которого процесс теплообмена на начальном участке трубы станет установившимся.

Результаты. Обоснована актуальность поставленных задач. Приведены зависимости объемного расхода и скорости воздуха в трубопроводе от координаты высоты, а также изменения скорости подъема ската, обусловленного охлаждением воздушного потока. Описано решение обратной задачи: вычисление производительности воздухонагнетательной станции, которая необходима для обеспечения расчетного значения средней скорости, результаты которого позволят определить значение подачи воздуходувки, обеспечивающей расчетную среднюю скорость подъема ската, заданную продолжительность цикла и производительность установки.

Выводы. Полученные в рамках расчета соотношения дают возможность определить значение подачи воздуходувки, необходимое для обеспечения расчетной средней скорости подъема ската и заданных продолжительности цикла и производительности установки.

Ключевые слова: подъемная установка; скат; пневмосистема; трубопровод; теплообменные процессы; математическая модель; рудничный пневмоподъем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mine 2011. The game has changed. Review of global trends in mining industry. PWC 2011. URL: https://www.pwc.kz/en/events/assets/mine_2011_eng.pdf (дата обращения: 18.12.2018).

2. Outlook: Prospects for recovery in the global mining industry. KPMG, 2010. URL: <https://home.kpmg.com/content/dam/kpmg/pdf/2012/08/building-business-value-part-2.pdf> (дата обращения: 18.12.2018).
3. Литвинский Г. Г. Сущность научной доктрины «Шахта XXI века» // Уголь. 2006. № 11. С. 44–46.
4. Таугер В. М., Волков Е. Б., Холодников Ю. В. Скиповая пневмоподъемная установка повышенной энергоэффективности // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 2. С. 77–83.
5. AAB AB – Mine Hoist Systems. URL: <http://www.mining-technology.com/contractors> (дата обращения: 20.12.2018).
6. Промышленные воздуходувки и турбовоздуходувки Siemens. URL: <http://www.bibliotecar.ru> (дата обращения: 17.12.2018).
7. Воздуходувки и компрессоры Siemens (HV-turbo). URL: [https://swedepump.by/blower%20and%20siemens%20\(hv-turbo\)%20compressor.html](https://swedepump.by/blower%20and%20siemens%20(hv-turbo)%20compressor.html) (дата обращения: 18.12.2018).
8. Мазо А. Б. Основы теории и методы расчета теплопередачи. Казань: Казан. ун-т, 2013. 144 с.
9. Богданов С. Н. Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ. СПб.: СПбАХПТ, 1999. 320 с.
10. Валеев А. Р. Тепловые режимы трубопроводов. Опрос учета нагрева нефти и газа в трубопроводах. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Valeev/Valeev_1.pdf (дата обращения: 18.12.2018).
11. Белоконь Н. И. Основные принципы термодинамики. М.: Недра, 1968. 112 с.
12. Овсянников М. И., Орлова Е. Г., Костылев И. И. Теплотехника: техническая термодинамика и теплопередача. СПб.: Нестор-История, 2013. 296 с.
13. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.

Сведения об авторах:

Таугер Виталий Михайлович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технической механики Уральского государственного горного университета. E-mail: tauger2016@yandex.ru

Леонтьев Александр Анатольевич – аспирант кафедры технической механики Уральского государственного горного университета. E-mail: zufh123@gmail.com

Для цитирования: Таугер В. М., Леонтьев А. А. Расчет теплообменных процессов в подъемном трубопроводе скиповой пневмоподъемной установки // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 4. С. 106–113 (In Eng.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-106-113

For citation: Tauger V. M., Leontiev A. A. The calculation of heat exchange processes in the conveying pipe of a skip pneumatic winder. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 4: 106–113. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-106-113

Полигармонические возможности вибромашин с карданной передачей в трансмиссии инерционного привода

Беловодский В. Н.^{1*}, Букин С. Л.¹

¹ Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

*e-mail: v.belovodskiy@gmail.com

Реферат

Введение. Исследованиями установлено, что полигармонические колебания, возбуждаемые в рабочих органах вибромашин, могут существенно интенсифицировать различные технологические процессы. Выявлено, что чем насыщеннее частотный спектр колебаний, тем выше вероятность возникновения резонансных перемещений частиц обрабатываемой среды, что повышает качественные и количественные технологические показатели работы вибромашин.

Цель работы. Изучить характер колебаний рабочего органа одномассовой вибромашины с шарниром Гука в трансмиссии привода дебалансного вибровозбудителя, а также получить представление о полигармонических возможностях таких машин.

Методология. Представление математической модели движения рабочего органа вибромашины в виде линейного дифференциального уравнения второго порядка. Особенностью колебательной системы является воздействие на нее возбуждающей силы центробежного вибровозбудителя, который приводится во вращение электродвигателем при помощи карданного вала. Решение задачи осуществлялось численным методом с определением «почти периода» и спектрального состава колебаний рабочего органа.

Результаты. Выявлен непериодический характер колебаний, предложена и апробирована методика исследования их спектрального состава, основанная на определении «почти периода» как момента «замыкания» фазовой траектории. По результатам проведенного исследования вскрыты особенности колебаний вибромашин с инерционным приводом, отмечены их достоинства и недостатки.

Выходы. В спектре перемещений рабочего органа вибромашины доминирующими являются гармонические составляющие с близкими частотами. К числу положительных особенностей рассмотренной схемы также можно отнести глобальную устойчивость формируемых полигармонических режимов движения.

Ключевые слова: вибрационная машина; возбудитель колебаний; шарнир Гука; спектральный состав; «почти период»; полигармоника.

Введение. С момента широкого применения вибрационных машин в различных отраслях промышленности практически все они создавались с реализацией гармонического закона колебаний. Однако исследованиями, выполненными отечественными и зарубежными учеными, установлено, что полигармонические колебания, возбуждаемые в рабочих органах вибромашин, могут существенно интенсифицировать технологические процессы [1, 2]. Работы, проведенные во второй половине прошлого века, показали эффективность полигармонических вибраций в процессах уплотнения бетонных смесей, при грохочении, измельчении и сепарации полезных ископаемых, при транспортировании влажных и липких материалов и т. д. Выявлено [1], что чем насыщеннее частотный спектр колебаний, тем выше вероятность возникновения резонансных перемещений частиц обрабатываемой среды, что улучшает условия обработки материала и повышает качественные и количественные технологические показатели работы вибромашин.

Развитие подходов к формированию полигармонических вибраций в вибромашиностроении идет в нескольких направлениях. Первое направление включает традиционные для вибрационной техники способы возбуждения колебаний механических систем, к которым относятся силовой и кинематический [3]. Результатом является создание вибровозбудителей динамического (центробежные и планетарные) и кинематического (кривошипно-шатунные, эксцентриковые) типов. Кроме них в ряде случаев применяются гидравлические, пневматические, электромагнитные и электродинамические полигармонические вибровозбудители. Исследованию колебательных систем и вибрационных машин с использованием полигармонических вибровозбудителей посвящены работы А. А. Аграновской, И. И. Блехмана, И. Ф. Гончаревича, Э. Э. Лавендела, Я. Г. Пановко, В. Н. Потураева, В. П. Франчука, А. Г. Червоненко, В. К. Преснякова, З. Е. Филера, Н. П. Ярошевича, В. П. Надутого, Г. А. Шевченко, G. Erlenstädt, R. Modrzewski, P. Wodziński и других ученых. К другому направлению можно отнести разработку вибромашин, принципиальные схемы которых ориентированы на использование эффектов, присущих нелинейным системам. В число работ, посвященных данному направлению, следует включить работы И. И. Быховского (супергармонический вибропривод, основанный на усилении неравномерности вращения дебалансов), Б. И. Крюкова (многомассовые вибромашины с кусочно-линейными упругими связями), Е. А. Логвиненко (асимметричная упругая связь подвижных масс вибромашин), М. В. Хвингии (субгармонические вибромашины с электромагнитным приводом). Заметная роль в изучении сложных, суб- и супергармонических резонансов в нелинейных системах принадлежит ученым Рижской школы вибroteхники (С. Л. Цыфандский, В. И. Бересневич, А. Б. Окс, В. М. Закржевский, В. Н. Беловодский).

Авторы статьи продолжают эти исследования, в частности, установлена возможность генерирования полигармонических колебаний в многомассовых вибромашинах [4, 5]. Однако выявлены и проблемы, связанные с формированием нелинейной характеристики упругой связи подвижных масс вибромашины заданного вида. Был проведен анализ нелинейных свойств упругих элементов, выполненных на базе постоянных магнитов и при использовании фасонных стальных пружин. Несмотря на возможность их применения в конструкциях вибромашин, способных реализовать суб- и супергармонические резонансы, авторов не удовлетворила сложность технических решений, трудоемкость изготовления и, соответственно, их стоимость. Поэтому и в настоящее время продолжаются поиски более простых конструктивных вариантов. Внимание авторов привлекла особенность работы универсального шарнира Гука (рис. 1): несоосное соединение ведомого и ведущего валов через один шарнир вызывает неравномерные вращения ведомого вала даже в том случае, когда вращение ведущего вала вполне равномерно [6].

Эта зависимость описывается соотношением [7–9]

$$\dot{\phi}(t) = \frac{\omega \cos \beta}{1 - \sin^2 \beta \cos^2(\omega t)}, \quad (1)$$

где ω и $\dot{\phi}$ – угловые скорости ведущего и ведомого валов соответственно; β – угол разворота валов; t – время.

В связи с этим продолжение работ по изучению возможностей формирования полигармонических колебаний рабочего органа вибромашины при помощи простых технических решений является актуальным. В случае успеха они мо-

гут быть использованы при создании новых и модернизации серийно выпускаемых вибромашин.

Цель работы – изучить характер колебаний рабочего органа одномассовых инерционных вибромашин с шарниром Гука в трансмиссии привода дебалансного вибровозбудителя при неосоосном соединении приводного вала и вала вибровозбудителя, а также получить представление о полигармонических возможностях таких машин.

Методика исследования. Исследование проводится путем рассмотрения вибромашин с однонаправленными колебаниями рабочего органа при традиционных допущениях: упругие связи являются линейными, колеблющиеся массы абсолютно твердыми (сосредоточенными), а электродвигатель привода вибровозбудителя имеет неограниченную мощность (идеальный двигатель). Численное моделирование осуществляется в среде Matlab.

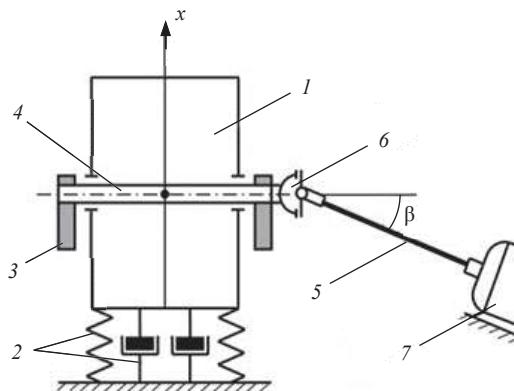


Рис. 1. Инерционная вибромашина с карданным валом в трансмиссии привода вращения вибровозбудителя:
1 – рабочий орган; 2 – упругие опоры (подвеска); 3 – дебаланс вибровозбудителя; 4 – вал вибровозбудителя; 5 – приводной вал; 6 – универсальный шарнир (шарнир Гука);
7 – электродвигатель

Fig. 1. Inertial vibrating machine with cardan shaft in the drive transmission of a vibration exciter:

1 – working body; 2 – elastic supports (suspension);
3 – unbalance of the vibration exciter; 4 – exciter shaft; 5 – drive shaft; 6 – universal joint (Hooke's joint); 7 – electric motor

Основное содержание. При указанных допущениях движение вибромашины описывается одним линейным дифференциальным уравнением второго порядка:

$$P(t) = m\ddot{x} + b_x \dot{x} + c_x x, \quad (2)$$

где $P(t)$ – возбуждающая сила; m – масса колеблющихся частей вибромашины; b_x – коэффициент диссипации, $b_x = \mu c_x$; c_x – коэффициент жесткости упругих элементов вдоль оси x ; μ – коэффициент сопротивления.

Особенностью системы является воздействие на нее возбуждающей силы центробежного вибровозбудителя, который приводится во вращение электродвигателем при помощи карданного вала.

Согласно (1) эта сила

$$P(t) = S_0 (\dot{\phi}(t))^2 \sin(\dot{\phi}(t)t),$$

где S_0 – статический момент массы возбудителя,

$$S_0 = m_v r,$$

m_v, r – масса и эксцентрикитет неуравновешенных частей дебалансного вибровозбудителя соответственно.

Тогда

$$P(t) = m_v r \left(\frac{\cos \beta}{1 - \sin^2 \beta \cdot \cos^2 \omega t} \right)^2 \sin \left(\frac{\cos \beta}{1 - \sin^2 \beta \cdot \cos^2 \omega t} \omega t \right).$$

С целью снижения числа определяющих параметров приведем уравнение (2) к безразмерному виду. Разделим обе его части на m и перейдем к безразмерному времени $\tau = p_0 t$, где p_0 – собственная частота системы. После этого, приняв $x = \Delta \xi$ (где $\Delta = 10^{-3}$ м), разделив уравнение на Δp_0^2 и обозначив $\eta = \omega/p_0$, получим дифференциальное уравнение движения рабочего органа в безразмерной форме:

$$\frac{d^2 \xi}{d\tau^2} + v \frac{d\xi}{d\tau} + \xi = \delta(\tau), \quad (3)$$

где $v = \mu p_0$; $\delta(\tau) = \delta_0 \left(\frac{\cos \beta}{1 - \sin^2 \beta \cos^2(\eta \tau)} \right)^2 \sin \left(\frac{\eta \cos \beta}{1 - \sin^2 \beta \cos^2(\eta \tau)} \tau \right)$; $\delta_0 = 10^3 q r \eta^2$; $q = m_v/m$ – относительная масса неуравновешенных частей вибровозбудителя.

При проведении расчетов значения параметров примем равными $v = 0,1$; $\delta_0 = 54$; $\eta = 3$ (далекозарезонансный режим работы), что соответствует реальным параметрам вибромашин технологического назначения, а величину разворота валов будем считать равной $\beta = \pi/4$. Поведение системы рассмотрим на временном промежутке $\tau \in [0, 400]$ и примем нулевые начальные условия, т. е.

$$\xi(0) = \frac{d\xi(0)}{d\tau} = 0. \quad (4)$$

Отметим, что величина промежутка интегрирования составляет примерно 190 оборотов вала двигателя, а при принятом уровне сопротивления в системе с периодическим возбуждением, т. е. при $\beta = 0$, установление стационарных колебаний наступает практически уже при $\tau = 100$.

Предварительное численное решение задачи (3), (4), выполненное одношаговыми методами Рунге–Кутты и многошаговым методом Адамса с шагом интегрирования, равным 0,01, показало близкие результаты, поэтому в качестве основного метода расчета далее принят первый как более быстродействующий.

На рис. 2 приведены фрагменты решения. На первом из графиков (рис. 2, а) представлен закон изменения возмущающей силы, т. е. правой части уравнения (3), на рис. 2, б – закон движения рабочего органа. Их визуальный анализ дает основания предполагать, что законы изменения возмущающей силы и движения рабочего органа имеют полигармонический характер с иррациональным соотношением частот, т. е. являются «почти периодическими».

В этом случае аппроксимация $\xi(\tau)$ конечным «рядом Фурье» выглядит так [10–12]:

$$\xi(\tau) = \sum_{n=-N}^N c_n e^{j \lambda_n \tau}; \quad c_n = \bar{c}_{-n}, \quad (5)$$

где коэффициенты разложения c_n определяются соотношениями

$$c_n = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \xi(\tau) e^{-i\lambda_n \tau} d\tau, \quad (6)$$

а значения показателей Фурье λ_n удовлетворяют условию $c_n \neq 0$.

Однако численное определение этих показателей, исходя из соотношения (6), требует перебора всех возможных значений λ_n от нуля до бесконечности. Такая

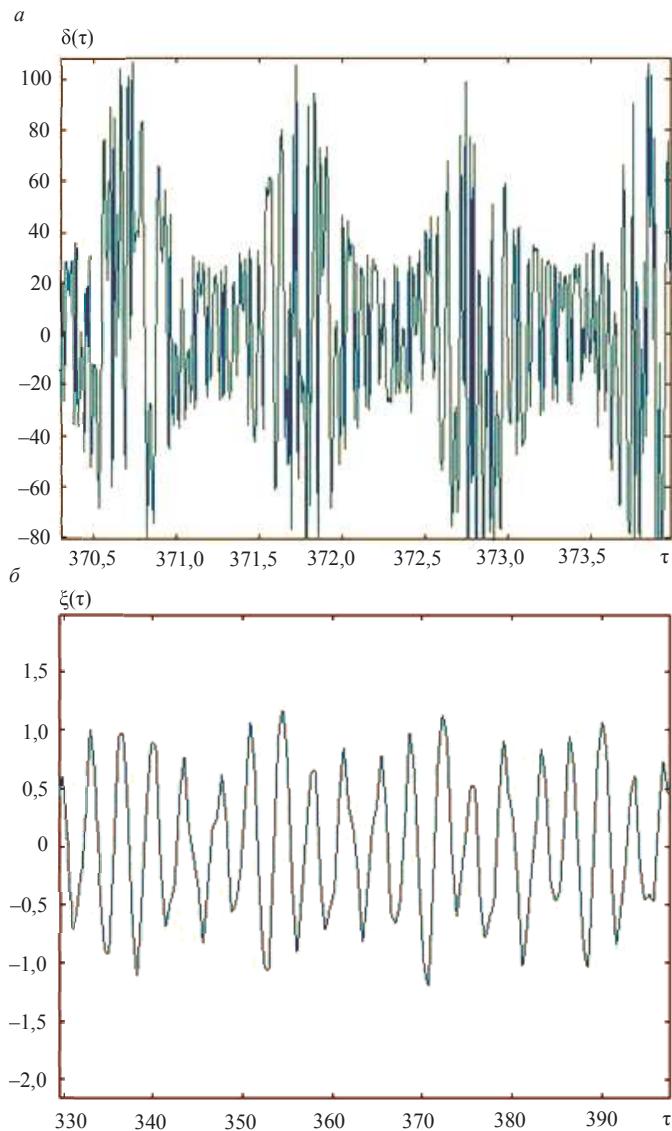


Рис. 2. Фрагменты анализа системы (3), (4) при $\beta = \pi/4$:
 a – закон изменения внешней силы; b – закон движения рабочего органа вибромашины

Fig. 2. Some results of the analysis of system (3), (4) for $\beta = \pi/4$:
 a – the law of external force change; b – vibrating machine working body motion law

процедура, даже выполняемая с некоторым шагом h_λ , с одной стороны, весьма затруднительна технически, а с другой – даже при небольших отличиях очередного текущего значения λ от одного из λ_n этот предел всегда оказывается равным нулю.

С учетом сказанного, приближенный спектральный анализ колебаний выполним следующим образом.

1. На «стационарном» временном участке устанавливаем «почти период» колебаний путем определения момента «замыкания» фазовой траектории, точнее ее проекции на плоскость $(\xi, d\xi/dt)$, с последующим наложением соседних участков законов движения для их визуального сравнения.

2. Проводим спектральный анализ выделенного участка, определяем амплитуды гармонических составляющих и оставляем те из них, амплитуды которых составляют не менее 3 % наибольшей. После этого определяем и начальные фазы отобранных гармоник.

3. Формируем описание «восстановленного» режима, строим его график и путем наложения осуществляем его визуальный контроль с полученным ранее результатом численного расчета.

В результате выполнения указанных мероприятий получены следующие результаты.

1. «Почти период» колебаний оказался равным $T = 17,81$. На рис. 3, *a* представлена проекция фазовой траектории системы на отрезке $\tau \in [354,47; 372,28]$ на плоскость $(\xi, d\xi/dt)$, «погрешность замыкания» в данном случае составила $\|\xi_{\text{кон}} - \xi_{\text{нач}}\| = 0,2079$.

2. На участке $\tau \in [354,47; 372,28]$ с шагом $\Delta\tau = 0,01$ было выполнено формирование массива значений $\xi_i = \xi(\tau_i)$, по которым проведено определение коэффициентов многочлена (5) с помощью процедуры *ifft* (где $\lambda_n = n\eta_1$; $\eta_1 = 2\pi/T = 0,3528 \approx \sqrt{2}/4$), реализующей обратное преобразование Фурье, определены амплитуды гармонических составляющих $Am(n) = 2\sqrt{c_n c_{-n}}$, выделены наиболее существенные по указанному критерию и определены их начальные фазы по соотношениям

$$\varphi_n = \begin{cases} \arccos \frac{2\operatorname{Re}(c_{-n})}{Am(n)}, & \operatorname{Im}(c_{-n}) > 0; \\ -\arccos \frac{2\operatorname{Re}(c_{-n})}{Am(n)}, & \operatorname{Im}(c_{-n}) < 0. \end{cases}$$

3. «Восстановленный» режим в тригонометрической форме выглядит так:

$$\begin{aligned} \xi(\tau) = & 0,0547 \cos(2\eta_1\tau - 0,6185) + 0,1456 \cos(3\eta_1\tau - 0,8380) + \\ & + 0,0420 \cos(4\eta_1\tau - 1,5136) + 0,7637 \cos(5\eta_1\tau + 0,0909) + 0,2341 \cos(6\eta_1\tau + 0,3434) + \\ & + 0,0564 \cos(11\eta_1\tau - 0,4238) + 0,0891 \cos(12\eta_1\tau + 3,0878). \end{aligned}$$

Его визуальный сравнительный анализ с результатом численного расчета, полученный путем наложения графиков (рис. 3, *б*), показывает достаточно удовлетворительное совпадение.

Изложенные результаты, по мнению авторов, отражают адекватность полученного разложения численному расчету и демонстрируют выраженный полигармонический характер закона движения. Наиболее весомыми в нем являются третья, пятая и шестая гармонические составляющие, имеющие частоты 1,0584; 1,7640; 2,1168 при угловой скорости вращения вала двигателя, равной 3. Таким образом, в данном случае реализуются, по существу, колебания с субгармоническими частотами. Вместе с тем следует отметить и снижение интенсивности

колебаний при введении разворота валов. Так, если в линейной системе, т. е. при $\beta = 0$, амплитуда колебаний рабочего органа составляет $\delta_0 / (\eta_2 - 1) \approx 6,75$ мм, то при $\beta = \pi/4$ полуразмах колебаний немногим более 1 мм. Хотя можно добиться ее увеличения за счет приближения к резонансу, уменьшив скорость вращения вала двигателя.

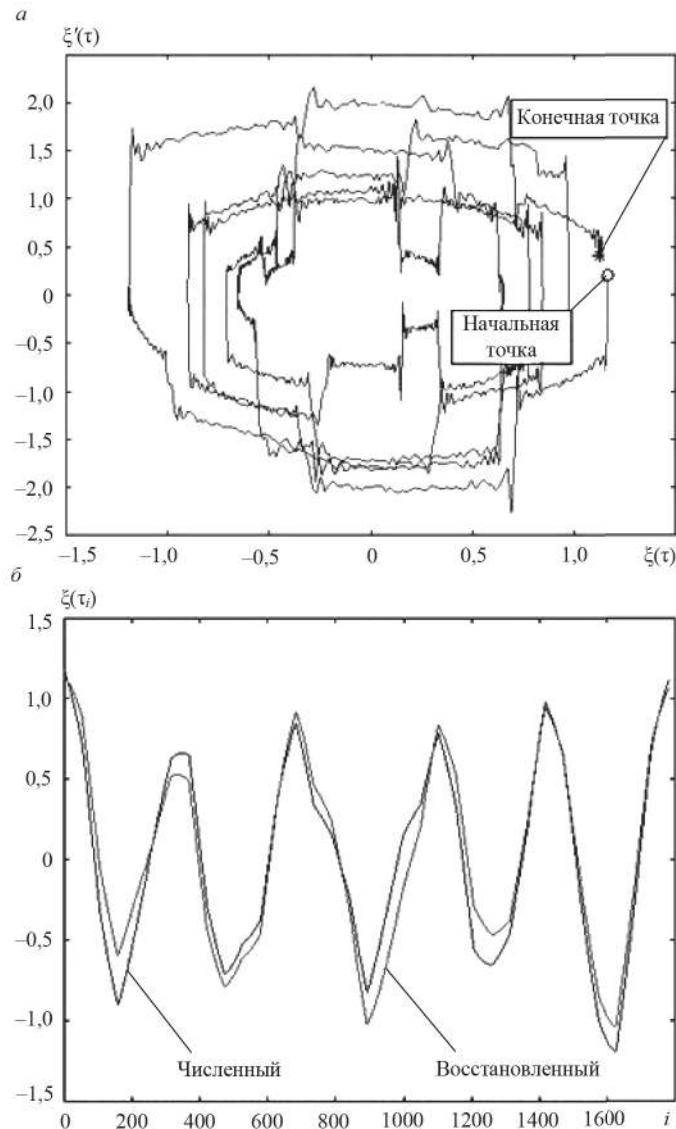


Рис. 3. К определению «почти периода» колебаний:
 α – фазовая траектория для $\tau \in [354, 47; 372, 28]$; β – результаты наложения «восстановленного» и численного законов движения
Fig. 3. On oscillations "almost-period" determination:
 α – phase trajectory for $\tau \in [354, 47; 372, 28]$; β – imposition results of motion laws

В заключение отметим, что ввиду линейности уравнения (2) его стационарное решение могло быть найдено и аналитически после предварительного разложения правой части уравнения в ряд Фурье. Однако при таком подходе, к сожалению, не вполне очевидны требования при выборе «почти

периода». Поэтому этот вариант решения задачи требует дополнительного обоснования.

Заключение. Подводя итог проведенному исследованию, следует отметить, что характер колебаний рабочего органа при несоосном соединении ведущего и ведомого валов в трансмиссии вибрационных машин с инерционным вибровозбуждением становится негармоническим и непериодическим. Для приближенного спектрального анализа таких колебаний в работе предложена и апробирована методика, основанная на определении «почти периода» колебаний как момента «замыкания» проекции фазовой траектории на плоскость (ξ , $d\xi/d\tau$). Выполнен анализ закона перемещения рабочего органа вибромашины для угла разворота валов, равного $\pi/4$, который показал существенное падение интенсивности вибраций, выражаемое в снижении полуразмаха колебаний с одновременным появлением полигармонических составляющих, субгармонических относительно скорости вращения приводного вала. В спектре перемещений доминирующими являются гармонические составляющие с близкими частотами, что может оказаться достоинством в случае близкого по однородности состава обрабатываемой смеси. Также к числу положительных особенностей рассмотренной схемы можно отнести и глобальную устойчивость формируемых полигармонических режимов движения, что обуславливается линейностью динамической системы.

Изложенная информация может быть полезной при совершенствовании технологий и разработке вибрационных машин, а также при планировании и проведении экспериментов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гончаревич И. Ф., Тиль Б. Асимметричные колебания – средство повышения эффективности вибрационных технологических процессов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2005. № 10. С. 11–16.
2. Bak L., Loginov I., Michalcewicz J., Slepian V., Stachowicz F. Construction of screener oriented on application of parametric resonance // Zeszyty naukowe politechniki rzeszowskiej. RUTMech. 2013. T. XXX. Z. 85 (2/13). S. 109–117.
3. Вибрации в технике. Т. 4. Вибрационные процессы и машины / под ред. Э. Э. Лавендела. М.: Машиностроение, 1981. 509 с.
4. Belovodskiy V. N., Bukin S. L., Sukhorukov M. Y., Babakina A. A. 2:1 superharmonic resonance in two-masses vibrating machine // Journal of Vibration Engineering and Technologies. 2015. Vol. 3(2). P. 123–135.
5. Belovodskiy V., Bukin S., Sukhorukov M. Nonlinear antiresonance vibrating screen // Advances in Mechanisms Design. Proceedings of TMM 2012. Mechanisms and Machine Science. Vol. 8. Springer, 2012. P. 162–173.
6. Букин С. Л., Букина А. С., Селиверстов В. В. Динамическая модель одномассовой вибромашины с карданным валом в трансмиссии дебалансного возбудителя колебаний // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международ. сб. науч. тр. Донецк: ДонНТУ, 2014. Вып. 4 (50). С. 65–73.
7. Derzhanskii V., Taratorkin I. Subharmonic resonances in the hydromechanical transmission of the wheeled chassis // Trans Motauto World. 2016. Vol. 1. No. 2. P. 31–35.
8. Кожевников С. Н. Теория механизмов и машин. М.: Машиностроение, 1973. 592 с.
9. Проектирование трансмиссий автомобилей / под ред. А. И. Гришкевича. М.: Машиностроение, 1984. 272 с.
10. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. М.: Наука, 1964. 772 с.
11. Левитан Б. М., Жиков В. В. Почти-периодические функции и дифференциальные уравнения. М.: Моск. ун-т, 1978. 205 с.
12. Liu J., Zhang C. Composition of piecewise pseudo almost periodic function and applications to abstract impulsive differential equations // Advances in Difference Equations. 2013:11. DOI:10.1186/1687-1847-2013-11

Поступила в редакцию 28 декабря 2018 года

Сведения об авторах:

Беловодский Валерий Николаевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры компьютерного моделирования и дизайна Донецкого национального технического университета. E-mail: v.belovodskiy@gmail.com

БУКИН Сергей Леонидович – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых Донецкого национального технического университета. E-mail: s.bukin08@gmail.com

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-114-123

Polyharmonic opportunities of vibrating machines with cardan joint in inertial drive transmission

Valerii N. Belovodskii¹, Sergei L. Bukin¹

¹ Donetsk National Technical University, Donetsk.

Abstract

Introduction. A number of studies have found that polyharmonic oscillations excited in the working bodies of vibrating machines can significantly intensify various technological processes. It is revealed that the more saturated the frequency spectrum of oscillations, the higher is the probability of occurrence of resonant movements of particles of the medium being processed.

Research aim is to study the nature of oscillations of the working body of a single-mass vibrator with Hooke's joint in the transmission of an unbalanced vibration exciter, as well as to get an idea of the polyharmonic capabilities of such machines.

Methodology includes the representation of vibrating machine working body motion mathematical model in the form the second order linear differential equation. A feature of the oscillating system is the effect on it of the exciting force of the centrifugal vibration exciter, which is driven by an electric motor through a cardan shaft. The solution of the problem was carried out by a numerical method with an original determination of the "almost-period" and the following frequency content of the oscillations of the working body.

Results. The non-periodic nature of oscillations is revealed, the method of investigating their frequency content based on the "almost-period" determination as the moment of phase trajectory "closure" is proposed and tested. According to the results of the study, the oscillation features of the vibrating machines with an inertial drive were revealed, their advantages and disadvantages were noted.

Conclusions. In the spectrum of the oscillation of the working body of the vibrating machine, harmonic components with close frequencies are dominant. To the considered scheme positive features, the global stability of the formed polyharmonic motion modes can be attributed.

Key words: vibrating machine; vibration exciter; Hooke's joint; frequency content; "almost periodic"; polyharmonic.

REFERENCES

1. Goncharevich I. F., Til B. Asymmetric oscillations is a means of improving the effectiveness of vibrating technological processes. *Stroitelnye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka = Construction Materials, Equipment, and Technologies of the 21st Century*. 2005; 10: 11–16. (In Russ.)
2. Bak L., Loginov I., Michalcewicz J., Slepyan V., Stachowicz F. Construction of screener oriented on application of parametric resonance. *Zeszyty naukowe politechniki rzeszowskiej. RUTMech*. 2013; XXX; 85 (2/13): 109–117.
3. Lavendel E. E. (ed.) *Vibrations in engineering. Vol. 4. Vibration processes and machines*. Moscow: Mashinostroenie Publishing, 1981. (In Russ.)
4. Belovodskiy V. N., Bukin S. L., Sukhorukov M. Y., Babakina A. A. 2:1 superharmonic resonance in two-masses vibrating machine. *Journal of Vibration Engineering and Technologies*. 2015; 3(2): 123–135.
5. Belovodskiy V., Bukin S., Sukhorukov M. Nonlinear antiresonance vibrating screen. In: *Advances in Mechanisms Design. Proceedings of TMM 2012. Mechanisms and Machine Science*. Vol. 8. Springer, 2012. P. 162–173.
6. Bukin S. L., Bukina A. S., Seliverstov V. V. Dynamic model one mass vibrating machine with propshaft in transmission debalance. In: *Progressive technologies and systems of mechanical engineering: international proceedings*. Donetsk: DonNTU Publishing; 2014; 4 (50): 65–73. (In Russ.)
7. Derzhanskii V., Taratorkin I. Subharmonic resonances in the hydromechanical transmission of the wheeled chassis. *Trans Motauto World*. 2016; 1 (2): 31–35.
8. Kozhevnikov S. N. *The theory of mechanisms and machines*. Moscow: Mashinostroenie Publishing; 1973. (In Russ.)
9. Grishkevich A. I. (ed.) *Design of automobile transmission*. Moscow: Mashinostroenie Publishing; 1984. (In Russ.)
10. Ango A. *Mathematics for electro- and radio-engineers*. Moscow: Nauka Publishing; 1964. (In Russ.)
11. Levitan B. M., Zhikov V. V. *Almost-periodic functions and differential equations*. Moscow: Moscow University Publishing; 1978. (In Russ.)
12. Liu J., Zhang C. Composition of piecewise pseudo almost periodic function and applications to abstract impulsive differential equations. *Advances in Difference Equations*. 2013:11. DOI:10.1186/1687-1847-2013-11

Information about authors:

Valerii N. Belovodskii – PhD (Engineering), Associate professor, associate professor of the Department of Computer Modelling and Design, Donetsk National Technical University. E-mail: v.belovodskiy@gmail.com

Sergei L. Bukin – PhD (Engineering), Associate professor, professor of Mineral Processing Department, Donetsk National Technical University. E-mail: s.bukin08@gmail.com

Для цитирования: Беловодский В. Н., Букин С. Л. Полигармонические возможности вибромашин с карданной передачей в трансмиссии инерционного привода // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 4. С. 114–123. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-114-123

For citation: Belovodskii V. N., Bukin S. L. Polyharmonic opportunities of vibrating machines with cardan joint in inertial drive transmission. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal.* 2019; 4: 114–123 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-114-123

Редакция

Главный редактор Е. Ф. Цыпин

Зам. главного редактора 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 11.06.2019. Дата выхода в свет 25.06.2019

Формат 70 х 108 1/16. Печать офсетная

12,0 усл. печ. л., 11,0 уч.-изд. л. Тираж 500 экз. Заказ 6645

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_jurnal@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>

Индекс 70367

ISSN 0536-1028. Известия высших учебных заведений. Горный журнал, № 4, 2019.