ISSN 0536-1028

IZVESTIYA VYSSHIKH UCHEBNYKH ZAVEDENII
GORNYI ZHURNAL
ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ

6
2018

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ

Научно-технический журнал. Издается с 1958 года

Выходит 8 раз в год **№ 6, 2018**

Учредитель и издатель

УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Редакционная коллегия

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

Иностранные члены редакционной коллегии

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

© «Известия высших учебных заведений. Горный журнал», 2018

IZVESTIYA VYSSHIKH UCHEBNYKH ZAVEDENII

GORNYI ZHURNAL

Scientific and technical journal. First published in 1958

8 issues a year **No. 6, 2018**

Founder and publisher

URAL STATE MINING UNIVERSITY

Editor-in-chief

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

Deputy editor-in-chief

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

Editorial board

Valiev N. G. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*
Gordeev V. A. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*
Dushin A. V. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*
Zelinskaya E. V. *National Research Irkutsk State Technical University, Irkutsk*
Ignat'eva 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

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

ГЕОМЕХАНИКА. РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

Коновалова Ю. П. **Особенности учета геодинамических факторов при выборе безопасных площадок размещения ответственных объектов недропользования** 6

ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА. АЭРОГАЗОДИНАМИКА

Латышев О. Г. **Исследование фильтрации растворов поверхностно-активных веществ в скальных породах (In English)** 18

Шинкевич М. В. **Зависимость метановыделения от процессов сдвижений пород при ведении подземных горных работ** 28

Абдуллаев М. Г., Дадаш-заде Х. И. **Одномерное движение нефтей с вязко-пластичными свойствами с учетом скин-фактора** 35

ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ И НЕФТЕГАЗОВАЯ ГЕОЛОГИЯ, ГЕОФИЗИКА

Сясько А. А., Гриб Н. Н., Имаев В. С., Гриб Г. В. **Выбор оптимальной методики геофизического контроля целостности гидроизоляции площадок кучного выщелачивания** 41

Сеидов В. М. **Исследование нефти мезозойских отложений Азербайджана: месторождения Мурадханлы** 50

ГЕОИНФОРМАТИКА

Бабенко А. Г., Котегова Е. В. **Структурная идентификация объекта управления в задаче оптимального управления добычным участком (In English)** 59

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Козин В. З., Комлев А. С., Водовозов К. А. **Проявление и расчет вероятной систематической погрешности результатов опробования на обогатительных фабриках** 69

Цыпин Е. Ф., Ефремова Т. А., Елизаров Д. Б., Овчинникова Т. Ю. **Связь показателей рентгенорадиометрической сепарации с крупностью сортируемых классов** 77

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ ГОРНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

Игнатьева М. Н. **Эволюция понятия сбалансированности в природопользовании (In English)** 85

Алексеенко В. Б. **Концепция развития функционала линейных инженерно-технических работников** 93

ГЕОЭКОЛОГИЯ, РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

Стровский В. Е., Кубарев М. С. **Обеспечение экологической безопасности в условиях моногородов горнопромышленного комплекса** 99

ГОРНАЯ МЕХАНИКА. ГОРНЫЕ МАШИНЫ И ТРАНСПОРТ

Реутов А. А. **Оптимизация конвейера с загрузочным бункером при ступенчатом регулировании скорости** 109

Яковлев В. Л., Яковлев В. А. **Формирование транспортных систем карьеров с учетом адаптации к изменяющимся условиям разработки глубокозалегающих сложноструктурных месторождений** 118

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Угольников А. В., Щеклеина И. Л. **Автоматическая система управления песковым насосом** 127

ИСТОРИЯ. ИНФОРМАЦИЯ. РЕЦЕНЗИИ

Николаев Ю. А., Мехтиев А. Д. **Вклад академика Национальной академии наук Республики Казахстан А. С. Сагинова в создание нового вида транспорта для шахт и карьеров..... 135**

Сашурин А. Д. **Электронный учебник «Геомеханическое обеспечение шахтного и подземного строительства»..... 142**

CONTENTS

GEOMECHANICS. DESTRUCTION OF ROCKS

Konovalova Iu. P. **Some peculiarities of taking into account geodynamic factors when selecting safe placement areas for important subsoil use facilities..... 6**

PHYSICAL AND CHEMICAL PROCESSES OF MINING. AEROGAS DYNAMICS

Latyshev O. G. **Research of surfactant solutions filtration in hard rocks (In English)..... 18**

Shinkevich M. V. **Methane emission dependence on rock displacement processes when conducting underground mining operations..... 28**

Abdullaev M. G., Dadash-zade Kh. I. **One-dimensional motion of oils with viscous-ductile properties with the account of a skin factor..... 35**

MINING AND OIL-AND-GAS GEOLOGY, GEOPHYSICS

Sias'ko A. A., Grib N. N., Imaev V. S., Grib G. V. **Selecting effective methodology of geophysical control over the heap leaching pad waterproofing integrity..... 41**

Seidov V. M. **To the problem of mesozoic oil in Azerbaijan: Muradkhanla deposits..... 50**

GEOINFORMATICS

Babenko A. G., Kotegova E. V. **Controlled object structural identification in the production unit optimal control problem (In English)..... 59**

MINERAL PROCESSING

Kozin V. Z., Komlev A. S., Vodovozov K. A. **Sampling results probable systematic inclination manifestation and calculation at concentrating mills..... 69**

Tsypin E. F., Efremova T. A., Elizarov D. B., Ovchinnikova T. Iu. **Connection between X-ray radiometric separation indicators and the size of sorted fractions..... 77**

ECONOMICS AND MINING PRODUCTION CONTROL

Ignatieva M. N. **The notion of balance evolution in the natural resource management (In English)..... 85**

Alekseenko V. B. **Operating engineering and technical personnel functions development concept..... 93**

GEOECOLOGY, RATIONAL NATURE MANAGEMENT

Strovskii V. E., Kubarev M. S. **Ensuring ecological security in the conditions of mining monotowns..... 99**

ROCK GEOMECHANICS. MINING MACHINERY AND TRANSPORT

Reutov A. A. **Optimization of a conveyor with a loading bunker under discontinuous speed variation..... 109**

Iakovlev V. L., Iakovlev V. A. **Open pit transport systems formation with the account of adaptation to deep-lying complex-structured deposits development changing conditions..... 118**

ELECTRIFICATION AND AUTOMATION OF MINING ENTERPRISES

Ugol'nikov A. V., Shchekleina I. L. **Sand pump automatic control system..... 127**

HISTORY. INFORMATION. REVIEWS

Nikolaev Iu. A., Mekhtiev A. D. **The contribution of Kazakhstan National Academy of Sciences academician A. S. Saginov in the creation of a new type of transport for mines and open pits... 135**

Sashurin A. D. **Electronic textbook "Geomechanical maintenance of shaft and underground development"..... 142**

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»

(письмо Минобрнауки РФ от 1 декабря 2015 года № 13-6518)

В журнале публикуются статьи по следующим отраслям науки и группам специальностей научных работников:

25.00.00 НАУКИ О ЗЕМЛЕ;

05.00.00 ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ: 05.09.00 Электротехника,05.05.00 Транспортное, горное и строительное машиностроение, 05.26.00 Безопасность деятельности человека;

08.00.00 ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 528.48:622.83:621.049 DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-6-17

ОСОБЕННОСТИ УЧЕТА ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПРИ ВЫБОРЕ БЕЗОПАСНЫХ ПЛОЩАДОК РАЗМЕЩЕНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

КОНОВАЛОВА Ю. П.[1]

[1] Институт горного дела Уральского отделения РАН
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58)

Введение. *Вопросы безопасного размещения и эксплуатации особо ответственных объектов недропользования являются исключительно актуальными. Безопасное функционирование любого объекта зависит не только от его конструктивных особенностей, но и от достоверной и обоснованной оценки явлений, происходящих в среде, где он создан, т. е. в массиве горных пород. Современные геодинамические движения являются одним из факторов, определяющих напряженно-деформированное состояние массива. Однако проведение специальных изысканий, направленных на выявление и учет геодинамических движений, не нашло должного отражения при проектировании и строительстве особо ответственных объектов. Несовершенство нормативной базы и сложности учета пространственно-временного распределения параметров геодинамических движений являются основными причинами отсутствия методики геодинамической диагностики горного массива, пригодной для массовой реализации в практике инженерных изысканий.*

Целью работы *является исследование распределения деформаций как основного параметра, определяющего состояние объекта, обусловленных современными геодинамическими движениями, в иерархически блочном массиве горных пород на разных пространственно-временных уровнях для совершенствования методики учета геодинамических факторов при выборе безопасных площадок размещения.*

Методика проведения исследований. *В исследованиях были использованы результаты геодезического мониторинга трендовых и цикличных короткопериодных геодинамических движений, полученных на локальных геодинамических полигонах на базах от десятков метров до 25 км, а также данные постоянно действующих станций глобальной навигационной спутниковой системы на территории площадью 70 × 90 км. Для различных пространственно-временных баз измерений были рассчитаны деформационные параметры геодинамических движений, отстроены поля деформаций.*

Результаты. *По данным повторных геодезических измерений на базах от десятков метров до 90 км за временной интервал от нескольких часов до 40 лет установлены зависимости модуля относительных деформаций от длины реперного интервала. На основании зависимостей получены максимальные значения деформаций, которые могут быть использованы в качестве критических деформационных критериев при исследовании территорий различной площади и выборе параметров мониторинговой сети. При сопоставлении деформационных параметров трендовых и короткопериодных движений одних и тех же реперов наблюдательной сети установлена взаимосвязь в ориентации главных осей тензоров деформаций, рассчитанных по данным измерений за длительный промежуток времени и за суточный сеанс непрерывных измерений с дискретностью замера 10–20 мин.*

Область применения результатов. *Выявленная закономерность может быть использована для экспресс-диагностики напряженно-деформированного состояния массива за непродолжительное время по результатам измерений непрерывных короткопериодных движений.*

Исследования выполнены в рамках программы ФНИ п.136, тема № 0405-2015-0012

Выводы. *Полученные результаты позволяют повысить достоверность оценок состояния массива горных пород по геодинамическому фактору при выборе безопасных мест размещения ответственных объектов недропользования.*

Ключевые слова: *современные геодинамические движения; ответственные объекты недропользования; атомная станция; иерархически блочный массив; самоорганизация; деформация; геодинамическая диагностика.*

Введение. На современном этапе вопросы безопасного размещения и функционирования особо ответственных и экологически опасных объектов, таких как АЭС, ГЭС, ТЭЦ, нефте- и газопроводы, захоронения токсичных и радиоактивных отходов, горнодобывающие предприятия, метрополитены, сооружения уникальной конструкции, приобретают все большую актуальность и значимость. Безопасное функционирование любого объекта недропользования базируется на двух сложных составляющих – на самом объекте с его конструктивными особенностями и на явлениях, происходящих в среде, где он создан, т. е. в массиве горных пород. Одним из факторов, определяющих напряженно-деформированное состояние массива, процессов и явлений, имеющих место в нем, являются современные геодинамические движения. Под современными геодинамическими движениями понимают движения, протекающие в приповерхностной части литосферы и на земной поверхности в настоящее время и прогнозируемые на период срока службы объекта недропользования. Долгое время современные движения земной коры и земной поверхности рассматривались главным образом во взаимосвязи с землетрясениями, на основе чего и были разработаны методики и нормативные документы по сейсмическому районированию и сейсмостойкому строительству. Деформационным процессам, обусловленным медленными геодинамическими движениями, проявляющимися во временном интервале от нескольких суток до десятков лет, в нормативной документации, регламентирующей требования по обеспечению безопасности размещения объектов недропользования, до недавнего времени уделялось очень мало внимания. Однако накопленный опыт экспериментальных исследований на геодинамических полигонах, результаты геодезических наблюдений на постоянно действующих станциях глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) свидетельствуют о повсеместной распространенности таких движений. Интенсивные современные движения земной коры, обладающие пульсационной и знакопеременной направленностью, обнаружены не только в сейсмически опасных регионах, но и в асейсмичных районах, в зонах, прилегающих к тектоническим нарушениям [1].

Исследования влияния движений на объекты недропользования показали, что игнорирование геодинамического фактора при инженерных изысканиях может стать причиной возникновения их аварийных состояний, вплоть до разрушения [2–6]. Однако проведение специальных изысканий по геодинамической диагностике на этапе строительства не вошло в практику даже для особо ответственных объектов. В конце 1980-х–начале 1990-х гг. на предпроектной стадии изысканий для строительства атомных станций оценка тектонической активности земной поверхности и разломов производилась, как правило, только по фондовым геодезическим материалам в комплексе с данными по неотектонике и сейсмичности [8, 9]. С внедрением спутниковых методов исследования геодинамической активности были направлены на выявление трендовых движений только как предвестников землетрясений. Движения в качестве фактора непосредственного влияния на устойчивость и безопасность объектов не рассматривались [10]. И только в 2000-х гг. в работах В. Н. Татаринова и В. Н. Морозова [11] стало уделяться большое внимание вопросам разработки методических основ прогнозирования горизонтальных движений и дифференцирования земной поверхности по скоростям

деформаций на основе применения спутниковых систем для геодинамического районирования при выборе мест подземной изоляции высокоактивных радиоактивных отходов. Однако до настоящего времени методика диагностики современной геодинамической активности массива горных пород, пригодная для массовой реализации в практике инженерных изысканий, не разработана. Одна из главных причин отсутствия такой методики заключается в сложности выявления и учета пространственно-временных закономерностей распределения геодинамических движений.

Целью работы является исследование распределения деформаций как основного параметра, определяющего состояние объекта, обусловленных современными геодинамическими движениями, в иерархически блочном массиве горных пород на разных пространственно-временных базах для совершенствования методики геодинамической диагностики площадок размещения ответственных объектов.

Проблемы учета геодинамического фактора при выборе безопасных площадок размещения объектов. Как известно, массив горных пород представляет собой иерархически блочную среду, в которой структурная иерархия блоков существует на разных масштабных уровнях. Каким бы малым не был масштаб, в среде всегда будут присутствовать структурные неоднородности сравнимого с этим масштабом иерархического уровня. Геодинамические движения, проявляющиеся на разном пространственно-временном уровне, вызывают деструкцию иерархически блочного массива, которая приводит к дискретному характеру распределения деформаций на всех уровнях иерархической блочности массива. Деформации на границах блока выше, чем внутри блока, а внутриблочные подвижки формируются за счет межблочных подвижек блоков более низкой иерархии. Геодинамическая активность структурного нарушения, как показывают многочисленные исследования, не связана с его рангом. Более того, даже по самому нарушению может наблюдаться неравномерность в распределении геодинамических параметров [12]. Основываясь только на таком представлении о геомеханической модели массива, выбрать безопасную и устойчивую площадку довольно сложно. Однако массив является открытой нелинейной системой, в которой под действием геодинамических движений в деструктурированной иерархически блочной среде происходит процесс самоорганизации – формирование блоков, включающих структурные блоки различных рангов, сохраняющих относительную целостность и свойства, близкие к сплошной среде. Границы таких вторичных структур являются зонами повышенной концентрации геодинамических смещений и деформаций. Поэтому задача выбора безопасных площадок строительства сводится к выявлению таких блоков, чтобы не допустить размещение объекта на их границах, где имеют место повышенные значения деформаций, влияющие на его устойчивость.

Для выявления вторичного структурного блока необходима геодинамическая диагностика территории по телескопическому принципу: от районов площадью в десятки-сотни квадратных километров до площадок, сопоставимых по размеру с размещаемым объектом. Так, например, для выбора мест безопасного размещения АЭС в отечественной и мировой практике проводятся изыскания региона, района (100 × 150 км), пункта (10 × 15 км), площадки (3 × 5 км) АЭС, позволяющие по мере приближения к месту размещения объекта повышать детальность и достоверность обоснования безопасности. Поскольку при блоковой модели строения среды деформации не являются инвариантной величиной, необходимы знания закономерностей распределения деформаций на различных базах измерения и за разные временные интервалы. Кроме того, при переходе исследований от одного пространственно-временного уровня к другому необ-

ходимы свои деформационные критерии, величины которых в нормативных документах не приводятся.

Следует отметить, что ни в одном нормативном документе не учитывается фактор цикличности современных геодинамических движений, имеющий важное значение при геодинамической диагностике территорий. В зависимости от продолжительности сеанса измерений и частоты опроса выделяются различные циклы движений, в связи с чем их возможно подразделить на длиннопериодные движения с циклами от нескольких суток до нескольких лет, трендовые, которые имеют относительно постоянную скорость и направленность, и короткопериодные с продолжительностью циклов от нескольких минут до нескольких часов. На большие циклы накладываются циклы меньшей продолжительности. Трендовые движения являются скорее всего движениями с большим периодом колебаний. Зачастую амплитуды цикличных движений превосходят по величине трендовую составляющую.

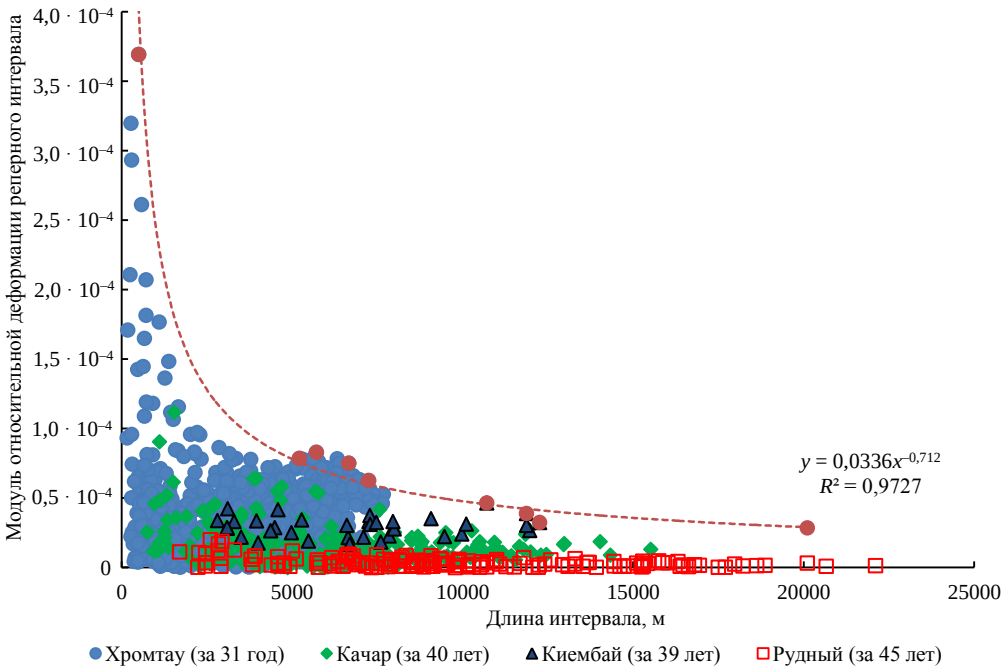

Рис. 1. Распределение модуля относительных горизонтальных деформаций при длинах реперных интервалов до 25 км (по данным трендовых движений за период 35–40 лет на месторождениях России и Казахстана)

Fig. 1. Distribution of the modulus of relative horizontal deformations at bench mark intervals lengths up to 25 km (according to the data of trend movements for the period of 35–40 years at the deposits of Russia and Kazakhstan)

Цикличность современных геодинамических движений может по-разному влиять на объекты недропользования. Объекты, попадающие на активные тектонические структуры с трендовыми движениями, нарушаются, когда в их конструкции достигаются предельные деформации. Воздействие цикличных движений может проявляться в непосредственном влиянии цикличных деформаций на сам объект, когда амплитуда знакопеременных деформаций превысит допустимые деформации конструктивных элементов сооружения, от проявления усталостных эффектов при деформациях ниже допустимых значений, а также через изменение свойств массива горных пород в разломных зонах под влиянием переменных циклических нагружений [13].

Выявлению причин цикличности движений посвящено много исследований [14–17]. Однозначно лишь можно отметить, что обусловлена она множеством факторов эндогенного и экзогенного характера. Несмотря на то что вопросы о степени влияния на напряженно-деформированное состояние горного массива того или иного фактора, обусловливающего переменность движений, остаются пока спорными и неоднозначными, очевидно, что значения деформаций, определенные без учета цикличности движений, могут быть занижены. Особенно это касается короткопериодных движений, имеющих циклы от нескольких минут до нескольких часов, поскольку их прямое или опосредованное воздействие на объект недропользования может быть существенным.

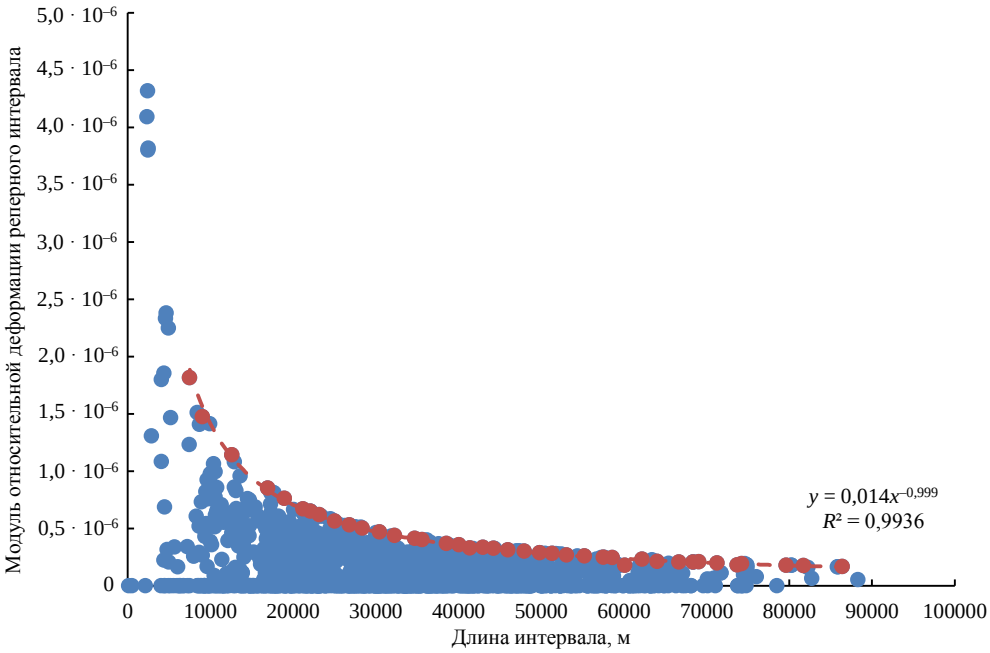

Рис. 2. Распределение модуля относительных горизонтальных деформаций при длинах реперных интервалов до 90 км (по данным постоянно действующих станций ГНСС с годовой периодичностью, район Лос-Анджелеса, США)

Fig. 2. Distribution of the modulus of relative horizontal deformations at bench mark intervals lengths up to 90 km (according to the data from continuously operating GNSS stations with annual periodicity, region of Los-Angeles, USA)

Результаты исследования распределения деформаций в иерархически блочном массиве на разных пространственно-временных уровнях. Для исследования пространственно-временных закономерностей распределения деформаций, вызываемых современными геодинамическими движениями, были использованы результаты дискретных и непрерывных мониторинговых геодезических наблюдений, полученные ИГД УрО РАН на локальных геодинамических полигонах России и Казахстана, а также данные постоянно действующих станций ГНСС. В качестве исследуемого параметра выбрано значение модуля относительных горизонтальных деформаций для разных длин реперных интервалов.

На рис. 1–3 представлены примеры графиков распределения модуля горизонтальных деформаций по длинам реперных интервалов от сотен метров до 90 км за разные временные промежутки.

На рис. 1 получены зависимости модуля относительных деформаций от длины реперного интервала в результате определения трендовых движений пунктов

на базах до 25 км за период 35–40 лет на месторождениях России и Казахстана: Качарском железорудном, Киембаевском хризотиласбестовом, хромитовых месторождениях Донского ГОКа (г. Хромтау), Соколовском и Сарбайском месторождениях (г. Рудный). Согласно графику, средний уровень деформаций за 40-летний период различен для разных территорий, но максимальные значения деформаций находятся в диапазоне от 4×10^{-5} до 4×10^{-4}.

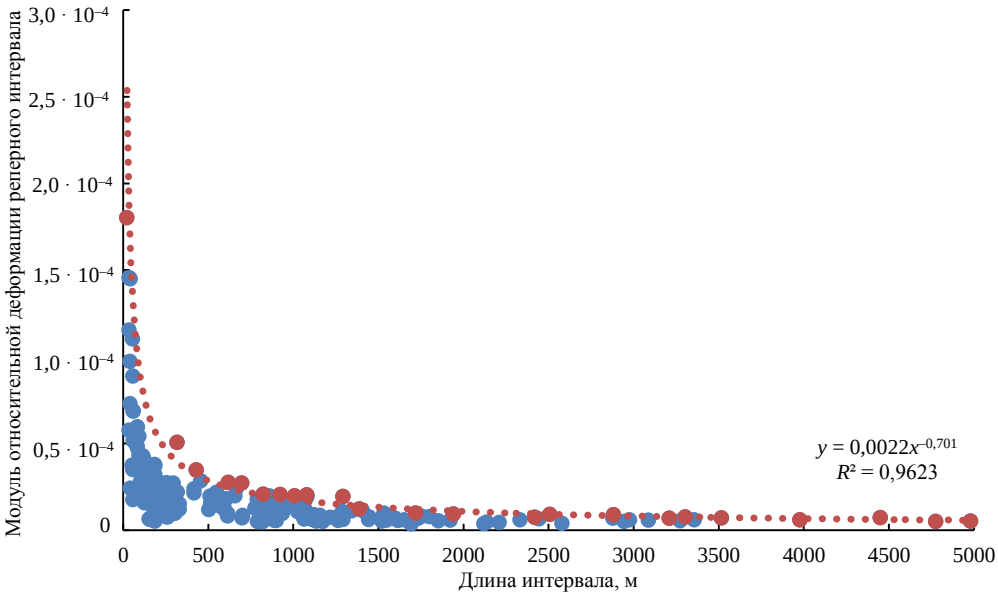

Рис. 3. Распределение модуля относительных горизонтальных деформаций при длинах реперных интервалов до 5 км (по данным короткопериодных движений на геодинамических полигонах Урала и Казахстана)

Fig. 3. Distribution of the modulus of relative horizontal deformations at bench mark intervals lengths up to 5 km (according to the data of short-period movements at geodynamic polygons of the Urals and Kazakhstan)

Пример распределения деформаций с годовой периодичностью получен в результате обработки данных постоянно действующих станций ГНСС на территории площадью 70 × 90 км в районе Лос-Анджелеса (США) при длинах реперных интервалов от 2 до 90 км (рис. 2). За годовой период на данных базах измерения максимальные значения деформаций находятся в диапазоне от 2×10^{-7} до $4{,}5 \times 10^{-6}$.

Деформации, вызываемые короткопериодными движениями, представлены для интервалов не более 5 км, поскольку только на малых базах движения регистрируются на достаточном уровне точности (рис. 3). Деформации рассчитаны по размаху между максимальным и минимальным значениями смещений за весь сеанс наблюдений. Измерения короткопериодных движений выполнены на локальных геодинамических полигонах Урала и Казахстана площадью 10 × 15 км при длинах реперных интервалов от десятков метров до 5 км. Методика определения короткопериодных движений изложена в работе [18]. Из графика видно, что за суточный сеанс наблюдений короткопериодная составляющая геодинамических движений может достигать и даже превышать трендовую составляющую за десятки лет.

Таким образом, на любом пространственно-временном уровне по мере увеличения базы измерений механизм деформирования массива горных пород характеризуется переходом от условий, отображаемых моделью дискретной среды, к условиям сплошной квазиупругой среды, когда количество блоков увеличивается и взаимные разнонаправленные подвижки структурных блоков компенсируются.

Используя эмпирические результаты распределения относительных горизонтальных деформаций на различном пространственно-временном уровне, можно оценить их экстремальные значения, которые могут быть использованы в качестве критических деформационных критериев при исследовании территорий различной площади (район, пункт, площадка) и выборе параметров мониторинговой сети.

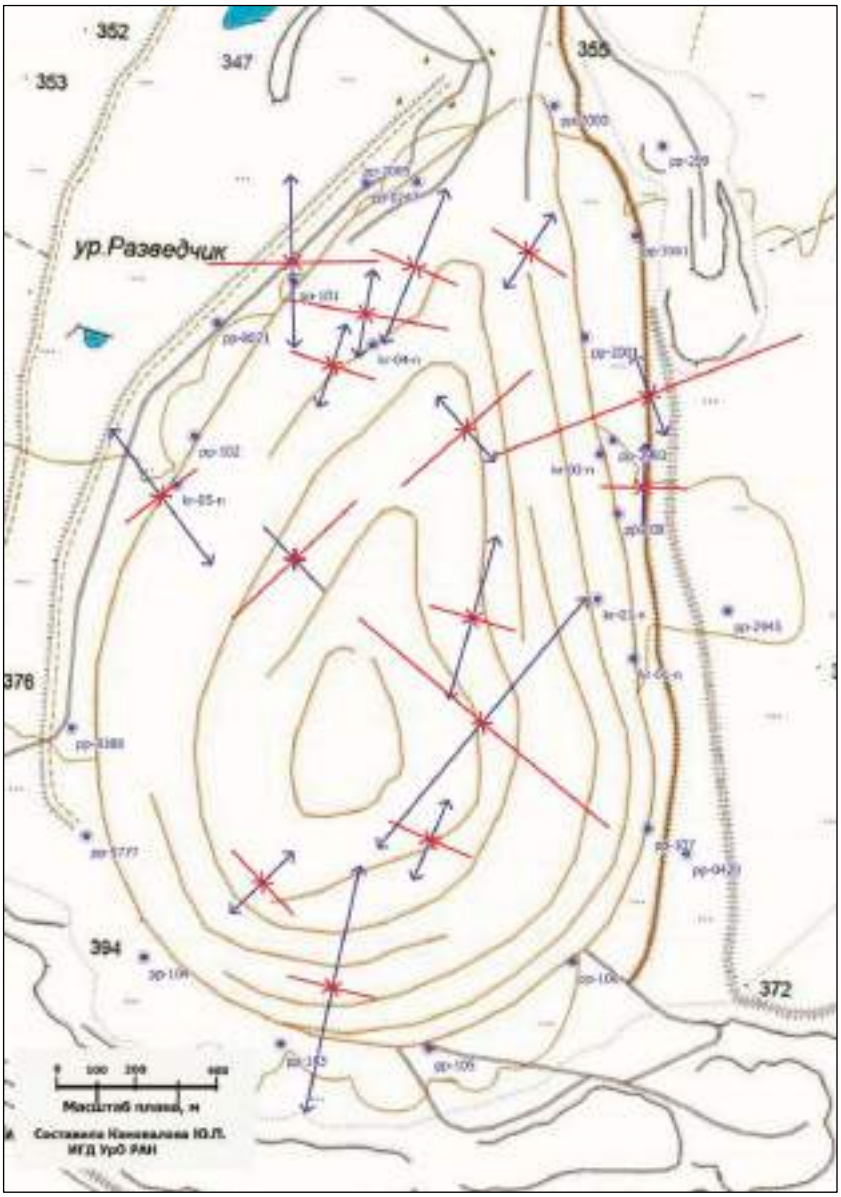

Рис. 4. Тензоры горизонтальных деформаций на территории карьера АО «Оренбургские минералы» за период 2006–2017 гг.
Fig. 4. Tensors of horizontal deformations at the territories of an open pit of JSC Orenburg Minerals for the period of 2006–2017

Для учета фактора цикличности геодинамических движений, имеющих циклы от нескольких минут до нескольких часов, была разработана методика, позволяющая по амплитудам короткопериодных движений, представляющих собой разность между минимальным и максимальным значениями смещений в наборе

дискретных измерений суточного сеанса наблюдений, и преобладающим направлениям смещений реперов определить параметры тензоров деформаций горного массива и получить поле максимальных деформаций за многочасовой период.

В ходе проведенных исследований и экспериментов была установлена взаимосвязь в ориентации главных осей тензора деформаций, рассчитанного по данным

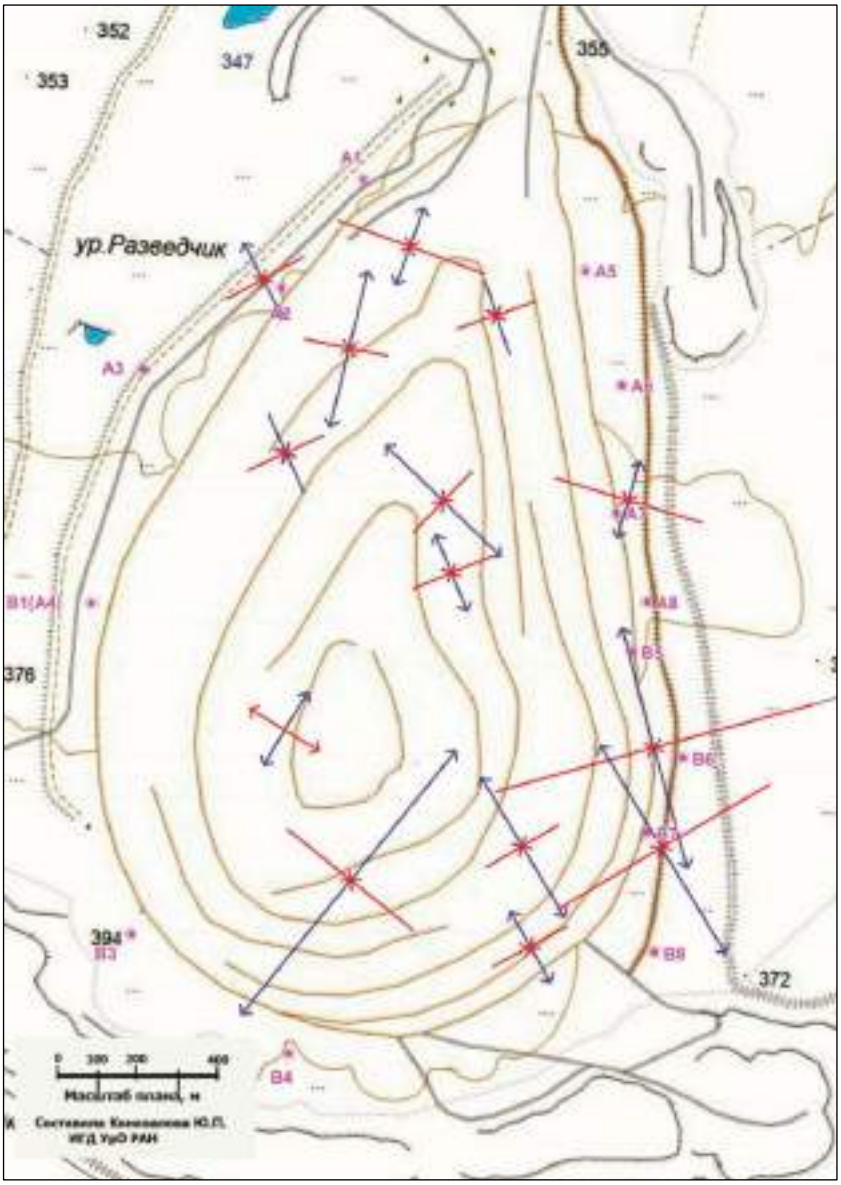

Рис. 5. Тензоры горизонтальных деформаций на территории карьера АО «Оренбургские минералы» за суточный сеанс непрерывных измерений короткопериодных геодинамических движений

Fig. 5. Tensors of horizontal deformations at the territories of an open pit of JSC Orenburg Minerals for the period of a day's session of continuous measurements of short-period geodynamic movements

дискретных измерений за длительный промежуток времени (раз в несколько лет), с ориентацией главных осей тензора деформаций, полученного за многочасовой сеанс непрерывных измерений с дискретностью замера 10–20 мин. На рис. 4 и 5

представлены примеры определения тензоров горизонтальных деформаций за 10-летний период и за суточный сеанс непрерывных измерений короткопериодных движений в окрестностях карьера АО «Оренбургские минералы». В обоих случаях измерения выполнены спутниковыми методами на идентичных пунктах опорной маркшейдерской сети при расстояниях на базах от 200 м до 2 км. Выявленная закономерность может быть использована для экспресс-диагностики напряженно-деформированного состояния массива за непродолжительное время по результатам измерений непрерывных короткопериодных движений.

Выводы. Выбор безопасных мест размещения объектов недропользования основывается на использовании явления вторичного структурирования иерархически блочной самоорганизующейся среды под воздействием современных геодинамических движений. Для выявления вторичного структурного блока необходимы знания закономерностей распределения деформаций, обусловленных этими движениями, на разном пространственно-временном уровне. Анализ и обобщение большого объема параметров современных геодинамических движений позволили выявить некоторые особенности в их распределении.

1. Установлены максимально возможные значения деформаций для различных территорий на базах от десятков метров до 90 км за временной интервал от нескольких часов до 3–4 десятков лет. Полученные значения могут использоваться в качестве критических деформационных критериев при исследовании территорий различной площади и выборе оптимальных параметров мониторинговой сети.

2. При исследовании короткопериодных и трендовых движений, имеющих периоды от нескольких десятков минут до нескольких лет, установлено, что короткопериодная составляющая может достигать и даже превышать трендовую составляющую для одних и тех же баз измерений. При сопоставлении деформационных параметров трендовых и короткопериодных движений одних и тех же реперов мониторинговой сети установлена взаимосвязь в ориентации главных осей тензоров деформаций, рассчитанных по данным измерений за длительный промежуток времени и за суточный сеанс непрерывных измерений с дискретностью замера 10–20 мин. Выявленная закономерность позволяет осуществлять оценку напряженно-деформированного состояния массива горных пород за непродолжительный непрерывный сеанс измерений короткопериодных движений.

Методика выбора и оценки вторичных структурных блоков под безопасное размещение объектов по фактору геодинамических движений должна включать:

– использование комплексного подхода, т. е. изучение структурно-тектонических особенностей массива (геофизические методы) и определение геодезическими методами основных параметров движений: амплитуды, частоты (периода) циклов и деформаций, вызываемых этими движениями;

– проведение исследований на различных пространственных уровнях, начиная с территорий от 100–150 км до размеров, сопоставимых с размерами объекта, с учетом закономерностей распределения деформаций на разных базах измерения;

– проведение исследований на различных временных уровнях (трендовые и короткопериодные движения);

– комбинирование спутниковых и наземных методов наблюдения.

Использование выявленных закономерностей распределения геодинамических движений при выборе безопасных мест размещения ответственных объектов недропользования позволяет существенно повысить достоверность оценок альтернативных площадок и тем самым обеспечить безопасную эксплуатацию зданий и сооружений. Основные принципы, на которых базируется методика, неоднократно использовались для геодинамической диагностики различных территорий, а результаты ее практического применения для выбора площадок размещения сооружений атомных станций изложены в работах [19, 20].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании. М: Агентство экологических новостей, 1999. 220 с.

2. Гуляев А. Н., Дружинин В. С., Демина А. Ю., Гладышева Р. М., Осипов В. Ю., Косолапов А. А. Современные активные зоны нарушения сплошности верхней части земной коры на территории Екатеринбурга // Инженерная геология. 2008. № 2. С. 13–16.

3. Тагильцев С. Н., Осипова А. Ю., Лукьянов А. Е. Выделение активных тектонических структур на территории г. Екатеринбурга // Геомеханика в горном деле: докл. науч.-техн. конф. 14–15 октября 2009 г. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2009. С. 28–36.

4. Сашурин А. Д. Геодинамические истоки крупнейших природно-техногенных катастроф // ГИАБ. 2011. № 11. С. 225–236.

5. Учитель И. Л. Разрушительные свойства геодеформаций. Одесса: Астропринт, 2010. 222 с.

6. Селюков Е. И., Стигнеева Л. Т. Краткие очерки практической микрогеодинамики. СПб.: Питер, 2010. 175 с.

7. Nikoladis R. Observation of geodetic and seismic deformation with the global positioning system. University of California, San Diego, Calofornia. 2002. 249 p.

8. Серебрякова Л. И. Оценка геодинамической активности территории строительства Крымской АЭС по геодезическим данным // Геодезия и картография. 2012. № 6. С. 46–52.

9. Серебрякова Л. И. Закономерности и особенности вертикальных движений земной поверхности территории Игналинской АЭС // Геодезия и картография. 2012. № 7. С. 57–63.

10. Татаринов В. Н. Ново-Воронежская АЭС. GPS-наблюдения в районе АЭС. М.: ГЦ РАН, 2000. 12 с.

11. Татаринов В. Н., Морозов В. Н. Прогнозирование устойчивости геологической среды при выборе мест размещения и эксплуатации объектов ядерного топливного цикла // Инженерная экология. 2008. № 5. С. 10–16.

12. Cruikshank Kenneth M., Peterson Curt D. Current state of strain in the central cascadia margin derived from changes in distance between GPS stations // Open Journal of Earthquake Research. 2015. Vol. 4. P. 23–36.

13. Сашурин А. Д. Современная геодинамика и техногенные катастрофы // Геомеханика в горном деле: докл. науч.-техн. конф. 19–21 ноября 2002 г. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2003. С. 180–191.

14. Bos M.S., Bastos L., Fernandes R. M. S. The influence of seasonal signals on the estimation of the tectonic motion in short continuous GPS time-series // Journal of Geodynamics. 2010. Vol. 49. P. 205–209.

15. Biessy G., Moreau F., Dauteuil O., Bour O. Surface deformation of an intraplate area from GPS time series // Journal of Geodynamics. 2011. Vol. 52. P. 24–33.

16. He Xiaoxing, Hua Xianghong, Yu Kegen, Xuan Wei, Lu Tieding, Zhang W., Chen X. Accuracy enhancement of GPS time series using principal component analysis and block spatial filtering // Advances in Space Research. 2015. Vol. 55. P. 1316–1327.

17. Gülal Engin, Erdogan Hediye, Tiryakioglu Ibrahim. Research on the stability analysis of GNSS reference stations network by time series analysis // Digital Signal Processing. 2013. Vol. 23. P. 1945–1957.

18. Панжин А. А. Исследование короткопериодных деформаций разломных зон верхней части земной коры с применением систем спутниковой геодезии // Маркшейдерия и недропользование. 2003. № 2. С. 43–54.

19. Коновалова Ю. П. Исследование цикличных короткопериодных геодинамических деформаций территорий при выборе площадки под строительство атомных станций // ГИАБ. 2010. № 7. С. 269–274.

20. Пустуев А. Л. Исследование трендовых геодинамических деформаций при выборе площадок для строительства атомных станций // ГИАБ. 2011. № 1. С. 282–290.

Поступила в редакцию 28 февраля 2018 года

Коновалова Ю. П. Особенности учета геодинамических факторов при выборе безопасных площадок размещения ответственных объектов недропользования // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 6. С. 6–17.

Сведения об авторах:

Коновалова Юлия Павловна – научный сотрудник лаборатории сдвижения горных пород Института горного дела Уральского отделения РАН. E-mail: lisjul@mail.ru

SOME PECULIARITIES OF TAKING INTO ACCOUNT GEODYNAMIC FACTORS WHEN SELECTING SAFE PLACEMENT AREAS FOR IMPORTANT SUBSOIL USE FACILITIES

Konovalova Iu. P.[1]
[1] Institute of Mining, Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia.

Introduction. Problems of important subsoil use facilities safe placement and operation are extremely topical. Safe operation of any facility depends not only on its constructive features but also on reliable and justified estimation of effects which occur in the terrestrial environment, i.e. in the rock massif. Current geodynamic movements are among the factors which determine stress-strained state of a massif. However, special research aimed at determination and assessment of the geodynamic movements failed to find proper reflection in especially important facilities design and construction. Normative base imperfection and difficulties in taking into account space-time distribution of geodynamic movements parameters are the main reasons for the absence of rock massif geodynamic diagnostics methodology suitable for large-scale implementation in the practice of engineering researches.
Research aim is to investigate deformations distribution as a basic parameter determining the state of a facility conditioned on current geodynamic movements in a hierarchically blocky rock massif at various space-time levels to improve the methodology of taking into account geodynamic factors when selecting safe placement areas.
Research methodology. The researches used the results of geodetic monitoring of trend and cyclic short-period geodynamic movements obtained at the local geodynamic polygons at bases from dozens of meters up to 25 km, as well as the data from constantly operating stations of global navigation satellite system at the territory of 70 × 90 km. For various space-time measurement bases, geodynamic movements deformation parameters were calculated, deformation fields were built.
Results. According to the data of repeated geodetic measurements at bases from dozens of meters up to 90 km for a time period of several hours up to 40 years, dependences of relative deformations modulus on bench mark interval length were determined. On the basis of the dependences deformation maximum values are obtained which can be used as critical deformation criteria when investigating the territories of various area and selecting monitoring network parameters. When comparing deformation parameters of trend and short-period movements of one and the same bench marks of observation networks, the correlation in the principal tensor axes orientation was determined calculated according to the data of measurements for an extended period of time and for a day's session of continuous measurements with measurement discrete time of 10–20 min.
Results application area. The determined regularity can be used for express-diagnostics of stress-strained state of a massif in a short period of time according to the results of continuous short-period movements measurements.
Conclusions. The acquired results make it possible to increase rock massif state assessments reliability according to the geodynamic factor when selecting important subsoil use facilities safe placement areas.
Key words: current geodynamic movements; important subsoil use facilities; nuclear power plant; hierarchically blocky massif; self-organization; deformation; geodynamic diagnostics.

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-6-17

REFERENCES

1. Kuz'min Iu. O. *Sovremennaia geodinamika i otsenka geodinamicheskogo riska pri nedropol'zovanii* [Current geodynamics and the assessment of geodynamic risk at subsoil use]. Moscow, Agentstvo ekologicheskikh novostei Publ., 1999. 220 p.
2. Guliaev A. N., Druzhinin V. S., Demina A. Iu., Gladysheva R. M., Osipov V. Iu., Kosolapov A. A. [Current active zones of disturbance of the upper part of the earth's crust continuity at the territory of Ekaterinburg]. *Inzhenernaia geologiia – Engineering Geology*, 2008, no. 2, pp. 13–16. (In Russ.)
3. Tagil'tsev S. N., Osipova A. Iu., Luk'ianov A. E. [Discovering active tectonic structures at the territory of Ekaterinburg]. *Geomekhanika v gornom dele: dokl. nauch.-tekhn. konf. 14–15 oktiabria 2009 g.* [Proc. of Research-to-Pract. Conf. of 14th–15th October, 2009 "Geomechanics in Mining"]. Ekaterinburg, IM UB RAS Publ., 2009, pp. 28–36.
4. Sashurin A. D. [Geodynamic sources of the largest natural-technogenic disasters]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2011, no. 11, pp. 225–236. (In Russ.)
5. Uchitel' I. L. Razrushitel'nye svoistva geodeformatsii [Destructive features of deformation]. Odessa, Astroprint Publ., 2010. 222 p.
6. Seliukov E. I., Stigneeva L. T. *Kratkie ocherki prakticheskoi mikrogeodinamiki* [Sketches of practical microgeodynamics]. St. Petersburg, Piter Publ., 2010. 175 p.
7. Nikoladis R. Observation of geodetic and seismic deformation with the global positioning system. University of California, San Diego, Calofornia. 2002. 249 p.

8. Serebriakova L. I. [Assessment of geodynamic activity of the Crimea NPS construction according to the geodetic data]. *Geodeziia i kartografiia – Geodesy and Cartography*, 2012, no. 6, pp. 46–52. (In Russ.)
9. Serebriakova L. I. [Regularities and peculiarities in the vertical movements of the earth's surface at the territory of Ingalina NPP]. *Geodeziia i kartografiia – Geodesy and Cartography*, 2012, no. 7, pp. 57–63. (In Russ.)
10. Tatarinov V. N. *Novo-Voronezhskaia AES. GPS-nabliudeniia v raione AES* [Novovoronezh NPS. GPS observations in the region of the NPS]. Moscow, GC RAS Publ., 2000. 12 p.
11. Tatarinov V. N., Morozov V. N. [Forecasting geological environment sustainability when selecting placement and operation areas of nuclear fuel cycle facilities]. *Inzhenernaia ekologiia – Environmental Engineering,* 2008, no. 5, pp. 10–16. (In Russ.)
12. Cruikshank Kenneth M., Peterson Curt D. Current state of strain in the central cascadia margin derived from changes in distance between GPS stations. *Open Journal of Earthquake Research*, 2015, vol. 4, pp. 23–36.
13. Sashurin A. D. [Current geodynamics and technogenic disasters]. *Geomekhanika v gornom dele: dokl. nauch.-tekhn. konf. 19–21 noiabria 2002 g.* [Proc. of Research-to-Pract. Conf. of 19th–20th November, 2002 "Geodynamics in Mining"]. Ekaterinburg, IM UB RAS Publ., 2003, pp. 180–191. (In Russ.)
14. Bos M. S., Bastos L., Fernandes R. M. S. The influence of seasonal signals on the estimation of the tectonic motion in short continuous GPS time-series. *Journal of Geodynamics*, 2010, vol. 49, pp. 205–209.
15. Biessy G., Moreau F., Dauteuil O., Bour O. Surface deformation of an intraplate area from GPS time series. *Journal of Geodynamics*, 2011, vol. 52, pp. 24–33.
16. He Xiaoxing, Hua Xianghong, Yu Kegen, Xuan Wei, Lu Tieding, Zhang W., Chen X. Accuracy enhancement of GPS time series using principal component analysis and block spatial filtering. *Advances in Space Research*, 2015, vol. 55, pp. 1316–1327.
17. Gülal Engin, Erdogan Hediye, Tiryakioglu Ibrahim. Research on the stability analysis of GNSS reference stations network by time series analysis. *Digital Signal Processing*, 2013, vol. 23, pp. 1945–1957.
18. Panzhin A. A. [Investigation into short-period deformations of fracture zones of the upper part of the earth's crust with satellite geodesy networks]. *Marksheideriia i nedropol'zovanie – Mine Surveying and Subsurface Use*, 2003, no. 2, pp. 43–54. (In Russ.)
19. Konovalova Iu. P. [Research of cyclic short-period geodynamic deformations of territories at the choice of platforms for nuclear stations building]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2010, no. 7, pp. 269–274. (In Russ.)
20. Pustuev A. L. [The study on trend geodynamic deformation during choosing the construction sites for atomic plan]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2011, no. 1, pp. 282–290. (In Russ.)

Information about authors

Konovalova Iuliia Pavlovna – researcher of the Laboratory of Rocks Displacement, Institute of Mining, UB RAS. E-mail: lisjul@mail.ru

UDC identifier 622.278 DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-18-27

RESEARCH OF SURFACTANT SOLUTIONS FILTRATION IN HARD ROCKS

LATYSHEV O. G.[1]
[1] The Ural State Mining University
(Kuibysheva str., 30, Ekaterinburg, the Russian Federation)

Aim. *Prospective means of increasing the effectiveness of mining processes is the controlled variation of the properties of rocks with surfactants. When designing the technology of surfactants application, important research problems are the investigation and the forecast of filtration of active solutions in the processed rocks. The aim of the researches is the determination of regularities in surfactant solutions filtration in hard rocks.*
Research methodology *includes experimental works and theoretical analysis of the processes of active solutions filtration in hard rocks.*
Research results. *On the basis of experimental works the research has determined that the process of active solutions filtration comes in three stages which differ in the mechanism of active liquids motion in hard rocks. Analytical estimation is introduced of the parameters of the given stages of saturation. It has been shown, that the process of filtration possesses fractal properties and can be investigated from the point of the percolation theory. It has been stated, that in logarithmic coordinates the dependence between the quantity of solution penetrating into rocks on the time is described by the two linear equations which correspond to the stages of filtration saturation and the spontaneously developing process of two-dimensional migration of active solutions.*
Application area. *The obtained results are used when designing the methods and means of controlling properties and condition of rocks and massifs.*
Conclusions. *The stated regularities make it possible to forecast the rock massifs saturation by active solutions in various processes of mining. The obtained quantitative assessments (equations) are meant to be the base for statistic modeling (Monte-Carlo method) of rock permeability as a percolation system.*

Key words: *rocks; surfactants; filtration mechanisms; percolation theory.*

Introduction. One of the prospective means of increasing the effectiveness of mining technology is the controlled variation of rock properties with the help of surfactants. Action of surfactants is based on adsorption decrease of rock strength (*Rehbinder effect*) [1, 2]. Permeating into the fracture process zone, active solutions contribute to rocks softening and fracture development. It is accompanied by a range of positive effects. It has been stated [3], that rock processing with specially selected surfactants is good for the capacity of shafts construction processes and mineral deposits exploitation. Analytical, laboratory, and industrial researches in conditions of the shafts of Severouralsk bauxite deposits and Donbass Horlivka region have shown the following. Action of surfactants, manifesting in adsorption decrease of the surface energy of rocks, fracture growth activation, plastification of intergranular bonds, is accompanied by the regular variation of a complex of mechanical properties of rocks: strength reduction (from 20 to 70%), decrease of the module and limit of elasticity (by 1.3–1.5 times on average); activation (by 1.5–7.0 times) of the processes of creep and relaxation of stresses in a massif, etc.

Such rock properties variation has the following effects. The use of surfactants as drilling fluid increases mechanical drilling speed in boreholes and wells by 1.2–1.4 times, reduces drilling tool wear and blunting by 1.2–1.4 times on average. Surfactant molecules adsorption activity, as well as the improvement of drilling conditions reduces dust content in the mine

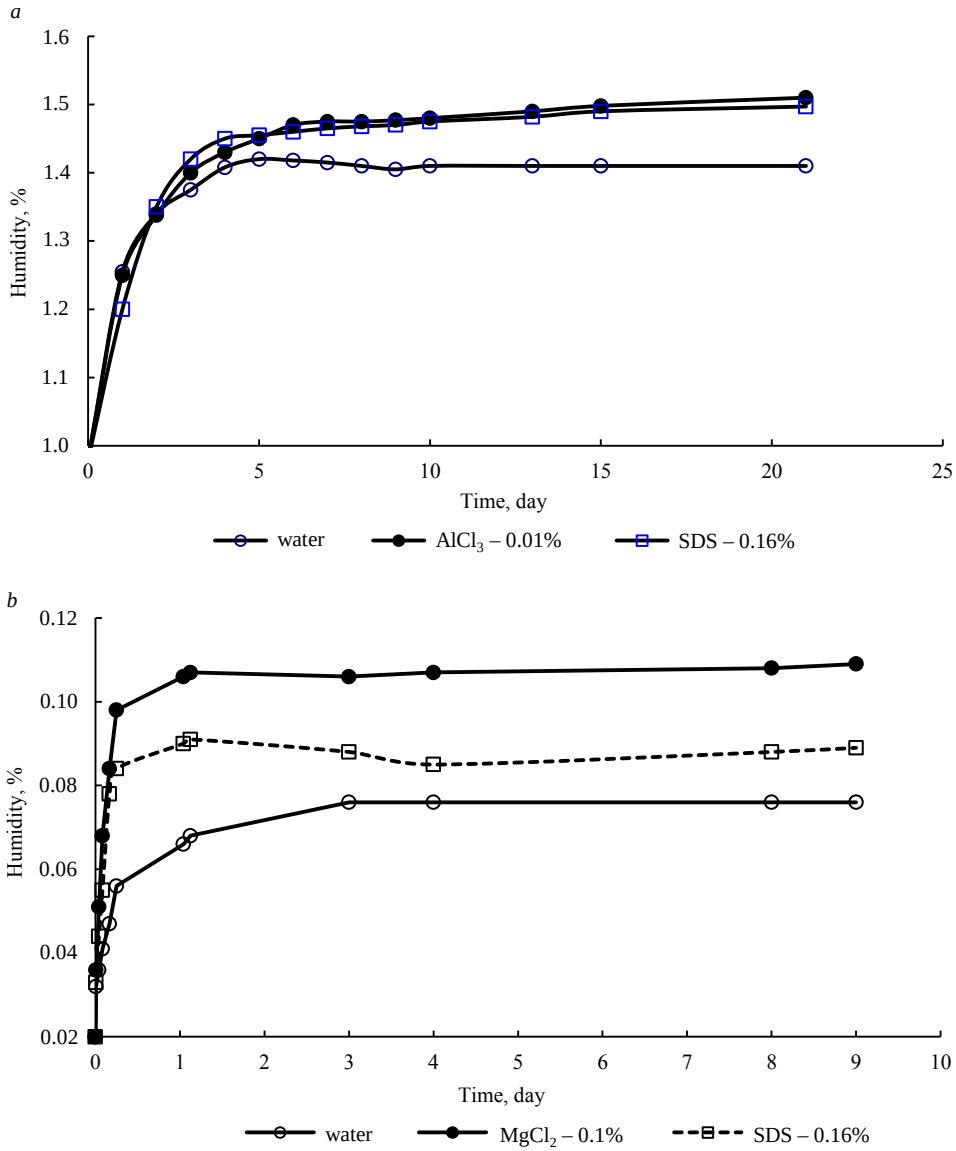

Fig. 1. Kinetics of saturation:
a – porphyrite; *b* – limestone
Рис. 1. Кинетика насыщения:
а – порфирита; *б* – известняка

atmosphere by 1.5–3.7 times. Rock weakening in surfactants is accompanied by the lowering of specific consumption of explosives during blasting operations by 1.4 times on average. The use of surfactants to protect from rock bumps makes it possible to increase productivity of relieve slots and wells drilling, reduce their quantity, bring rocks into a condition free of bump hazard, and reduce stress in the marginal massif.

The indicated effects provide for surfactants delivery to the rock massif. That is why the *research problem* of the given work is study of the kinetics of rock saturation with active solutions.

Research results. Experimental works were performed in a laboratory environment with the rock samples of and under solutions delivery into the rock massif. It has been stated [4] that in conditions of solid rocks the mode of multigraded repeated surfactant solutions delivery under low pressure head is the most efficient. In this case, the filtration mode serves only for the delivery of active solution along the existing macro fissures in the depth of the massif. Its further saturation with the solution is performed by means of the mechanisms of capillary condensation and adsorption migration of active molecules along the micro fissures and bonds of mineral grains. These mechanisms play a pivotal role at the surfactants influence upon rocks.

According to the character of filtration processes, all the pores and fissures in a rock massif can be classified as hypercapillary, capillary, and subcapillary pores. In subcapillary fissures the molecules of water are tightly bound to the surface of pores and cannot travel. Penetration and motion of fluid in capillary pores is defined by the physics of the phenomenon of wetting. For this reason, fluid filtration in the rock massif properly depends on the character of its macrostructure, i. e. the concentration and geometry of hypercapillary fissures.

For the comparative analysis of filtration kinetics, apart from surfactant solutions, the process of rock saturation with distilled water was studied. As a criteria characteristic, humidity of rocks was measured as a relation of the mass of rocks at various stages of saturation to the mass of the mineral matrix. As an example, fig. 1 introduces the saturation graphs for porphyrite and limestone which significantly differ in porosity index. Electrolyte solutions and sodium dodecyl sulphate (SDS) were used as surfactants, showing greater effectiveness in the drilling processes.

Saturation of all the familiar rocks with the solutions of various surfactants possesses similar character – rapid growth of humidity in the beginning of the process with further slowdown of the rate of rock saturation with the solutions. Only graphs scales are different. Thus, for thick homogenous limestone with the initial (natural) humidity W_n = 0.02% maximum adsorption of solutions do not exceed 0.12% (fig. 1, *b*). For more porous porphyrite with W_n = 0.98% saturation limit is 1.5% (fig. 1, *a*). It will be noted that maximum humidification of rocks exceeds their total porosity, obtained during the experiment with dry rocks, i. e. before humidification. It is explained by active solutions penetration along the bonds of mineral grains omitting pores, and by the increase of porosity (rock jointing) during the actual process of saturation.

Experimentally obtained data, exhibited as points on the graphs, cannot be described by any simple algebraic function. This is because there are three various sections, which are clearly distinguished on the graphs of saturation, corresponding to various stages or phases of saturation.

The first stage – filtration of solutions along the capillary channels. The given stage is defined by free penetration of solutions along adjacent pores and fissures. Theoretical calculations and experience are evidence of the fact that inside fissures (pores) with opening more than 1 mm capillary forces scarcely act. On the other hand, under the use of surfactants, the layer of adsorbed molecules of liquid with rough thickness of $\delta = 10^{-7}$ m develops on the fissures hydrophilic surface, laws of motion of the layer are no longer defined by capillary forces, but by the mechanism of two-dimensional migration. Thus, for surfactant solutions, fissures (pores) with the width of opening $R = 10^{-3}$–10^{-7} m should be considered capillary.

Kinetics of solutions in this case is described by the laws of viscous flow of fluid along the capillaries [5, 6]. As far as it penetrates the capillaries, the speed of fluid motion decreases nonlinearly and can be described by an equation:

$$\dot{\cdot}_c = \frac{dh}{dt} = \frac{R\gamma_{ls}\ \cos\Theta}{2\eta h},$$

where h – the length of the head of liquid in a capillary at the time point t; R – fissure opening rate (capillary radius); γ_{ls} – interfacial surface tension between the liquid and rock; Θ – contact angle; η – dynamic viscosity coefficient.

It follows from equation that

$$h = \sqrt{\frac{R\ \gamma_{ls}\cos\Theta}{2\eta}t}.$$

From general considerations it can be accepted that h will be proportional to wetting W of rock at the given stage of filtration.

Then

$$W_1 = k_1\sqrt{t},$$

where

$$k_1 \approx \sqrt{\frac{R\ \gamma_{ls}\cos\Theta}{2\eta}}. \quad (1)$$

Calculation of proportionality factor k_1 at the last formula for real rocks may serve only as approximate assessment of the process. This is conditioned by both of the assumptions, and the fact that the indicated equations are deduced for the single capillary with circular section with constant radius R. In real rocks there are plenty of capillary fissures (pores), and their section is variable. That is why the value of k_1 should be determined experimentally. Processing of experimental data has shown that for various solutions the value of the coefficient varies within the limits $k_1 = (4.9–6.5) \cdot 10^{-6}$ $s^{-1/2}$. Average value of $k_1 = 5.6 \cdot 10^{-6}$ $s^{-1/2}$. At that, for surfactant solutions the capillary rate saturation k_1 is significantly higher than that of the clear water. This is due to the change by means of active molecules both of interfacial surface tension between the liquid and the rock γ_{ls}, and the contact angle Θ. At the given stage of researches it is impossible to divide the influence of these factors. Simultaneous estimation can be fulfilled according to the formula (1) as:

$$\gamma_{ls}\cos\Theta = \frac{k_1 2\eta}{R}. \quad (2)$$

Accepting that in single set of experiments the alteration of parameters η, γ_{ls} and R is negligible, formula (2) can be reduced to the ratio:

$$\frac{\cos\Theta_{sur}}{\cos\Theta_0} = \left[\frac{k_{1(sur)}}{k_{1(0)}}\right]^2.$$

In particular, for limestone the addition of active molecules $MgCl_2$ increases the cosine of the contact angle by 1.27 times.

The second stage – two-dimensional migration of active solutions. For the familiar solid rocks determinative is the second stage of saturation connected with two-

dimensional migration of active molecules along the surface of micro fissures and bonds of mineral grains. There, penetration of solution into the rock is connected with the collective action of several mechanisms. In correspondence with the theory of surface phenomena [7] solution motion is determined by the phenomenon of wetting as well as the active force appearing through the difference between the concentrations of adsorbing molecules of the solution.

There, the role of surfactant molecules is most noticeable. The graphs of saturation (fig. 1) demonstrate significant exceedance of the rock humidity in surfactant solutions as compared to their saturation with water. This is due to the alteration affected by active molecules of the contact angle, greater adsorption capacity of surfactants, as well as inclusion of solvate liquid layers into the fissures by a moving monomolecular layer of surfactant molecules.

Analysis of the deduced functions shows the following. For semi-porous limestones the given stage finishes within first 6 hours of the samples exposition in a solution, and for porphyrite which are more porous, 6 days. Rate of saturation for the second stage is described by the equation:

$$W_2 = k_2 \ln t.$$

Correlation coefficients of logarithmic function in all cases exceed 0.9 which testifies to their statistic significance.

Angular coefficients k_2 can be considered as the rock saturation rate with various solutions. For the familiar rocks its value changes significantly. For porphyrite under water saturation $k_2 = 0.109$, under saturation with the solution $AlCl_3$ $k_2 = 0.124$, i. e. there occurs increase by 14%. For limestones this value is significantly lower (0.011 and 0.026 correspondingly), but the relative intensity of saturation with the surfactant solution is almost 2.5 times higher than that of the distilled water. It has been stated that such difference is determined by the features of rocks mineral composition. Intergranular bonds and fissures of limestones jointings are made of clay-like chloritized material, content of which amounts to 5–10% of the rock volume. Greater adsorption capacity of such material significantly activates the process of limestones saturation with surfactant solutions.

The third stage – transport of surfactants along the developing fissures. The third stage of saturation is observed only for surfactant solutions. Indeed, when the process of rock saturation with water stops, humidity of samples in surfactant solutions continues growing (fig. 1). It is connected with the development of rock jointing under the effect of surfactants.

The moment of the beginning of the third stage is clearly recorded at saturation graphs and corresponds to the transition of the obviously nonlinear function $W = f(t)$ into the linear one. Indeed, for all the familiar rocks, the best approximation to the experimental data is the equation of the form $W_3 = k_3 t$. Correlation analysis of the experimental data has shown, that for all functions the correlation coefficient is not lower than 0.93. The parameters of the equation: for porphyrite in the solution $AlCl_3$ – $W_2 = 1.454\%$; $k_3 = 2.74 \cdot 10^{-3}$1/day, in the solution SDS – $W_2 = 1.448$ %; $k_3 = 2.51 \cdot 10^{-3}$1/day; for limestone in the solution $MgCl_2$ – $W_2 = 0.105\%$; $k_3 = 0.42 \cdot 10^{-3}$1/day; in the solution SDS – $W_2 = 0.085\%$; $k_3 = 0.35 \cdot 10^{-3}$1/day.

Thus, the deduced equations make it possible to quantitatively assess kinetics of rock saturation with active solutions at all three stages. However, significantly different mechanisms of saturation at these stages do not make it possible to accurately describe the process with one equation. Additional information can be received from the investigation of the processes of filtration as fractal time sequences.

Investigation of the processes of permeability from the fractal positions are fulfilled on the basis of the *theory of percolation*. In classical statement of the problem, the research problem of the theory of percolation consists in the investigation of some conventional "fluid" trickling through some random inhomogeneous medium [8]. For the first time basic conditions and the term "percolation" itself, which can be translated as "trickle through", were formulated in 1957 by S. R. Broadbent and J. M. Hammersiey in a work dedicated to the problem of gas filters clogging. In their statement, a lattice of random geometry serves a model of percolation medium; the lattice consists of conductive channels (pipes), intersecting in the grid points. If the fluid passes into one of the points or channels, it freely percolates through the whole lattice with the passages being full-open. However, in real media (rocks, for instance) such ideal situation is admittedly impossible. Therefore, it was considered to solve the percolation problem under the condition of random closing of channels, unknown beforehand which exactly.

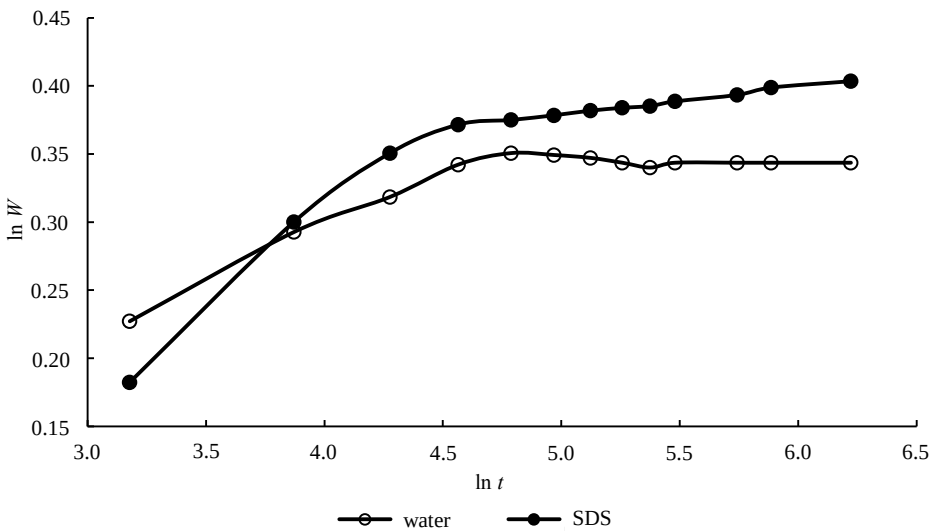

Fig. 2. Logarithmic representation of filtration process
Рис. 2. Логарифмическое представление процесса фильтрации

Suppose each bond of the lattice can be broken with the probability $q = 1 - p$. Then the probability p can be considered as a fraction of overall bonds in the lattice, or a fraction of open, i. e. intercommunicating, channels in rock. When $p = 1$ fluid percolates along the whole lattice and completely fills all open pores. Under sufficiently small p solution spreading in every direction finally meets a broken bond (closed pore channel), and the process of filtration stops. Local domain of solution thrust V_L when $p = p_L$ is called *percolating cluster*, or cluster. In general, percolating cluster is considered to be the system of interconnecting particles which possesses the property of scale self-similarity within the limits $R_0 - R$, where R is the maximum size of the system at which it still retains fractal properties; R_0 is a scale unit of linear measurement.

For surfactant solutions wetness index W is a key parameter, it characterizes the degree of solution penetration into the rock. In accordance with the theory of percolation its dimension can be expressed in terms of the probability of open conducting channels p: $W \sim (p - pc)^{\mu}$, where μ – index characterizing the properties of percolation system; p_c – percolation threshold. The given correlation can serve as a basis for a filtration statistical model, where the probability p is variable. When fixing the interval of variability p the results of experimental works of the filtration process presented above should be taken into account. Their analysis shows that surfactant solutions filtration

features spontaneously developing process of solutions penetration, connected with the development of conductive channels. In this case the probability p is higher than percolation threshold p_c, which is accompanied by the formation of an infinite cluster. On the contrary, at clear water filtration p should be posed lower than percolation threshold. At that, the area of wetting forms clusters with finite dimensions, i. e. in the absence of the third stage of saturation the area of fluid distribution will be limited.

For well grounded use of the tools of percolation theory it should be verified that the process of filtration possesses fractal properties. A sign for these features is the exponential function (scaling) of saturation and time expressed by a linear graph in binary logarithmical coordinates [9]. The analysis from the positions of the research results listed before confirms the presence of fractal properties of filtration process. As an example, fig. 2 introduces logarithmic functions $\ln W = f(\ln t)$ for porphyrite saturated with water and SDS solution (fig. 1, *a*).

Fig. 2 clearly displays the inflection point of two linear sections of graphs. Slopes of lines can be matched with the coefficient of filtration D. Fractal dimension will be defined as $d_W = D + 1$. For the left side of graphs characterizing the first two stages of saturation (capillary filtration and two-dimensional migration) fractal dimension of percolation system under rock saturation with water is $d_{W1(0)} = 1.08$. When adding 0.16% SDS into the water the process activates and fractal dimension increases up to $d_{W1(\mathrm{SDS})} = 1.14$. Filtration of water with the second stage finishes. For surfactant solutions the third stage is observed, connected with spontaneously developing process of conductive channels (fissures) formation. Its dimension for the presented graph is $d_{W2(\mathrm{SDS})} = 1.021$.

Acquired fractal dimensions determine the rate of rock saturation with active solutions:

$$W(t) \sim t^{(dw-1)}.$$

Permeability of rocks and massifs admittedly depends on the character of conductive channels, i. e. porosity [10, 11]. Many scientists, mainly oil industry experts, research the point in question. One of the basic indirect method of studying porosity is electrical-conductivity measurement of rocks saturated with electrically conducting fluid. Therein empirical equation (*Archie's law*) is used [12]:

$$\sigma = \alpha\sigma_0\Phi^m,$$

where σ_0 – conductivity of fluid; α – proportionality factor; Φ – porosity as a fraction of pores volume V_P in rock volume V (in the given researches it is an experimentally observable quantity of the total porosity P); m – exponent, depending on the shape of the pore-space (oil experts call it *cementation exponent*).

Important characteristic here is m exponent. It reflects not only the geometry of pores, but in this case, the character of solutions interaction with the surface of the conductive channels. Researches of the given problem reveal that for the majority of real hard rocks m is within the limits from 1 to 2. Researches of a wide range of effusive rocks of the Urals, conducted by the author of this article, make it possible to specify the given exponent. It has been stated that between the maximum water adsorption $W_{\max}$ and total porosity P there is exponential function, the graph of which is presented at fig. 3 in logarithmic coordinates.

Correlation analysis testifies to the statistically significant function with the approximation validity coefficient $R^2 = 0.97$. Pore-space shape exponent $m = 1.54$.

The obtained correlations make it possible to assess the kinetics of rock massif saturation with surfactant solutions. However the process of rock saturation with active

solutions is connected with the injection equipment installation and long-term face break, which discontinues mining technology. While it is evident that in the course of drilling boreholes and wells with flushing using surfactant solutions, active molecules penetrate into rocks and thus have its positive effect. Indeed, rock massif contacts with active solution during the entire period of drilling operations. The forecast calculations for typical conditions of tunnel driving at Severouralsk bauxite mine show, that only over the course of drilling rock massif manages to become saturated with surfactant solution up to 68% from the maximum possible value on average.

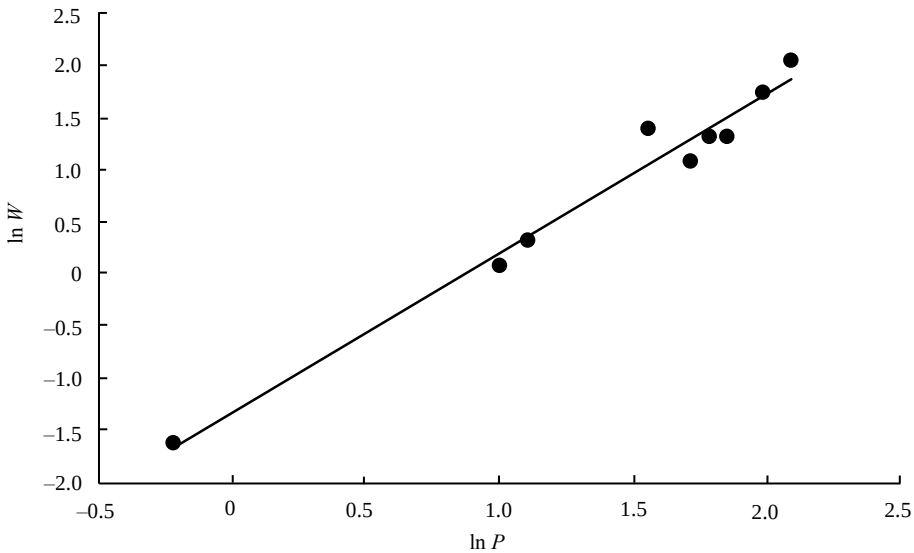

Fig. 3. Correlation of rocks permeability *W* and their porosity *P*
Рис. 3. Зависимость проницаемости пород *W* от их пористости *P*

Another important effect should be noted. Apart from adsorptive weakening in conditions of cyclic loading typical for the process of rock breaking at drilling, screening effect of surfactant solution is of great importance. During the unloading part of the cycle (for example, at reverse motion of the tool) adsorption layers penetrating into the micro fissures prevent such fissures from closing and healing of such fissures. This effect is especially significant in the mode of fatigue rock breaking.

It is important to note that the acquired assessments are minimal, reliably indicating the lower threshold of rock massif saturation with active solution. In real conditions a greater effect can be expected. It is determined by the following factors. Under the action of rock pressure in the course of drilling operations the process of fissures spontaneous development in rock massif and the third stage of saturation connected with it will continue. Besides, favorable for massif processing with surfactant solutions is the interaction of boreholes and wells as a single set: their influence zones overlapping, merging of fissures at fracture process zones, etc. Experimental industrial surfactant solutions injections in the faces of Severouralsk bauxite mines [3] confirm the given assessments.

Conclusions. Thus, the given investigations make it possible to assess the character of filtration of various active solutions in hard rocks and forecast the degree of the massif saturation in the process of drilling. Study of the kinetics of active solutions from the fractal positions gives valuable information. The acquired correlations are the base for the development of statistical (simulation) models of filtration on the basis of the theory of percolation with Monte-Carlo method.

REFERENCES

1. Rebinder P. A. *Poverkhnostnye iavleniia v dispersnykh sistemakh: izbrannye trudy* [Selected works "Surface phenomena in dispersed systems"]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 382 p.
2. Goriunov Iu. V., Pertsov N. V., Shchukin E. D. *Effekt Rebindera* [Rehbinder effect]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 178 p.
3. Latyshev O. G., Kornilkov M. V. *Napravlennoe izmenenie fraktal'nykh kharakteristik, svoistv i sostoianiia porod poverkhnostno-aktivnymi veshchestvami v protsessakh gornogo proizvodstva* [Intended variation of fractal characteristics, properties, and condition of rock with surfactants in the process of mining]. Ekaterinburg, UrSMU Publ., 2016. 407 p.
4. Latyshev O. G. [Research and control over the rock wetting]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 1996, no. 12, pp. 3–8. (In Russ.)
5. Nakaznaia L. G. *Fil'tratsiia zhidkosti i gaza v treshchinovatykh kollektorakh* [Fluid and gas filtration in fissured reservoirs]. Moscow, Nedra Publ., 1972. 184 p.
6. Shekhtman Iu. M. *Fil'tratsiia malokontsentrirovannykh suspenzii* [Filtration of low-concentrated suspensions]. Moscow, AS USSR Publ., 1961. 212 p.
7. Lipatnikov V. E., Kazakov K. M. *Fizicheskaia i kolloidnaia khimiia* [Physical and colloid chemistry]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 1981. 231 p.
8. Shroeder M. *Fraktaly, khaos, stepennye zakony: per. s angl.* [Fractals, chaos, and power laws. Trans. from Eng.]. Izhevsk, NITs "Reguliarnaia i khaoticheskaia dinamika" Publ., 2005. 528 p.
9. Mandelbrot B. The fractals geometry of nature. San Francisco, Freeman, 1982. 460 p.
10. Wei Li, Huan Zhao, Siqi Li, Wenfeng Sun, Lei Wang, Bing Li. A fractal model of effective stress of porous media and the analysis of influence factors. *Results in Physics*, 2018, no. 8, pp. 920–925.
11. Katz A., Thompson A. Fractal sandstone pores: implications for conductivity and pore formation. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, no. 54 (12), pp. 1325–1328.
12. Krylov S. S., Bobkov N. Iu. *Fraktaly v geofizike* [Fractals in geophysics]. St. Petersburg, SPbU Publ., 2004. 138 p.

Received 22th May, 2018

Latyshev O. G. Research of surfactant solutions filtration in hard rocks // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal. 2018. No. 6. Pp. 18–27.

Information about authors

Latyshev Oleg Georgievich – Doctor of Engineering sciences, Professor, professor of the Department of Mine Construction, Ural State Mining University. E-mail: shs.dep@ursmu.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ РАСТВОРОВ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ В СКАЛЬНЫХ ПОРОДАХ

Латышев О. Г.[1]
[1] Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия.

Цель. Перспективный путь повышения эффективности процессов горного производства – направленное изменение свойств пород поверхностно-активными веществами (ПАВ). При проектировании технологии использования ПАВ важными задачами являются исследование и прогноз фильтрации активных растворов в обрабатываемых горных породах. Цель исследований – установление закономерностей фильтрации растворов ПАВ в горных породах.
Методология исследований включает экспериментальное изучение и теоретический анализ процессов фильтрации активных растворов в горных породах.
Результаты исследования. В работе на базе экспериментальных исследований установлено, что процесс фильтрации активных растворов происходит в три стадии, отличающиеся механизмом движения активных жидкостей в горных породах. Дается аналитическая оценка параметров данных стадий насыщения. Показано, что процесс фильтрации обладает фрактальными свойствами и может быть исследован с позиций теории перколяции. Установлено, что в логарифмических координатах зависимость количества проникающего в породы раствора от времени описывается двумя линейными уравнениями, соответствующими стадиям фильтрационного насыщения и саморазвивающегося процесса двумерной миграции активных растворов.
Область применения. Полученные результаты используются при проектировании способов и средств управления свойствами и состоянием горных пород и массивов.
Выводы. Установленные закономерности позволяют осуществлять прогноз насыщения породных массивов активными растворами в различных процессах горного производства. Полученные количественные оценки (уравнения) могут служить базой статистического моделирования (метод Монте-Карло) проницаемости горных пород как перколяционной системы.

Ключевые слова: горные породы; поверхностно-активные вещества; механизмы фильтрации; теория перколяции.

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-18-27

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ребиндер П. А. Поверхностные явления в дисперсных системах: избранные труды. М.: Наука, 1979. 382 с.
2. Горюнов Ю. В., Перцов Н. В., Щукин Е. Д. Эффект Ребиндера. М.: Наука, 1966. 178 с.
3. Латышев О. Г., Корнилков М. В. Направленное изменение фрактальных характеристик, свойств и состояния пород поверхностно-активными веществами в процессах горного производства. Екатеринбург: УГГУ, 2016. 407 с.
4. Латышев О. Г. Исследование и контроль увлажнения горных пород // Известия вузов. Горный журнал. 1996. № 12. С. 3–8.
5. Наказная Л. Г. Фильтрация жидкости и газа в трещиноватых коллекторах. М.: Недра, 1972. 184 с.
6. Шехтман Ю. М. Фильтрация малоконцентрированных суспензий. М.: АН СССР, 1961. 212 с.
7. Липатников В. Е., Казаков К. М. Физическая и коллоидная химия. М.: Высшая школа, 1981. 231 с.
8. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы: пер. с англ. Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2005. 528 с.
9. Mandelbrot B. The Fractals geometry of nature. San Francisco, Freeman, 1982. 460 p.
10. Wei Li, Huan Zhao, Siqi Li, Wenfeng Sun, Lei Wang, Bing Li. A fractal model of effective stress of porous media and the analysis of influence factors // Results in Physics, 2018, no. 8, pp. 920–925.
11. Katz A., Thompson A. Fractal sandstone pores: implications for conductivity and pore formation. Phys. Rev. Lett., 1985, no. 54 (12), pp. 1325–1328.
12. Крылов С. С., Бобков Н. Ю. Фракталы в геофизике. СПб: СПбГУ, 2004. 138 с.

Сведения об авторах:

Латышев Олег Георгиевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры шахтного строительства Уральского государственного горного университета. E-mail: shs.dep@ursmu.ru

УДК 622.121.54 DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-28-34

ЗАВИСИМОСТЬ МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЯ ОТ ПРОЦЕССОВ СДВИЖЕНИЙ ПОРОД ПРИ ВЕДЕНИИ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

ШИНКЕВИЧ М. В.[1]

[1] Институт угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН
(Россия, г. Кемерово, просп. Ленинградский, 10)

Введение. *При современных темпах отработки угольных пластов в условиях увеличивающейся глубины их разработки и газоносности актуализируется проблема метанобезопасности угольных шахт. Ее решение невозможно без эффективного управления газовыделением на выемочных участках.*

Цель работы *– на основе научных открытий российских ученых о состоянии углеметанового пласта в виде твердого углегазового раствора и деформационно-волновых геомеханических процессов в окрестности выработок рассмотреть динамику выделения метана на действующем выемочном участке как следствие волнообразной разгрузки массива горных пород и разрабатываемого пласта от горного давления в результате движения очистного забоя.*

Методология. *В настоящее время при определении схем дегазации и газоуправления, а также при проектировании вентиляции высокопроизводительного выемочного участка не учитывается геомеханическая ситуация, возникающая при выемке углеметанового пласта. При использовании результатов исследований деформационно-волновых процессов в массиве горных пород появляется возможность оценить степень их воздействия на угольный пласт и повысить эффективность его дегазации и проветривания выемочного участка.*

Результаты. *В предлагаемом в статье подходе заложена связь фундаментальной задачи исследования нелинейных геомеханических процессов впереди длинного очистного забоя с характером метановыделения, которое является отражением указанных процессов.*

Выводы. *Используя данные о метанообильности высокопроизводительного выемочного участка, учитывая указанные процессы, можно определять продуктивность систем дегазации и предлагать наиболее рациональные схемы проветривания.*

Ключевые слова: *геомеханика; нелинейность; динамика метанообильности; выемочный участок; подготовительная выработка; аэрогазовый контроль; прогноз; управление.*

Введение. На шахтах Кемеровской области (Кузбасса) при современных темпах отработки угольных пластов в условиях увеличивающейся глубины их разработки и газоносности актуализируется задача повышения устойчивости высокопроизводительной и безопасной добычи угля. Современные угледобывающие комплексы обеспечивают скорость подвигания очистных забоев более 20 м/сут и добычи угля до 25 000 т/сут, что в разы больше этих значений в предшествующие десятилетия. Поскольку темпы ведения горных работ постоянно растут, существенно снижается адекватность основанных на предшествующем горном опыте методов и средств оценки ситуаций. Основой этого несоответствия является инерционность в совершенствовании нормативно-методической базы горной промышленности. В то же время научная основа для необходимого совершенствования методов и средств обеспечения безопасности при подземной добыче угля неуклонно развивается отечественной и зарубежной наукой во всех областях знаний [1–7].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-45-420001 р_а.

Цель работы. Реализованный в нормативно-методических документах, действующих в угольной промышленности, опыт прежних лет не соответствует реальным геомеханическим и газодинамическим процессам. Явная нелинейность этих процессов, установленная российскими учеными в 1990-х гг. [8–10] и достаточно широко проверенная в 2000-х [11–13], ярко проявляет себя в динамике метанообильности высокопроизводительных забоев даже при постоянных значениях скорости их подвигания и газового потенциала разрабатываемого массива газоносных горных пород. Исследовать и детализировать особенности происходящих в массиве процессов, причем в возрастающих масштабах, традиционными методами геомеханики невозможно. В настоящее время при определении схемы дегазации и проектировании вентиляции высокопроизводительного выемочного участка не учитывается геомеханическая ситуация, возникающая при выемке углеметанового пласта. По этой причине темпы горных работ и глубина их ведения ниже возможностей угледобывающих технологий.

Методология проведения исследований. Специфика угольных месторождений, заключающаяся в наличии в горном массиве газоносных пластов, активно выделяющих газ при снижении напряжений, позволяет рассматривать их как пластины-индикаторы развития геомеханического процесса в объемах, многократно превышающих возможности традиционных методов геомеханики. При этом непрерывно действующие системы газового мониторинга шахт регистрируют интенсивные газовые притоки из зон изменений геомеханического состояния миллионов тонн пород. Любое технологическое воздействие на отрабатываемый угольный пласт интенсифицирует процесс его газоистощения вследствие изменения напряженного состояния в приконтурной части пласта, т. е. геомеханические процессы влияют и на газокинетические состояния отрабатываемого пласта, что в конечном счете отражается на метанообильности выработок. Анализ этой информации возможен методами рудничной аэрогазодинамики. Интеграция указанных методов позволяет получать новые научные знания для решения достаточно сложных задач, что успешно реализуется в Институте угля ФИЦ УУХ СО РАН.

На данный момент все шахты в Кузбассе оснащены электронными системами аэрогазового мониторинга. Современная система контроля, как правило, снимает данные интенсивности изменения регистрируемых значений (концентраций метана, скорости расхода воздуха). В результате в процессе проведения подготовительных выработок и ведения очистных работ накапливается большой объем данных, в котором «скрыта» информация о развитии газогеомеханических процессов при ведении горных работ. Необходимы разработка и обоснование алгоритмов для интерпретации этих данных.

Результаты. Поскольку динамика метанообильности выемочного участка отражает реакцию вмещающего массива на технологическое воздействие, то, привлекая знания о нелинейности геомеханического процесса при выемке пласта, можно более надежно прогнозировать динамику метанообильности выемочного участка. Оперативное отслеживание динамики при движении очистного забоя и решение обратной задачи обеспечивает уточнение решений по обеспечению ритмичности подвигания забоя. Например, по динамике метанообильности очистного забоя в начальный период отработки выемочного столба можно оперативно уточнить величину шага первичного обрушения основной кровли, которая является важным технологическим параметром.

Для этого рассчитывают газовый потенциал отрабатываемого пласта и осуществляют мониторинг относительного газовыделения по мере отхода лавы от монтажной камеры. Величину первичного шага обрушения основной кровли $L_{ш.о}$, м, устанавливают по расстоянию от монтажной камеры до ближайшей к ней

точки минимума значений газокинетического показателя $P_{пл}$, в качестве которого принимают отношение относительного газовыделения к газовому потенциалу пласта (рис.1):

$$L_{ш.о} = 2\,l,$$

где l – расстояние от монтажной камеры до ближайшей к ней точки минимума значений газокинетического показателя в ненарушенном массиве, м.

Таким образом учитывается влияние процесса разгрузки и сдвижения горных пород кровли на газовыделение в призабойное пространство. Способ позволяет с достаточно высокой точностью и оперативно прогнозировать первичный шаг обрушения основной кровли.

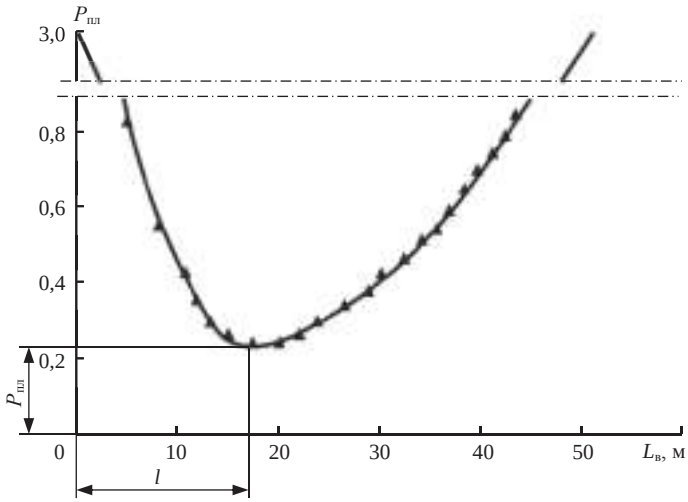

Рис. 1. Определение первичного шага обрушения основной кровли по длине выемочного столба $L_в$
Fig. 1. The determination of the initial caving step of the main roof according to the length of an extraction pillar $L_в$

Именно перераспределение напряжений посредством изменения метастабильных состояний углеметанового пласта предопределяет метановыделение через обнаженную поверхность забоя, переток метана из пласта через вмещающие породы в выработанное пространство и остаточную газоносность отбиваемой полосы угля [11, 13]. Очевидно, метановыделение является реакцией массива на происходящие в нем процессы сдвижений и перераспределений напряжений.

В работе [14] даны эмпирические функции распада углеметана во времени и зависимость газосодержания угля от напряжения, действующего на него, из которых следует, что распад основной части геоматериала происходит за 3 ч. Этот период характеризуется высоким снижением скорости газоистощения. При использовании этих зависимостей появляется возможность определять газокинетические характеристики как отбиваемой полосы угля, так и всего угольного пласта.

На рис. 2 приведены данные системы измерения давления на секции механизированной крепи, пересчитанные на высоту действующего слоя горных пород, позволяющие уточнять информацию о напряженном состоянии призабойной части пласта. Согласно [13], изменение этого состояния уточняет газокинетические свойства угля, отбиваемого комбайном и, следовательно, метанообильность очистного забоя и транспортных выработок.

Оперативное управление режимом добычи угля возможно путем использования современных автоматизированных систем аэрогазового контроля, но необходим переход на качественно новый уровень – прогнозирование газовой обстановки и управление технологическими решениями как на стадии проектирования, так и на стадии ведения горных работ. Только в этом случае можно с достаточной степенью надежности гарантировать ритмичную работу высокопроизводительного забоя. Однако даже наиболее известные автоматизированные системы с компьютерным оснащением ограничены информационно-контролирующими функциями, т. е. обладают тем же качественным недостатком, что и отечественные системы предшествующего поколения «Метан», АКМР, АПТВ и др. В конце 1980-х гг. на базе этих систем были разработаны автоматизированные методы прогноза зон повышенной выбросоопасности при проведении подготовительных выработок. Современные электронные системы аэрогазового мониторинга, обладая большими техническими возможностями, позволяют использовать разработанные подходы и при очистных работах.

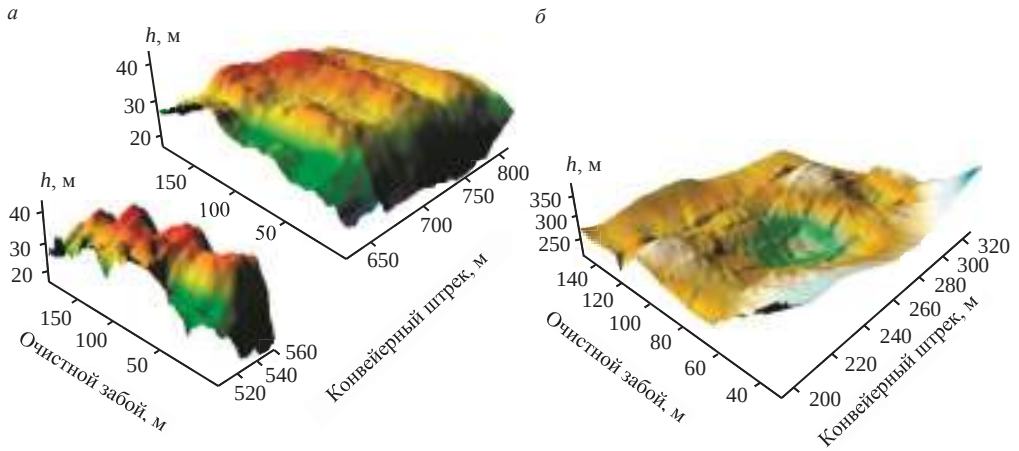

Рис. 2. Волнообразные изменения давления на секции механизированной крепи при движении очистного забоя:
а – шахта Алардинская; *б* – шахта Чертинская-Коксовая
Fig. 2. Undulating pressure changing at the mechanized support section at the advance of the stopping face:
a – Alardinsky mine; *b* – Chertinsky-Koksovy mine

Анализ и обсуждение. Даже самые достоверные знания газогеомеханики должны быть адаптированы к конкретным горнотехнологическим условиям, что потенциально может обеспечить современная система рудничного мониторинга, составной частью которой является система аэрогазового контроля. Интеграция представленной на рис. 2 и 3 информации и является перспективной основой управления метанообильностью очистного забоя. Вертикально расположенные на рис. 3 группы точек фактических данных, стремящиеся к минимуму, обусловлены остановками забоя.

Согласно рис. 2, 3, геомеханические процессы в массиве горных пород несколько отличаются от классических представлений. Именно уточнение бытующих представлений при изменившихся технологических условиях и с использованием современных знаний позволит прогнозировать как геомеханические, так и газодинамические следствия выемки пластов угля.

Применение результатов, выводы. Описание физической картины изменения свойств и состояний среды всегда намного полнее реализуемых математических моделей. Причем наиболее заметно это несоответствие для угольных пла-

стов как газоносных геоматериалов. Так, на модели (полученные по прочностным и деформационным характеристикам материала, не содержащего газ) накладывается закономерность распределения, например давления газа, установленная, в лучшем случае, в соответствии с условиями неравновесной фильтрации, т. е. совершенно игнорируется участие газовой компоненты среды в начальной стадии деформирования массива.

На снижение значимости подобных недостатков при описании физической картины происходящих в горном массиве процессов ориентированы перечисленные аспекты исследований, предусматривающих:

– разработку уникальной схемы развития нелинейных геомеханических процессов в массиве горных пород в области влияния очистной выемки и исследование связи газодинамической реакции массива и разрабатываемого пласта (динамики метанообильности выемочного участка) с этими процессами;

– уточнение характеристик углей, определяющих величину газокинетических показателей природного геоматериала;

– разработку схемы дегазации углевмещающего массива горных пород с учетом схемы развития нелинейных геомеханических процессов в массиве горных пород в области влияния очистной выемки.

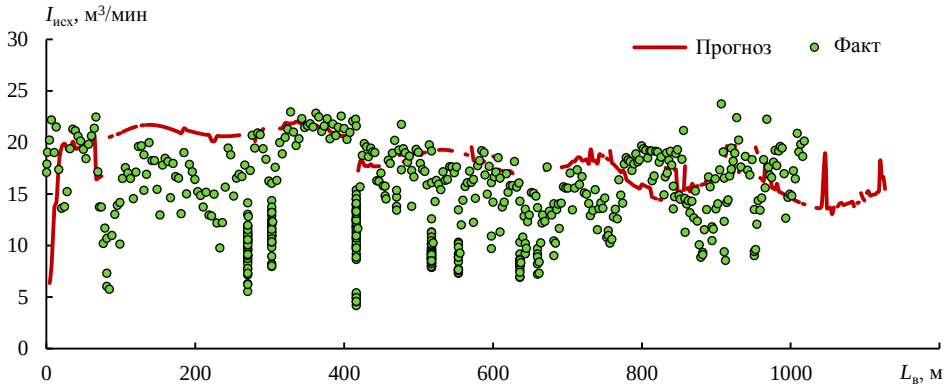

Рис. 3. Фактические и прогнозные данные о динамике метанообильности исходящей из очистного забоя струи $I_{исх}$ в зависимости от длины выемочного столба $L_в$

Fig. 3. Actual and forecasting data on the methane-bearing capacity dynamics of the outcoming jet from the stoping face $I_{исх}$ according to the length of an extraction pillar $L_в$

При решении задач повышения безопасности и эффективности горных работ на угольных шахтах планируется использовать комплексный подход, основанный на объединении как классических моделей развития зон разгрузки и сдвижений массива горных пород, так и результатов современных фундаментальных исследований эти процессов и новых научных знаний о свойствах и состояниях газоносных пластов, в том числе с применением сделанных российскими учеными научных открытий о явлении зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок и о свойстве органического вещества угля образовывать с газами метастабильные однофазные системы по типу твердых растворов. Несомненной новизной в применении методов рудничной аэрогазодинамики является установление закономерностей формирования и развития пространственной волнообразности техногенных геомеханических процессов, обуславливающих динамику метанообильности выемочных участков при угледобыче. Такой подход основан на единстве причинно-следственных связей газокинетических и геомеханических процессов, следствия которых непрерывно отслеживает система газового мониторинга шахты. Следовательно, имеется инструментально обеспеченная возможность получения информации о весьма сложных и малоизучен-

ных процессах. Более того, при таком подходе уточняется связь решения фундаментальной задачи с ее прикладным значением.

Реализация таких представлений позволит получить углубленные знания о развитии деформационно-волновых процессов в массиве горных пород в окрестности горной выработки при движении забоя. Результаты исследований станут основой инновационных разработок в области повышения эффективности и безопасности при ведении работ на угольных шахтах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Tabachenko N. M., Dychkovskiy R. Ye., Falshtynskiy V. S. About extraction of methane and slate gas from coal and slate deposits // Науковий Вісник Національного Гірничого університету. 2012. Vol. 2. P. 44–48.

2. Амангелдікызы А., Пономарева М. В., Айтпаева А. Р. Исследование метаноносности угля пласта К7 в районе шахтного поля шахты им. Т. Кузембаева // Труды университета. 2015. № 2. С. 67–70.

3. Клишин В. И., Опрук Г. Ю. Расчет газовыделения в очистной забой в системах разработки подэтажными штреками «крепь-штрек» // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2012. № 6. С. 54–59.

4. Tailakov O. V., Kormin A. N., Zastrelov D. N., Utkaev E. A., Sokolov S. V. Justification of a method for determination of gas content in coal seams to assess degasification efficiency // The 8th Russian-Chinese Symposium. Coal in 21st Century: Mining, Processing and Safety, 2016. P. 324–329.

5. Shevchenko L. A. Debit gas in well as a comprehensive indicator of gas permeability of the coal seam // Coal in the 21st Century: Mining, Processing and Safety. 2016. P. 184–187.

6. Палеев Д. Ю., Аксенов В. В., Лукашов О. Ю., Васенин И. М., Крайнов А. Ю., Шрагер Э. Р. Моделирование аэрогазодинамических процессов в вентиляционных сетях современных горнодобывающих предприятий // ГИАБ. 2015. № 2 (7). С. 224–230.

7. Портола В. А. О повышении эффективности извлечения метана из шахт при эксплуатации высокогазоносных пластов // Вестник КузГТУ. 2007. № 3. С. 10–12.

8. Reuter M., Krach M., Kieβling U., Veksler Y. Zonal disintegration of rocks around breakage headings // Journal of Mining Science. 2015. Vol. 51. No. 2. P. 237–242.

9. Шемякин Е. И., Курленя М. В., Опарин Н. В., Рева В. Н., Глушихин Ф. П., Розенбаум М. А. Открытие № 400. Явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок // БИ. 1992. № 1. 3 с.

10. Зональная дезинтеграция горных пород и устойчивость подземных выработок / В. Н. Опарин [и др.]. Новосибирск: СО РАН. 2008. 278 с.

11. Полевщиков Г. Я., Шинкевич М. В., Плаксин М. С. Газокинетические особенности распада углеметана на конвейерном штреке выемочного участка // ГИАБ. 2011. № 8. С. 21–28.

12. Шинкевич М. В., Леонтьева Е. В. Моделирование техногенной структуризации вмещающего массива горных пород при ведении очистных работ // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2015. № 3. С. 23–31.

13. Шинкевич М. В. Газовыделение из отрабатываемого пласта с учетом геомеханических процессов во вмещающем массиве // ГИАБ. 2013. № 6. С. 278–285.

14. Малышев Ю. Н., Трубецкой К. Н., Айруни А. Т. Фундаментально-прикладные методы решения проблемы угольных пластов М.: ИАГН, 2000. 516 с.

Поступила в редакцию 12 апреля 2018 года

Шинкевич М. В. Зависимость метановыделения от процессов сдвижений пород при ведении подземных горных работ // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 6. С. 28–34.

Сведения об авторах:

Шинкевич Максим Валериевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института угля ФИЦ УУХ Сибирского отделения РАН. E-mail: max-valerich@rambler.ru

METHANE EMISSION DEPENDENCE ON ROCK DISPLACEMENT PROCESSES WHEN CONDUCTING UNDERGROUND MINING OPERATIONS

Shinkevich M. V.[1]

[1] Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of RAS, Kemerovo, Russia.

Introduction. At the current rates of coal seam mining, in the conditions of increasing depth of their development and gas content, the problem of methane safety of coal mines becomes topical. Its solution is impossible without effective control of gas emission at the excavation sites.

The aim of the research is to consider the dynamics of methane emission in the current excavation site as a consequence of undulating unloading of the rock massif and the developed formation from rock pressure as a result of stoping face advance on the basis of scientific discoveries of Russian scientists on the state of the coal-methane formation in the form of a solid coal-gas solution and deformation-wave geomechanical processes in the vicinity of the excavations.
Methodology. At present, when determining the degassing and gas control schemes, as well as designing the ventilation of a high-performance excavation site, the geomechanical situation that occurs when the carbon methane layer is removed is not taken into account. Using the research results of deformation-wave processes in the array of rocks, it becomes possible to assess the degree of their impact on the coal seam and improve the efficiency of its degassing and excavation site ventilation.
Results. In the approach proposed in the article a connection is made between the fundamental problem of investigating nonlinear geomechanical processes ahead of a long stoping face and the character of methane emission which is a reflection of the indicated processes.
Conclusions. Using the data on the methane-bearing capacity of the high-performance excavation site and considering the indicated processes we will be able to determine the productivity of the degassing systems and the most rational ventilation schemes.
Key words: geomechanics; non-linearity; dynamics of a methane-bearing capacity; excavation site; development heading; aerogas control; forecast; management.

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-28-34

REFERENCES

1. Tabachenko N. M., Dychkovskiy R. Ye., Falshtynskiy V. S. About extraction of methane and slate gas from coal and slate deposits. *Naukovii visnik NGU – Scientific Bulletin of NMU*, 2012, vol. 2, pp. 44–48.
2. Amangeldiкyzy A., Ponomareva M. V., Aitpaeva A. R. [Investigation of K7 seam coal methane content near the mine field of Kuzembaev mine]. *Trudy Universiteta – University's works*, 2015, no. 2, pp. 67–70.
3. Klishin V. I., Opruk G. Iu. [Calculation of gas emission into the stoping face in the systems of "support-gallery" sublevel mining]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2012, 6 (4), pp. 54–59. (In Russ.)
4. Tailakov O. V., Kormin A. N., Zastrelov D. N., Utkaev E. A., Sokolov S. V. Justification of a method for determination of gas content in coal seams to assess degasification efficiency. The 8th Russian-Chinese Symp. Coal in 21st Century: Mining, Processing and Safety, 2016, pp. 324–329.
5. Shevchenko L. A. Debit gas in well as a comprehensive indicator of gas permeability of the coal seam. Coal in the 21st Century: Mining, Processing and Safety, 2016, pp. 184–187.
6. Paleev D. Iu., Aksenov V. V., Lukashov O. Iu., Vasenin I. M., Krainov A. Iu., Shrager E. R. [Modeling earogas dynamic processes in the ventilation networks of modern mining enterprises]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2015, no. 2 (7), pp. 224–230. (In Russ.)
7. Portola V. A. [Regarding the efficiency improvement of methane withdrawal from the mines under the exploitation of seams with high gas content]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2007, no. 3, pp. 10–12. (In Russ.)
8. Reuter M., Krach M., Kießling U., Veksler Y. Zonal disintegration of rocks around breakage headings. *Journal of Mining Science*, 2015, vol. 51, no. 2, pp. 237–242.
9. Shemiakin E. I., Kurlenia M. V., Oparin N. V., Reva V. N., Glushikhin F. P., Rozenbaum M. A. [Discovery no. 400. The effect of zonal disintegration of rocks around underground excavations]. *BI*, 1992, no. 1. 3 p.
10. Oparin V. N., and others. *Zonal'naia dezintegratsiia gornykh porod i ustoichivost' podzemnykh vyrabotok* [Zonal disintegration of rocks and underground excavations stability]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2008. 278 p.
11. Polevschikov G. Y., Shinkevich M. V., Plaksin M. S. [Gas-kinetic features of the disintegration of coal-bed methane at the conveyor road of working area]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2011, no. 8, pp. 21–28. (In Russ.)
12. Shinkevich M. V., Leont'eva E. V. [Simulation of enclosing rock mass technogenic structuring when performing stoping operations]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2015, no. 3, pp. 23–31. (In Russ.)
13. Shinkevich M. V. [Gas emission out of the mined seam with the account of geomechanical processes in the enclosing massif]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2013, no. 6, pp. 278–285. (In Russ.)
14. Malyshev Iu. N., Trubetskoi K. N., Airuni A. T. *Fundamental'no-prikladnye metody resheniia problemy ugol'nykh plastov* [Fundamental and applied methods of solving the problem of coal beds]. Moscow, IAGN Publ., 2000. 516 p.

Information about authors

Shinkevich Maksim Valerievich – Candidate of Engineering sciences, senior researcher of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry, SB RAS. E-mail: max-valerich@rambler.ru

УДК 622.276.1 DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-35-40

ОДНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ НЕФТЕЙ С ВЯЗКО-ПЛАСТИЧНЫМИ СВОЙСТВАМИ С УЧЕТОМ СКИН-ФАКТОРА

АБДУЛЛАЕВ М. Г.[1], ДАДАШ-ЗАДЕ Х. И.[1]

[1] Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности
(Азербайджан, г. Баку, просп. Азадлыг, 20)

Введение. *В статье рассмотрен вопрос влияния скин-фактора на одномерное движение нефтей с вязко-пластичными свойствами.*

Цель статьи *– оценить влияние скин-фактора на производительность скважин с высоковязкой нефтью.*

Методика проведения исследований. *Загрязнение призабойной зоны пласта и высокий скин-фактор приводят к снижению производительности скважин. Если скважины отличаются особенно высокими значениями скин-фактора и низкими продуктивными возможностями, обусловленными значительным загрязнением призабойной зоны асфальто-парафино-смолистыми отложениями, нужно проводить обработку призабойной зоны пласта, чтобы восстановить первичные значения проницаемости призабойной зоны. Поэтому необходимо выявление влияния скин-фактора на дебит скважин, из которых добывают нефть с вязко-пластичными свойствами, выполнено с использованием теоретического анализа процессов фильтрации.*

Результаты. *Рассмотрены нефти угленосной толщи нижнего карбона, которые отличаются высоким содержанием асфальтенов и смол. Нефть, содержащая асфальтено-смолистые вещества, представляет собой коллоидную систему, которая по характеру близка к вязко-пластичным нефтям. Дисперсной фазой в этой системе являются частицы асфальтенов, дисперсионной средой – смолы углеводородов разных классов. Стабилизирующим фактором в системе являются сольватные соли, вокруг которых накапливаются тяжелые компоненты. Интенсивность взаимодействия между частицами асфальтенов в нефти зависит от степени их сольватации. При десольватации усиливается взаимодействие между ними, что ведет, с одной стороны, к их ассоциации и уменьшению степени дисперсности асфальтенов, а с другой – к возникновению структуры в нефти и появлению вязко-пластичных свойств.*

Выводы. *Установлено влияние скин-фактора на вязко-пластичные свойства нефти и на дебит скважины.*

Ключевые слова: *вязко-пластичные свойства; проницаемость; парафины; асфальтены; смолы; скин-фактор.*

Введение. Из многочисленных литературных источников известны причины возникновения скин-фактора – гидродинамическое несовершенство вскрытия пласта, загрязнение околоскважинной зоны, нелинейные эффекты (турбулентное течение, разгазирование, сжатие скелета горной породы и т. д.) – и его влияние на производительность как добывающих, так и нагнетательных скважин.

Методические подходы. В 1949 г. впервые A. F. Van Everdingen и N. Hurst для оценки состояния призабойной зоны скважины ввели понятие *скин-эффект* и указали, что падение забойного давления в результате ухудшения проницаемости околоскважинной зоны пласта пропорционально скин-эффекту (1956 г.) [1]. Термин *скин-эффект* был введен ранее в области электротехники, а применительно к нефтегазодобыче для оценки состояния продуктивного пласта более подходящим было бы использование понятия *скин-фактор*. Распространенное определение скин-фактора (S) как результата несовершенства вскрытия скважины, данное в работе [2], далеко не полностью раскрывает физический смысл и механизмы его возникновения. Поэтому по сей день остаются открытыми и дискуссионными наиболее принципиальные вопросы: область существования значений S и их принадлежность, неопределенность положительного и отрицательного знаков его

значений, отсутствие строгой теории вывода формулы. По формуле M. F. Hawkins скин-фактор может иметь значения от –∞ до 0 и от 0 до +∞ без принадлежности области определения и существования.

Скин-фактор определяется на основании результатов исследований при установившихся (стационарных) и неустановившихся (нестационарных) режимах фильтрации [3]. В работе [4] для оценки скин-эффекта и для расчета поля давления использовались функции Грина. Пласт считался бесконечным, вскрытым одной скважиной с вертикальной трещиной.

Теоретические и лабораторные исследования показали, что многие нефтяные месторождения Азербайджана, России и США содержат нефть с аномальными свойствами. По результатам исследований, проведенных за последние годы, можно судить о том, что эта нефть по физико-механическим свойствам может рассматриваться как вязко-пластичная среда. Фильтрация структурных жидкостей в пористой среде отличается от фильтрации ньютоновских жидкостей. Экспериментально доказано, что на структурные свойства нефти оказывают влияние парафины, асфальтены, смолы, а также углеводородный состав газов, растворенных в нефти.

Влияние на изменение структурных свойств нефти таких компонентов, как парафины и смолы, а также воздействие температуры рассматривалось многими авторами [2, 5–9]. О влиянии асфальтенов и газов, растворенных в нефти, сведений очень мало [10]. В некоторых работах при определении состояния призабойной зоны пласта по результатам гидродинамических исследований рассматривался вопрос определения скин-эффекта на основании кривой восстановления давления. Для определения скин-фактора (с учетом схождения потоков в трещине горизонтальной скважины с многостадийным ГРП и схождения потоков к стволу горизонтальной скважин) предлагались различные формулы [11, 12].

Изучению влияния ствола скважины и скин-эффекта на КВД при исследованиях скважин посвящены работы Агарвола, Аль-Хусейна и Ремея (1970 г.) для случая КПД, а также работы Мак Кинли (1971 г.) [13] для случая КВД, Грингартена и соавторов – для обобщенных КВД и КПД. Агарвол с соавторами [14] получили решение дифференциального уравнения фильтрации для случая пуска скважины конечного радиуса в бесконечном пласте с постоянным дебитом. Однако аналитическое исследование этого уравнения достаточно сложно для получения практических полезных выводов о влиянии ствола скважины на КВД [15]. В работе [15] подробно и последовательно излагается аналитический вывод формулы для расчета S, физический смысл и геометрическая интерпретация его значения. Аналитический вывод формулы S подтверждается выводом формулы через индикаторные линии *дебит-уровень*, *дебит-давление* и по значениям забойного давления и потенциального дебита. Однако в представленных работах не изучено влияние скин-фактора на реальный расход жидкости, т. е. на дебит скважины.

Интерес представляют нефти угленосной толщи нижнего карбона, которые отличаются высоким содержанием асфальтенов и смол. Нефть, содержащая асфальтено-смолистые вещества, представляет собой коллоидную систему, которая по характеру близка к вязко-пластичным нефтям. Надо отметить, что дисперсной фазой в этой системе являются частицы асфальтенов, дисперсионной средой – смолы углеводородов разных классов. Стабилизирующим фактором в системе являются сольватные соли, вокруг которых накапливаются тяжелые компоненты. Сольватные соли образуют смолы, ароматические и нафтеновые углеводороды. Интенсивность взаимодействия между частицами асфальтенов в нефти зависит от степени их сольватации. При десольватации усиливается взаимодействие между ними, что ведет, с одной стороны, к их ассоциации и уменьшению степени дисперсности асфальтенов, а с другой – к возникновению в нефти структуры и появлению вязко-пластичных свойств.

Таким образом, изучение асфальтенов в пластовой нефти дает возможность установить, при каких условиях последняя может обладать структурными, т. е. вязко-пластичными свойствами.

Многочисленные лабораторные исследования показывают, что ряд практических вопросов, касающихся рациональной разработки нефтяных месторождений, механизма нефтеотдачи, процесса фильтрации, для случаев, когда нефть обладает структурно-механическими свойствами, остаются невыясненными.

Одним из таких вопросов является вопрос процессов фильтрации аномальных нефтей с вязко-пластичными свойствами с учетом скин-фактора.

Известно, что при одномерной линейной фильтрации вязко-пластичных нефтей скорость фильтрации можно определить по формуле

$$\frac{dP}{dx} = -\left(\frac{\mu}{k}v + \frac{\alpha\tau_0}{\sqrt{k_1}}\right),$$

где dP/dx – градиент давления; μ – структурная вязкость вязко-пластичной жидкости; k – проницаемость пласта по жидкости; k_1 – проницаемость пласта по воздуху; τ_0 – предельное напряжение сдвига; α – безразмерный параметр, учитывающий неньютоновские свойства нефти; v – скорость фильтрации жидкости.

Решим данное уравнение относительно расхода жидкости:

$$Q = \frac{kF}{\mu}\left(\frac{dP}{dx} - \frac{\alpha\tau_0}{\sqrt{k_1}}\right),$$

где F – площадь поперечного сечения пласта.

Отсюда

$$dP = \left[\frac{Q\mu}{kF} + \frac{\alpha\tau_0}{\sqrt{k_1}}\right]dx.$$

Для учета скин-фактора рассмотрим следующие условия для пласта с вязко-пластичными свойствами фильтрующей жидкости:

$$\int_{Pc}^{Pk} dP = \left[\frac{Q\mu}{kF} + \frac{\alpha\tau_0}{\sqrt{k_1}}\right]\int_0^{Ls} dx + \left[\frac{Q\mu}{kF} + \frac{\alpha\tau_0}{\sqrt{k_1}}\right]\int_{Ls}^{L-Ls} dx,$$

где k_s – проницаемость пласта ближе к ряду скважин, где возникает скин-фактор; P_k – давление на контуре; P_c – давление на забое скважины; L_s – длина участка, где возникает процесс, учитывающий скин-фактор; L – длина общего участка между контуром и забоем скважины.

Решая данное уравнение, получим:

$$P_k - P_c = \frac{Q\mu}{kF}L\left[1 + \frac{L_s}{L}\left(\frac{k}{k_s} - 2\right)\right] + \frac{\alpha\tau_0}{\sqrt{k_1}}\left(L - L_s\right).$$

Введем понятие скин-фактора:

$$S = \frac{L_s}{L}\left(\frac{k}{k_s} - 2\right).$$

С учетом скин-фактора перепад давления при фильтрации вязко-пластичной жидкости можно определить как

$$P_k - P_c = \frac{Q\mu}{kF} L\left(1+S\right) + \frac{\alpha\tau_0}{\sqrt{k_1}} L\left(1-\frac{L_s}{L}\right).$$

При $S = 0$ получим формулу академика А. Х. Мирзаджанзаде; если $\tau_0 = 0$ – общую формулу для неньютоновских жидкостей.

С учетом сказанного можно определить расход неньютоновской жидкости:

$$Q = \frac{kF}{\mu}\left[\frac{P_k - P_c}{\mu} - \frac{\alpha\tau_0}{\sqrt{k_1}}\left(1-\frac{L_s}{L}\right)\right]\Big/\left(1+S\right).$$

Выводы. Как видно из формулы, скин-фактор влияет на вязко-пластичные свойства нефти и на дебит скважины. Отметим, что если скин-фактор имеет отрицательное значение, то добыча увеличивается, если скин-фактор имеет положительное значение, то дебит уменьшается. Скин-фактор можно определить на основе результатов исследования скважин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Van Everdingen A. F., Hurst W. The application of the Laplace transformation to flow problems in reservoirs // Petrol. Transactions, AIME. 1949. Vol. 1. No. 12. С. 2732–2735.

2. Справочное руководство по проектированию разработки и эксплуатации нефтяных месторождений / под ред. Ш. К. Гиматудинова. М.: Недра, 1983. 455 с.

3. Economides Michael J., Daniel Hill A., Ehlig Christine. Petroleum production systems. Economides, by Prentice Hall PTR, 1994.

4. Gringarten A. C., Ramey H. J., Raghavan R. Unsteady-state pressure distributions created by a well with a single infinite-conductivity vertical fracture // Soc. Petrol. Eng. J. 1974. Vol. 14. No. 4. P. 347–360.

5. Ли Дж., Ваттенбаргер Р. А. Инжиниринг газовых резервуаров. М.: Газпром, 2014. 944 с.

6. Мирзаджанзаде А. Х. Вопросы гидродинамики вязко-пластичных и вязких жидкостей в нефтедобыче. Баку, 1959. 348 с.

7. Мищенко И. Т. Скважинная добыча нефти. М.: Нефть и газ, 2003. 816 с.

8. Салаватов Т. Ш., Абдуллаев М. Г., Гараев Р. Г., Хамитов Н. М., Джаманбаев С. Е. Способ повышения производительности скважин применением термохимической обработки призабойной зоны пласта // Научное обозрение. 2016. № 9. С. 61–70.

9. Салаватов Т. Ш. Регулирование реофизических свойств нефтей физическими полями: дис. … канд. техн. наук. Баку, 1981. 150 с.

10. Хорнеш Я. Исследование фильтрации асфальтсодержащих нефтей // Нефтяное хозяйство. 1966. № 10. С. 25–20.

11. Булатов А. И., Савенок О. В., Яремийчук Р. С. Научные основы и практика освоения нефтяных и газовых скважин. Краснодар: Юг, 2016. 576 с.

12. Дуркин С. М. Математическая модель скважины, дренирующей трещиновато-пористый коллектор: дис. … канд. техн. наук. Ухта, 2014. 125 с.

13. McKinley K. M. Wellbore transmissibility from afterflow-dominated pressure build-up data // J. Petrol. Technol., July, 1971.

14. Agarwal R. G., Al-Hussainy R., Ramey H. J. An invastigation of wellbore storage and skin effect in unsteady liquid flow. J. Analytical Treatment. SPEJ. Sept. 1979. P. 279–290.

15. Муфазалов Р. Ш. Гидромеханика добычи нефти: учеб. пособие для вузов. М.: Горная книга, 2005. 328 с.

Поступила в редакцию 10 апреля 2018 года

Абдуллаев М. Г., Дадаш-заде Х. И. Одномерное движение нефтей с вязко-пластичными свойствами с учетом скин-фактора // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 6. С. 35–40.

Сведения об авторах:

Абдуллаев Малик Гурбан оглу – кандидат технических наук, доцент, преподаватель кафедры нефтегазовой инженерии Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности. E-mail: malik.abdullayev.52@mail.ru

Дадаш-заде Ханум Иса гызы – кандидат технических наук, доцент, преподаватель кафедры нефтегазовой инженерии Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности. E-mail: dadashzademirza@mail.ru

ONE-DIMENSIONAL MOTION OF OILS WITH VISCOUS-DUCTILE PROPERTIES WITH THE ACCOUNT OF A SKIN FACTOR

Abdullaev M. G.[1], Dadash-zade Kh. I.[1]
[1] Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan.

Introduction. The article considers the problem of skin factor influence on the one-dimensional motion of oils with viscous and ductile properties.
The aim of the article is to assess the influence of a skin factor on the capacity of wells with high-viscosity oil.
Research methodology. It is well-known that seam borehole zone pollution and high skin factor leads to the reduction of wells capacity. If wells are distinguished by particularly high values of a skin factor and low productiveness conditioned on significant pollution of a borehole zone with asphalt-paraffin-resine residue, it is necessary to fulfill seam borehole zone processing in order to reconstruct borehole zone permeability primary values. It is therefore necessary to determine the influence of a skin factor on the production rate of the well whereof oil with viscous and ductile properties is produced.
Results. With this purpose the lower Carbonian coal-bearing strata oils are examined which are distinguished by high content of asphaltenes and resins. Oil which contains asphaltene-resin matters represents colloidal system which is similar to viscous-ductile oils in its character. It should be noted that in this system asphaltene particles are dispersed phase, while hydrocarbon resins of various classes and resins dissolved in them are a continuous medium. Stabilizing factor in the system are solvate salts around which heavy components are accumulated. Interaction intensity between asphaltene particles in oil depends on the degree of their solvation. Under desolvation the interaction between them intensifies which leads to their association and asphaltene dispersion reduction on the one hand, and generation of a structure in oil and the occurrence of viscous-ductile properties on the other hand.
Key words: viscous-ductile properties; permeability; paraffins; asphaltenes; resins; skin factor.

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-35-40

REFERENCES

1. Van Everdingen A. F., Hurst W. The application of the Laplace transformation to flow problems in reservoirs. *Petrol. Transactions, AIME*, 1949, vol. 1, no. 12, pp. 2732–2735.
2. *Spravochnoe rukovodstvo po proektirovaniiu razrabotki i ekspluatatsii neftianykh mestorozhdenii / pod red. Sh. K. Gimatudinova* [Reference guide on mine design and oil fields exploitation. Edited by Sh. K. Gimatudinov]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 455 p.
3. Economides Michael J., Daniel Hill A., Ehlig Christine. Petroleum production systems. Economides, by Prentice Hall PTR, 1994.
4. Gringarten A. C., Ramey H. J., Raghavan R. Unsteady-state pressure distributions created by a well with a single infinite-conductivity vertical fracture. *Soc. Petrol. Eng. J.*, 1974, vol. 14, no. 4, pp. 347–360.
5. Lee J., Wattenbarger R. A. *Inzhiniring gazovykh rezervuarov* [Gas reservoir engineering]. Moscow, Gazprom Publ., 2014. 944 p.
6. Mirzadzhanzade A. Kh. *Voprosy gidrodinamiki viazko-plastichnykh i viazkikh zhidkostei v neftedobyche* [Issues of hydrodynamics of viscous-ductile and viscous liquids in oil production]. Baku, 1959. 348 p.
7. Mishchenko I. T. *Skvazhinnaia dobycha nefti* [Oil well mining]. Moscow, Neft' i gaz Publ., 2003. 816 p.
8. Salavatov T. Sh., Abdullaev M. G., Garaev R. G., Khamitov N. M., Dzhamanbaev S. E. [Method for improving the well productivity by using the thermochemical processing of hole-bottom region]. *Nauchnoe obozrenie – Science Review*, 2016, no. 9, pp. 61–70. (In Russ.)
9. Salavatov T. Sh. *Regulirovanie reofizicheskikh svoistv neftei fizicheskimi poliami: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Regulation of oil rheophysical properties with physical fields. Cand. Eng. sci. diss.]. Baku, 1981. 150 p.
10. Khornesh Ia. [Investigation into asphaltene bearing oils filtration]. *Neftianoe khoziaistvo – Oil Industry*, 1966, no. 10, pp. 25–20. (In Russ.)
11. Bulatov A. I., Savenok O. V., Iaremiichuk R. S. *Nauchnye osnovy i praktika osvoeniia neftianykh i gazovykh skvazhin* [Scientific fundamentals and the practice of oil and gas wells completion]. Krasnodar, Iug Publ., 2016. 576 p.
12. Durkin S. M. *Matematicheskaia model' skvazhiny, dreniruiushchei treshchinovato-poristyi kollektor: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Mathematical model of the well which drains fissured porous reservoirs. Cand. Eng. sci. diss.]. Ukhta, 2014. 125 p.
13. McKinley K. M. Wellbore transmissibility from afterflow-dominated pressure build-up data. *J. Petrol. Technol.*, July, 1971.
14. Agarwal R. G., Al-Hussainy R., Ramey H. J. An investigation of wellbore storage and skin effect in unsteady liquid flow. *J. Analytical Treatment*. SPEJ, Sept. 1979, p. 279–290.
15. Mufazalov R. Sh. *Gidromekhanika dobychi nefti: ucheb. posobie dlia vuzov* [School book for the institutions of higher education “Hydromechanics of oil production”]. Moscow, Gornaia kniga Publ., 2005. 328 p.

Information about authors

Abdullaev Malik Gurban oglu – Candidate of Engineering sciences, Associate professor, lecturer at the Department of Oil and Gas Engineering of Azerbaijan State University of Oil and Industry. E-mail: malik.abdullayev.52@mail.ru
Dadash-zade Khanum Isa gyzy – Candidate of Engineering sciences, Associate professor, lecturer at the Department of Oil and Gas Engineering of Azerbaijan State University of Oil and Industry. E-mail: dadashzademirza@mail.ru

УДК 550.837.76 DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-41-49

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ГИДРОИЗОЛЯЦИИ ПЛОЩАДОК КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

СЯСЬКО А. А.[1], ГРИБ Н. Н.[2], ИМАЕВ В. С.[3], ГРИБ Г. В.[2]
[1] ООО «Нерюнгригеофизика»
(Россия, Республика Саха (Якутия), г. Нерюнгри, ул. Геологов, 41/2)
[2] Технический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета
(Россия, Республика Саха (Якутия), г. Нерюнгри, ул. Кравченко, 16)
[3] Институт земной коры СО РАН
(Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128)

Цель. *Для контроля целостности гидроизоляции площадки кучного выщелачивания были выполнены исследовательские работы по выбору геофизических методов для обнаружения протечек гидроизоляционного основания подушки площадки кучного выщелачивания.*
Методы исследования. *Определен метод, пригодный к использованию при поиске и локализации возможных протечек гидроизоляции. В качестве такого метода выбрана георадиолокация с антенным блоком АБ-400. Определена также методика разбраковки аномалий. Возможные протечки выделяются локальными углублениями аномалий высоких амплитуд. Разбраковка аномалий надмембранных и подмембранных скоплений жидкости производится по разрезам диэлектрической проницаемости, на которых протечки под мембрану выделяются как интервалы относительного понижения диэлектрической проницаемости пород.*
Результаты исследований. *Показано, что для обеспечения высокой вероятности обнаружения протечек необходима густая сеть георадиолокационных профилей – минимум с шагом 5 м между профилями.*
Выводы. *Установлено, что разрешающей способности метода электротомографии недостаточно для выделения тонких особенностей верхней части разреза. Георадиолокационные исследования, выполненные с антенным блоком АБДЛ «Тритон», показали неэффективность этого вида антенных блоков при решении поставленных задач.*

Ключевые слова: *кучное выщелачивание; гидроизоляция; геомембрана; геофизические методы; георадиолокация.*

Введение. Минерально-сырьевая база России за последнее десятилетие существенно сократилась. Новые экономические требования к качеству минерального сырья и экологическому обеспечению безопасности освоения месторождений резко сузили перечень рентабельных для отработки объектов. В этих условиях принципиальное значение имеет создание и освоение таких технологий эффективной добычи полезных ископаемых, которые обеспечивают при более низких расходах, по сравнению с традиционными методами, увеличение объемов получаемой продукции [1].

Несомненно, что к таким технологиям относится кучное выщелачивание (КВ) золота, серебра, меди, урана и других металлов не только из первичных руд, но и из техногенных отходов горных производств (старых отвалов и хвостохрани-

лищ), содержащих эти металлы [1]. Интерес к КВ объясняется тем, что эта технология обладает рядом достоинств, является предпочтительной по отношению к традиционным технологиям. Малооперационность технологических процессов технологии КВ обусловливает существенное снижение как капитальных, так и эксплуатационных затрат. Наряду с достоинствами технологии существует и ряд недостатков, одним из основных является использование в растворителе цианида (как правило, в виде цианистого натрия, калия или кальция), который наряду с высокой эффективностью и избирательностью является высокотоксичным веществом, при применении которого требуются строгое соблюдение техники безопасности и охраны внешней среды, создание непроницаемых оснований площадок КВ, учет выпадения осадков и возможности разрушения штабеля и т. д.

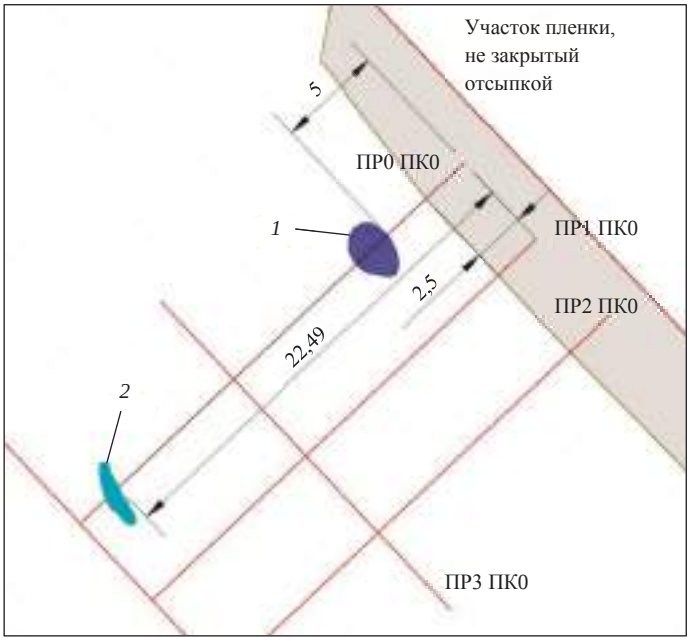

Рис. 1. Ситуационный план исследовательских работ на площадке кучного выщелачивания, профили ПР1–ПР2:
1 – локальный участок, заполненный водой под геомембраной; *2* – локальный участок, заполненный водой на поверхности геомембраны
Fig. 1. Research site-plan at the heap leaching pad, profiles PR1–PR2:
1 – local site, filled with water under the geomembrane; *2* – local site, filled with water at the geomembrane's surface

Основное требование к площадке – она должна оставаться непроницаемой в течение всего периода эксплуатации полигона и дополнительного времени, необходимого для «жизни» штабеля на стадии его обезвреживания химическими способами или же за счет естественного разложения оставшегося цианида. Гидроизоляция площадки КВ преследует две цели: предотвратить возможные потери продуктивных растворов при эксплуатации и исключить загрязнение окружающей среды в случае утечки растворителей, в особенности опасных цианидных растворов [2].

Целью данных исследований являлась разработка методики мониторинга состояния гидроизоляции площадки кучного выщелачивания и обеспечения геоэкологической безопасности.

Методика проведения исследований. Для контроля целостности гидроизоляции площадки КВ были выполнены научно-исследовательские работы

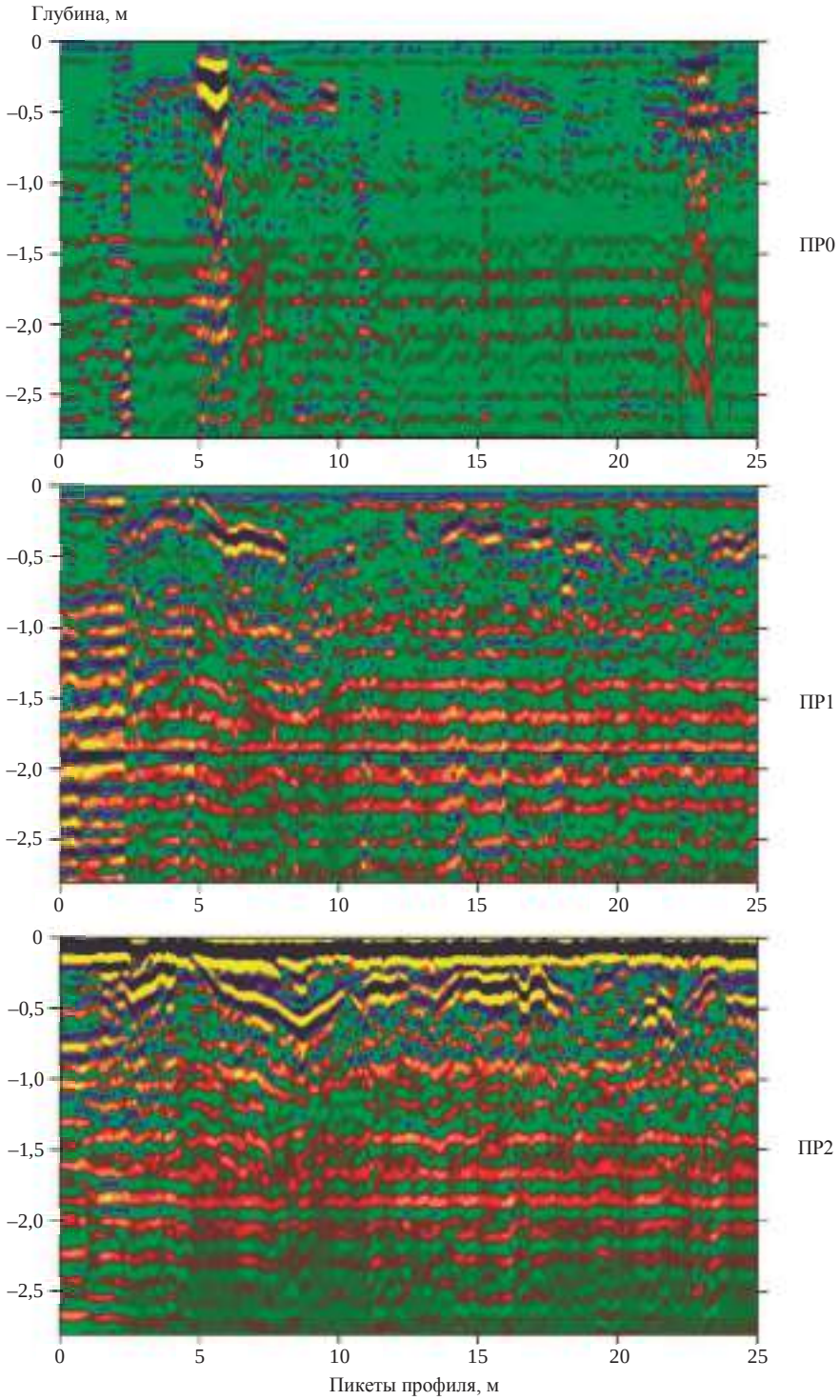

Рис. 2. Исходные радарограммы по профилям ПР0–ПР2
Fig. 2. Initial radargrams on profiles PR0–PR2

по выбору геофизических методов для обнаружения протечек гидроизоляционного основания подушки площадки кучного выщелачивания. Работы проведены в весенний период года на частично готовой к эксплуатации панели площадки КВ.

Основная задача проектируемого комплекса геофизических методов – надежное выявление вероятных протечек гидроизоляционного основания на этапе подготовки площадки к эксплуатации.

Программа работ предусматривала два вида геофизических исследований – электротомографию и георадиолокационное зондирование.

При выполнении научно-исследовательских работ планируемый к производству комплекс был расширен: с целью сравнения результатов были выполнены георадиолокационные исследования с антенным блоком АБДЛ «Тритон».

Георадиолокационное зондирование. Принцип действия аппаратуры подповерхностного радиолокационного зондирования (в общепринятой терминологии – георадара) основан на излучении сверхширокополосных (наносекундных) импульсов метрового и дециметрового диапазона электромагнитных волн и приеме сигналов, отраженных от границ раздела слоев зондируемой среды, имеющих различные электрофизические свойства. Такими границами раздела в исследуемых средах являются, например, контакт между сухими и влагонасыщенными грунтами – уровень грунтовых вод, контакты между породами различного литологического состава, между породой и материалом искусственного сооружения, между мерзлыми и талыми грунтами, между коренными и осадочными породами и т. д. [3, 4].

Как пример возможности выделения насыщенных влагой интервалов приведем данные по зависимости относительной диэлектрической проницаемости среды от влажности для разнозернистых песков: при влажности 0 % диэлектрическая проницаемость песков имеет значение 3,2, при 4 % – 5, при 8 % – 7 и при 16 % – 15 [5, 6]. Таким образом, незначительное изменение влажности вызывает достаточно контрастное изменение диэлектрических свойств песков. Аналогичная ситуация наблюдается со всеми талыми рыхлыми породами.

Георадиолокационное профилирование проведено комплектом аппаратуры «ОКО-2» с антенным блоком АБ-400. Центральная частота блока 400 мГц, глубинность до 5 м, разрешающая способность – до 0,15 м.

Дополнительно к основному виду работ проведены георадиолокационные исследования с антенным блоком АБДЛ «Тритон». Центральная частота блока 50 мГц, глубинность до 18 м, разрешающая способность – 0,5–2,0 м.

Электротомография. Электротомография — это сплошное электрическое зондирование, основанное на применении многоэлектродных электроразведочных кос, подключаемых к аппаратуре, способной коммутировать токовые и измерительные электроды на произвольные выводы косы [7, 8].

Электрическое зондирование проведено электроразведочной станцией «Скала-48». Максимальный разнос установки – 235 м. Этот разнос позволил провести изучение геологического строения участков работ до глубины примерно 43 м.

Конструкция станции «Скала-48» предусматривает контроль качества заземления, исключая таким образом возможность получения ложной информации при некачественном заземлении (*Электроразведочная многоэлектродная аппаратура «Скала-48». URL: http://nemfis.ru/pdf/siber_48_instruction_manual.pdf*).

Целью геофизических исследований стал выбор метода обнаружения протечек гидроизоляционного основания подушки площадки кучного выщелачивания.

Исходя из этого, было принято решение моделировать ситуацию протечки геомембраны. Предполагалось выполнить профилирование при исходных условиях, затем выполнить налив воды под геомембрану и повторно выполнить профилирование. В процессе поиска мест, технологически пригодных для выполнения наливных работ (интервалов, где можно было бы подать воду под мембрану без наруше-

ния целостности самой мембраны), была обнаружена уже готовая модель протечки: под геомембраной найден локальный участок *1*, заполненный водой, предположительно мерзлотного происхождения, диаметром примерно 2 м (рис. 1). Вода была автохтонного происхождения – результат таяния мерзлых пород отсыпки, геомембрана на площади изучения была неповрежденной.

Через обнаруженный на основании подушки заполненный водой участок с четко локализованными краями был задан геофизический профиль 0. Для повышения достоверности полученных результатов параллельно профилю 0 с интервалом 5 м были пройдены профиль 1 и профиль 2, в крест этим профилям – профиль 3 (рис. 1). Следует отметить, что на пикете 22,5 м профиль 0 пересек локальный участок 2, заполненный водой на поверхности геомембраны. Такое стечение обстоятельств оказалось очень удачным – на одном профиле имеется возможность наблюдать эффект от скопления жидкости над геомембраной и под геомембраной, что позволило выработать рекомендации при разбраковке аномалий.

Результаты, анализ и обсуждение. На рис. 2 приведены радарограммы по профилям 0–2. На георадиолокационном разрезе по профилю 0 скопление воды под геомембраной выделяется однозначно областью высоких амплитуд отраженного сигнала на пикете 5 м. Локальный участок воды на поверхности также выделен, но с гораздо более низкой интенсивностью на пикете 22,5 м (рис. 2).

Дальнейшая обработка георадиолокационных данных проведена в программе «Георадар-Эксперт» (*Программа автоматизированной обработки георадиолокационных данных «ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ». URL: http://www.georadar-expert.ru/*), [9], в основу которой положены методы цифровой обработки изображений, изложенные в работе [10], результаты обработки – разрезы диэлектрической проницаемости – представлены на рис. 3. При анализе полученных разрезов сделан вывод о возможности контрастного выделения аномалий протечек жидкости под геомембрану. При этом методика выделения достаточно проста – при невозможности однозначно выделить аномалии протечки по первичным радарограммам, производится анализ разрезов амплитуд отраженных сигналов. На этих разрезах возможные протечки выделяются локальными углублениями аномалий высоких амплитуд. Разбраковка аномалий надмембранных и подмембранных скоплений жидкости производится по разрезам диэлектрической проницаемости, на которых протечки под мембрану выделяются как интервалы относительного понижения диэлектрической проницаемости пород (рис. 3).

Интересны результаты, полученные на профилях 1–3. Несмотря на то что локальный участок скопления воды под мембраной был в непосредственной близости от профилей 1 и 3 (рис. 1–3), каких-либо значимых аномалий на этих профилях не выявлено. На рис. 4 представлены сводные данные по профилю 0, позволяющие сделать вывод о возможности применения георадиолокации при обнаружении протечек геомембраны.

Из анализа ранее приведенных результатов следует: первое, что нужно выделить на георадиолокационном разрезе – геомембраны, которые однозначно выделяются в виде интенсивно отражающей границы на всем протяжении профиля, переувлажненные участки пород основания площадки КВ (протечки воды под мембрану) выделяются как интервалы относительного понижения диэлектрической проницаемости пород. Разрешающая способность антенного блока позволяет выделить слой песчаной отсыпки под щебнем, что также представляется очень важным: существенное уменьшение мощности слоя потребует особого внимания при анализе аномалий в этом интервале.

По результатам исследований методом электротомографии аномальных изменений электрического сопротивления на исследуемых профилях (0–3) не установлено, т. е. разрешающей способности метода не хватило для выделения тонких особенностей верхней части разреза.

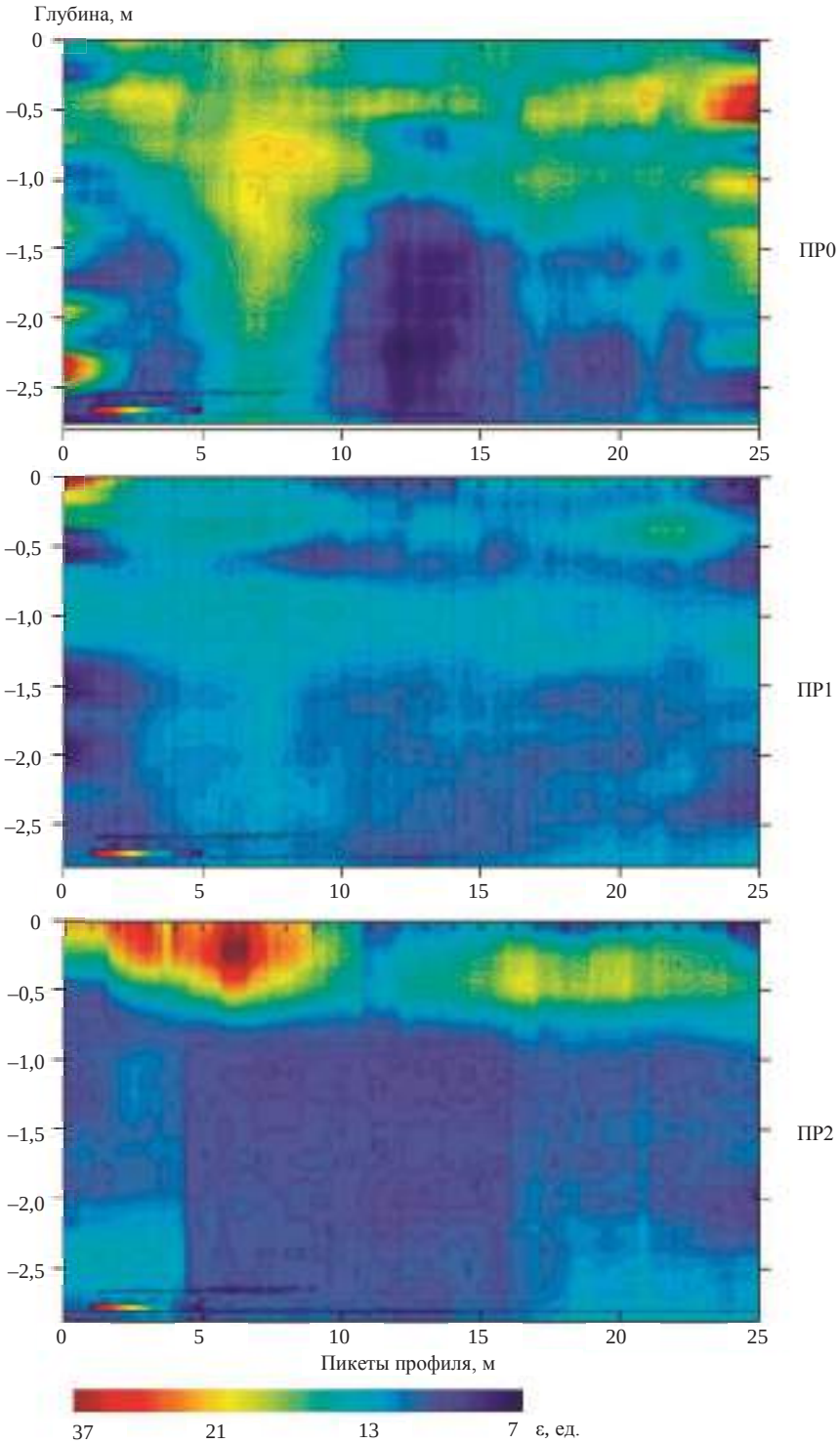

Рис. 3. Разрезы диэлектрической проницаемости по профилям ПР0–ПР2
Fig. 3. Sections of dielectric permittivity on profiles PR0–PR2

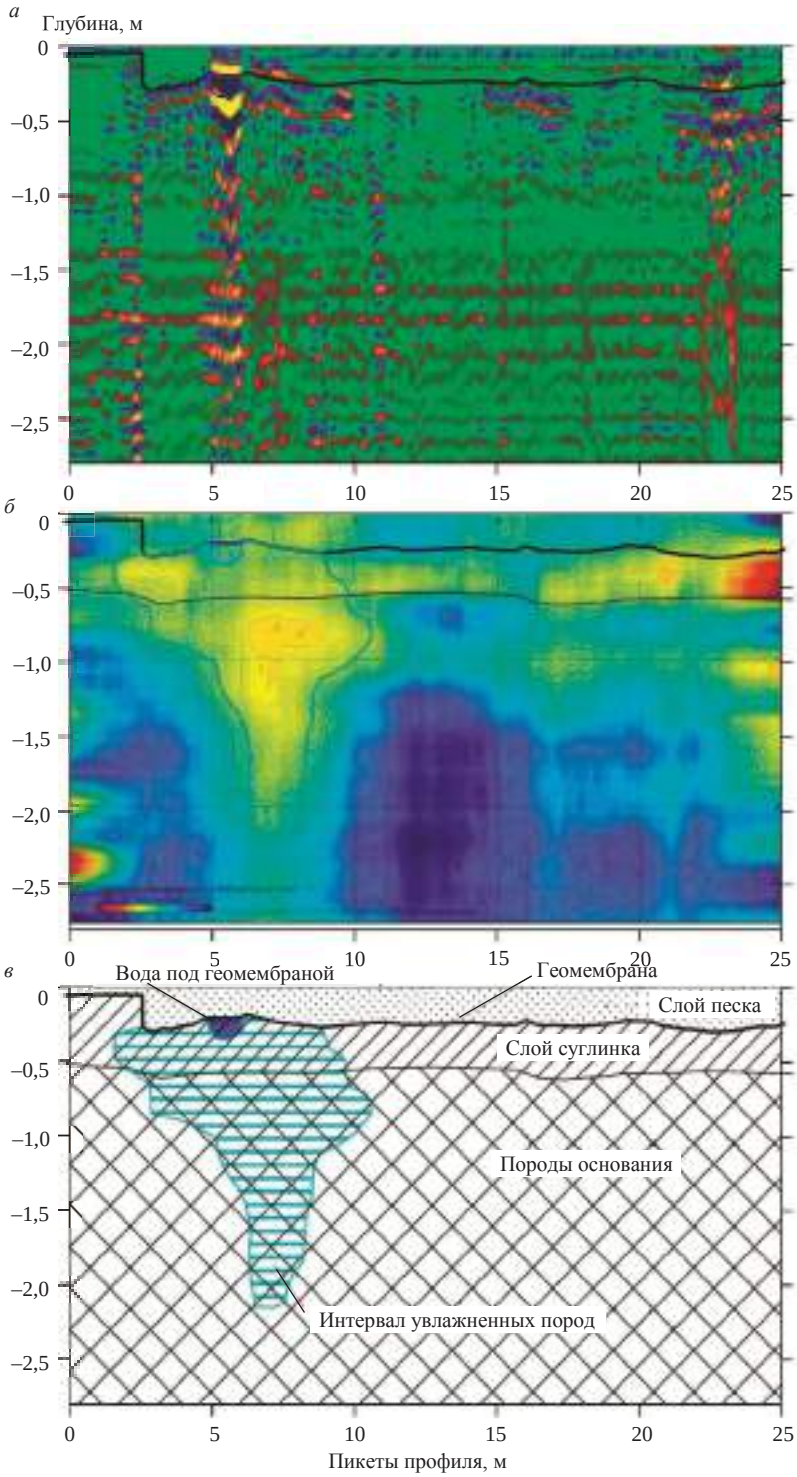

Рис. 4. Результаты интерпретации георадиолокационных данных по профилю 0:
а – исходная радарограмма; *б* – разрез диэлектрической проницаемости; *в* – интерпретационный разрез

Fig. 4. Ground penetrating radar data results on the profile 0:
a – initial radargram; *b* – section of dielectric permittivity; *c* – interpretative section

Георадиолокационные исследования, выполненные с антенным блоком АБДЛ «Тритон», показали неэффективность этого вида антенных блоков при решении поставленных задач.

Выводы. По результатам выполнения исследований определен метод, пригодный к использованию при поиске и локализации возможных протечек гидроизоляционного основания подушки площадки кучного выщелачивания. В качестве такого метода выбрана георадиолокация с антенным блоком АБ-400. Определена также методика разбраковки аномалий. Показано, что для обеспечения высокой вероятности обнаружения протечек необходима густая сеть георадиолокационных профилей, с шагом минимум 5 м между профилями с возможностью детализации в случае необходимости. Попутно отмечена возможность использования антенного блока АБ-400 при тонком расчленении верхней части разреза с учетом того, что геомембрана и лежащая под ней суглинистая подушка являются хорошими отражающими маркерами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кучное выщелачивание благородных металлов / под ред. М. И. Фазлуллина. М.: АГН, 2001. 647 с.
2. Рубцов Ю. И., Рубцова О. П. Экологические аспекты кучного выщелачивания золота цианидным способом // Драгоценные металлы и камни: проблемы добычи и извлечения золота из руд, песков и вторичного сырья. Иркутск, 1997. С. 136–140.
3. Владов М. Л., Старовойтов А. В. Введение в георадиолокацию. М.: МГУ, 2004. 155 с.
4. Mavko G., Mukerji T. & Dvorkin J. The rock physics handbook. Tools for seismic analysis in porous media. Cambridge, New York, Melbourne: Cambridge University Press, 1998. 329 p.
5. Рекомендации по проведению георадиолокационных измерений для решения геологических задач. Раменское: Логические системы, 2008. 28 с.
6. Annan A. P., Davis J. L. Impuls radar sounding in permafrost // Radio Science. 1976. Vol. 11. No. 4. P. 383–394.
7. Бобачев А. А., Модин И. Н., Перваго Е. В., Шевнин В. А. Многоэлектродные электрические зондирования в условиях горизонтально-неоднородных сред // Разведочная геофизика: обзор. М.: Геоинформмарк, 1996. 50 с.
8. Loke M. H., Barker R. D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method // Geophysical Prospecting. 1996. No. 44(1). P. 131–152.
9. Davis J. L., Annan A. P. Ground-penet rating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy // Geophysical Prospecting, 1989. No. 37. P. 531–551.
10. Gonzalez R. C., Woods R. E., Eddins S. L. Digital image processing using Matlab. Pearson-Prentice-Hall, 2004. 122 p.

Поступила в редакцию 2 апреля 2018 года

Сясько А. А., Гриб Н. Н., Имаев В. С., Гриб Г. В. Выбор оптимальной методики геофизического контроля целостности гидроизоляции площадок кучного выщелачивания // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 6. С. 41–49.

Сведения об авторах:

Сясько Андрей Александрович – кандидат технических наук, директор ООО «Нерюнгригеофизика». E-mail: siasko@rambler.ru
Гриб Николай Николаевич – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе, профессор кафедры горного дела Технического института (филиала) Северо-Восточного федерального университета. E-mail: grib@nfygu.ru
Имаев Валерий Сулейманович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник Института земной коры СО РАН. E-mail: imaev@crust.irk
Гриб Галина Владиславовна – кандидат геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией Технического института (филиала) Северо-Восточного федерального университета. E-mail: nss@neru.sakha.ru

SELECTING EFFECTIVE METHODOLOGY OF GEOPHYSICAL CONTROL OVER THE HEAP LEACHING PAD WATERPROOFING INTEGRITY

Sias'ko A. A.[1], Grib N. N.[2], Imaev V. S.[3], Grib G. V.[2]
[1] OOO Neryungrigeofizika, Sakha (Yakutia) Republic, Neryungri, Russia.
[2] Technical Institute (branch) of North-Eastern Federal University, Sakha (Yakutia) Republic, Neryungri, Russia.
[3] Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia.

Aim. The research works have been carried out on selecting of geophysical methods: for monitoring of heap leaching pad waterproofing integrity; and for leak detection of waterproofing base of the heap leach pad.
Research methodology. A method has been identified which is suitable to search and locate possible waterproofing leaks. A ground penetrating radar with an antenna head AB-400 has been chosen as such method. The method for anomalies rejecting has also been determined. Possible leaks are distinguished by local depressions of high amplitude anomalies. Supramembrane and submembrane liquid accumulations anomalies' rejecting is performed along dielectric permeability cross-sections where leaks under the membrane are allocated as intervals of relative decrease of rocks dielectric permeability.
Research results. It is shown that in order to ensure a high probability of leak detection, a dense network of ground penetrating radar lines is necessary at least with a step of 5 meters between the lines.
Conclusions. It has been stated that electron tomography method resolution is not enough to single out delicate peculiarities of an upper part of a section. Ground penetrating radar investigations fulfilled with an antenna head ABDL Triton revealed inefficiency of this type of antenna heads when solving the indicated problems.
Key words: heap leaching; waterproofing; geomembrane; geophysical methods; ground penetrating radar.

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-41-49

REFERENCES

1. *Kuchnoe vyshchelachivanie blagorodnykh metallov / pod red. M. I. Fazlullina* [Precious metals heap leaching. Edited by M. I. Fazlullin]. Moscow, AGN Publ., 2001. 647 p.
2. Rubtsov Iu. I., Rubtsova O. P. [Ecological aspects of gold heap leaching with cyanide method]. *Dragotsennye metally i kamni: problemy dobychi i izvlecheniia zolota iz rud, peskov i vtorichnogo syr'ia* [Precious metals and stones: problems of gold mining and extraction out of ores, sands, and secondary raw material]. Irkutsk, 1997, pp. 136–140.
3. Vladov M. L., Starovoitov A. V. *Vvedenie v georadiolokatsiiu* [Introduction into ground penetrating radar]. Moscow, MSU Publ., 2004. 155 p.
4. Mavko G., Mukerji T. & Dvorkin J. The rock physics handbook. Tools for seismic analysis in porous media. Cambridge, New York, Melbourne, Cambridge University Press, 1998. 329 p.
5. *Rekomendatsii po provedeniiu georadiolokatsionnykh izmerenii dlia resheniia geologicheskikh zadach* [Guidelines on ground penetrating radar measurements to solve geological problems]. Ramenskoe, Logicheskie sistemy Publ., 2008. 28 p.
6. Annan A. P., Davis J. L. Impulse radar sounding in permafrost. *Radio Science*, 1976, vol. 11, no. 4, pp. 383–394.
7. Bobachev A. A., Modin I. N., Pervago E. V., Shevnin V. A. *Mnogoelektrodnye elektricheskie zondirovaniia v usloviiakh gorizontal'no-neodnorodnykh sred* [Multielectrode electrical sounding in the conditions of laterally variable media]. Razvedochnaia geofizika: obzor [Review "Exploration Geophysics"]. Moscow, Geoinformmark Publ., 1996. 50 p.
8. Loke M. H., Barker R. D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 1996, no. 44(1), pp. 131–152.
9. Davis J. L., Annan A. P. Ground-penet rating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 1989, no. 37, pp. 531–551.
10. Gonzalez R. C., Woods R. E., Eddins S. L. Digital image processing using Matlab. Pearson-Prentice-Hall, 2004. 122 p.

Information about authors

Sias'ko Andrei Aleksandrovich – Candidate of Engineering sciences, director of OOO Neryungrigeofizika. E-mail: siasko@rambler.ru
Grib Nikolai Nikolaevich – Doctor of Engineering sciences, Professor, deputy director for Science, professor of the Department of Mining, Technical Institute (branch) of North-Eastern Federal University. E-mail: grib@nfygu.ru
Imaev Valerii Suleimanovich – Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, leading researcher of the Institute of the Earth's Crust, SB RAS. E-mail: imaev@crust.irk
Grib Galina Vladislavovna – Candidate of Geology and Mineralogy, head of the Laboratory of the Technical Institute (branch) of North-Eastern Federal University. E-mail: nss@neru.sakha.ru

УДК 550.832 DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-50-58

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕФТИ МЕЗОЗОЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ АЗЕРБАЙДЖАНА: МЕСТОРОЖДЕНИЯ МУРАДХАНЛЫ

СЕИДОВ В. М.[1]

[1] Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности
(Азербайджан, г. Баку, просп. Азадлыг, 20)

Введение. *В практике геологоразведочных работ редко бывают случаи, когда та или иная проблема не находит своего разрешения в течение долгих десятилетий. Именно так случилось с проблемой нефти мезозойских отложений в Азербайджане, поднятой более 80 лет тому назад. За этот период пробурено более 300 скважин с проходкой 1 млн м, открыто 3–4 небольших месторождения с суммарными запасами по промышленной категории около 20 млн т, опубликованы сотни научных статей, несколько десятков монографий, и почти во всех этих работах проблема нефти больших мезозойских отложений решается положительно. Однако полученные результаты в смысле подготовки запасов углеводородов по промышленной категории оказались ниже ожидаемых, и такое положение должно быть учтено при проведении дальнейших работ. Причина скромных результатов разведочных работ на мезозойских отложениях рядом исследователей объясняется недостаточной обоснованностью некоторых исходных критериев нефтегазоносности, таких как аналогия с соседними регионами, палеогеографическая и геохимическая обстановка нефтегазообразования, тектонические условия и т. д.*

Анализ. *Несмотря на немалый срок изучения мезозойских отложений и открытие нескольких уникальных месторождений с запасами, не превышающими 20 млн т, проблема нефти больших мезозойских отложений в Азербайджане не была решена положительно. Была сделана попытка проанализировать основные причины неудовлетворительных результатов поисково-разведочных работ путем оценки роли отдельных критериев с акцентом на необходимость глубокого анализа накопленного геолого-геофизического материала.*

Результаты. *В соответствии с полученными результатами геофизических и буровых разведочных работ по степени первоочередности и перспективности указаны конкретные зоны. Согласно результатам новых геолого-геофизических исследований обосновано направление дальнейших работ по отдельным районам.*

Ключевые слова: *мезозой; геологоразведочные работы; геологические критерии; отложения; месторождения; геологическая модель; разрез.*

Цель работы – рассмотреть состояние изученности мезозойских отложений в Азербайджане, проанализировать причины недостаточно высокой эффективности геологоразведочных работ по подготовке запасов.

Методика проведения исследований. Проанализированы исходные геологические критерии, их подверждаемость и указаны направления дальнейшей работы. В таблице приводится перечень наиболее существенных критериев, разработанных для изучения нефтегазоносности мезозойских отложений:

– итак, что касается статистики по нефтегазоносности мезозоя, утверждающей, что 40–60 % запасов и добычи нефти в мире связаны с этими отложениями, этот аргумент имеет лишь косвенное отношение к нашему случаю;

– аналогия по нефтегазоносности мезозоя соседних стран, в частности Ближнего Востока и Северного Кавказа, выдвигалась без сравнительного палеотектонического анализа регионов;

– другим важным критерием перспективности мезозойских отложений Азербайджана являлась версия о том, что в сторону юго-востока и юго-запада погружения Большого Кавказа доля флишевых образований в разрезе уменьшается, а карбонатных, наоборот, увеличивается;

– карбонатные отложения мезозоя, в частности верхнего мела, большинством исследователей рассматривались в качестве нефтегазогенерирующих и нефтегазосодержащих толщ;

– по общепринятому мнению, структуры мезозойских отложений по своим размерам и амплитудам намного больше, чем перекрывающие их палеоген-миоценовые образования;

Перечень критериев для изучения нефтегазоносности мезозойских отложений
A list of criteria for the investigation into oil and gas bearing capacity of Mesozoic oil

Исходные критерии	Подтверждаемость критериев	Критерии прямые (+) или косвенные (–)
Статистика мировых запасов и добычи нефти в объеме 40–60 %	В Азербайджане по мезозою меньше 1 %, зато продуктивная толща (ПТ) более 98 %	–
Аналогия по нефтегазоносности с соседними регионами, в частности Северным Кавказом и Ближним Востоком	Не была установлена степень применимости этого критерия в Азербайджане	–
Допущение об увеличении мощности и карбонатности разреза от центра Большого Кавказа к прогибам	В основном по догадкам и наличию обломков карбонатных пород в выбросах грязевых вулканов	+
Положительная оценка нефтегазообразования в мезозое	Результаты лабораторных исследований не подтвердили нефтегазообразование в верхнем меле	+
Наличие трещинных коллекторов в разрезе	Установлены не по всему разрезу, а лишь в определенных частях разреза	+
Наличие в мезозое более крупных складок по сравнению с перекрывающими кайнозойскими	Мезозойские структуры в основном меньше по размерам, чем перекрывающие комплексы, либо они равнозначны	+
Мезозойское направление наравне с Pg-Mio и ПТ	Традиционно в Азербайджане выделялись три главных направления: ПТ, Pg-Mio и мезозой	–
Невскрытие мезозойских отложений во всех заложенных скважинах и – отсюда – недостаточная информативность о них	Из 300 заложенных на мезозой скважин эти отложения вскрыты в 148 скважинах (около 1 км), что дает необходимую информацию по мезозою	–
Слабая информативность геофизических исследований, особенно по внутреннему строению мезозоя	Частично уместное замечание. В разрезе мезозоя есть расслоение, при слабой расслоенности с применением 3D была получена информация на площадях Мурадханлы и Джарлы	–
Оценка роли качественного бурения и опробования скважин	Эти факторы имели место, но они не основные и не определяющие	–
Объективная оценка полученной информации	Почти во всех обоснованиях перспективы мезозоя оценивались более оптимистично, чем фактические данные	+

– результативность и информативность заложенных на мезозой более 300 скважин были бы намного выше, если бы все они были доведены до проектных глубин; с другой стороны, данные по мезозою более чем 150 скважин, доведенных до проектной глубины (7 км), дают минимально необходимую информацию о разрезе, литологии, коллекторских свойствах и нефтегазоносности этого комплекса отложений;

– рядом исследователей, в частности в работе [1], оспаривается мнение о том, что слабая результативность разведочных работ по мезозою связана с невысоким уровнем сейсмических исследований, особенно по изучению его внутреннего строения;

– на площадях со сложными сейсмогеологическими условиями, в частности на юго-западном погружении Мурадханлинского поднятия, ниже сейсмического горизонта *P*, на расстоянии 2–2,5 км от поверхности, сейсмическими наблюдениями 3D получена информация сложного характера, имеющая пока не столько количественную, сколько качественную значимость;

– несмотря на указанные геологические результаты по мезозою, многими исследователями это направление разведки изучается до сих пор как одно из главных в Азербайджане.

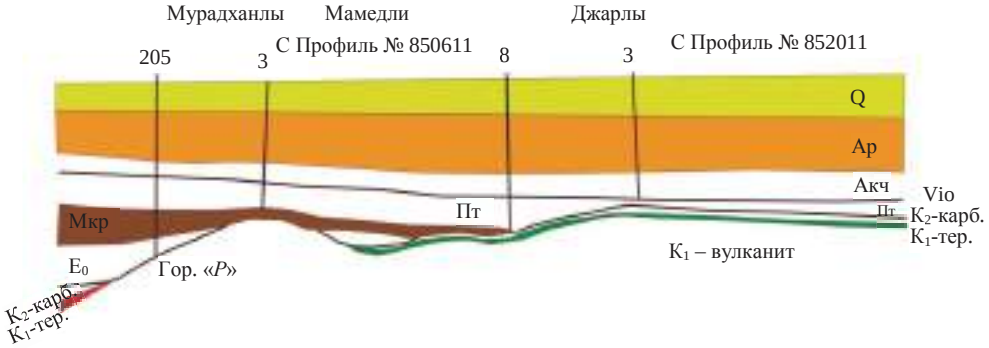

Рис. 1. Временной разрез по площадям Мурадханлы–Джарлы
Fig. 1. Time section along the horizontals of Muradkhanly–Jarly

Результаты. В контексте результативности разведочных работ последних лет необходимо учитывать два аспекта. Во-первых, мезозойские отложения не везде оказались перспективными и высокопродуктивными, и в дальнейших работах по отдельным регионам необходимо исходить из этих реалий. Во-вторых, открытые месторождения по мезозою в целом имеют небольшие размеры и запасы, и в дальнейших исследованиях с учетом геолого-экономических условий необходимо оценить целесообразность разведочного бурения на аналогичных площадях. Для создания оптимальной геологической модели и обоснования объекта и направления поисково-разведочных работ важнейшее значение имеет четкое определение границ перспективно-нефтегазоносных образований. По общепринятому мнению, основанному на комплексе геолого-геофизических исследований, возраст вулканогенных пород ниже сейсмического горизонта *P* на площадях Евлах-Агджабединского прогиба и Саатлы-Геокчайской зоны датируется как верхнемеловой. Такая трактовка исторически обоснована фактом вскрытия вулканогенных пород под фаунистически охарактеризованными карбонатными отложениями верхнего мела, а самое главное – определением абсолютного возраста пород на площади Мурадханлы в интервале 74–76 млн лет (сантон-кампан) и 93–96 млн лет (турон-коньяк) [2–4]. Если добавить к сказанному факт вскрытия вулканитов на площадях Джарлы и Сор-сор под нижнемеловыми терригенами и версию отнесения на площади Саатлы карбонатной толщи в интервале 2830–3500 м к нижнему мелу-верхней юре [5], легко убедиться в неоднозначности или ошибочности применяемых стратификаций в регионе и необходимости пересмотра этой проблемы. Не претендуя на однозначное решение, хотелось бы проанализи-

ровать проблему с позиции геологической интерпретации сейсмических данных и, частично, анализа других геологических факторов.

Как видно из рис. 1, от площади Мурадханлы к Джарлы на уровне сейсмического горизонта *P* и ниже прослеживается единое сейсмо-геологическое тело. Поскольку на площадях Джарлы и Сор-сор горизонт *P* залегает ниже терригенной пачки нижнего мела (скв. 6, 10), следовательно, нижнемеловой возраст вулканитов бесспорен. Если это так, то на площади Мурадханлы возраст горизонта *P* и соответственно залегающих под ней вулканитов также должен приниматься как нижнемеловой [6, 7].

Таким образом, имеющиеся геолого-геофизические данные позволяют определить возраст вулканогенных пород Мурадханлы-Джарлинской зоны и соседних площадей как нижнемеловой (рис. 2). Для окончательного решения этой проблемы требуется проведение дополнительных работ по определению абсолютного возраста этих пород, обязательно по единой методике, с привязкой к геологической ситуации.

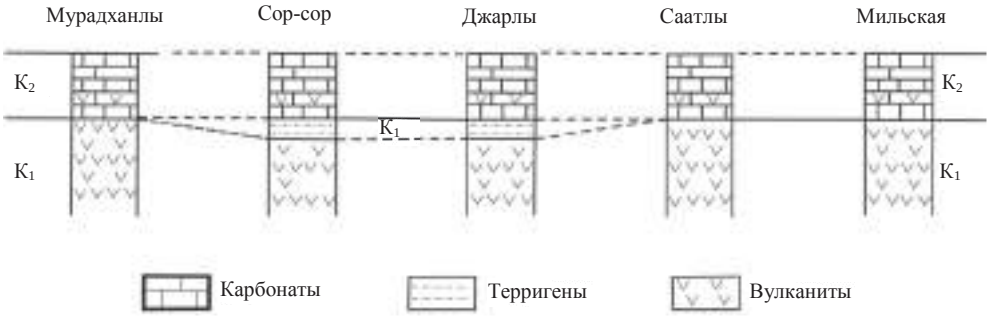

Рис. 2. Схема сопоставления разрезов верхне- и нижнемеловых образований Саатлы-Геокчайской зоны
Fig. 2. Comparison scheme for the sections of the Upper and Lower Cretaceous deposits in Saatly-Goychay zone

В начале верхнего мела (сеноман-туран-сантон-маастрихт по абсолютной геохронологии) площадь Мурадханлинского поднятия была охвачена интенсивными вулканическими проявлениями, приведшими к накоплению здесь эффузивных пород типа андезитов, трахибазальтов и порфиритов. С эпохи палеоцена по нижний миоцен происходит дальнейшее расширение контуров бассейна, в результате чего поверхность эффузивных образований от погружений к своду перекрывается все более молодыми отложениями (рис. 3). Палеоценовые отложения, представленные туфогенными и красно-бурыми глинами, прослеживаются лишь на погружении юго-западного крыла (скв. 23, 17, 8, 21, 19).

Эоценовые отложения по литолого-петрографическому составу разделяют на три отдела: нижний представлен чередованием туфогенных и мергельно-глинистых образований и облекает поверхность эффузивов на юго-западном крыле; средний выражен в терригенно-карбонатной литофации – чередованием криптозернистых известняков, мергелей, глин, песчаников и др. (местное название их – I мергельная пачка); верхний представлен серыми глинами, зеленовато-серыми и глинистыми мергелями. Чокракский горизонт представлен чередованием пластов плотных глин, мергелей, доломитов и песков. Верхнемиоценовые отложения (караган, конк, сармат) выражены серыми и бурыми глинами с прослоями песчаников, алевролитов и – реже – гравелитов. В нижней части разреза залегают пласты мергелей и глинистых мергелей. Понтические отложения на площади отсутствуют.

Отложения продуктивной толщи (ПТ) состоят из чередования серо-бурых глин и песчаников. Нормально осадочными отложениями – глинами, песками и

песчаниками – представлены также верхнеплиоценовые образования (акчагыльский и апшеронский ярусы). Антропогеновые отложения состоят из чередования песков, глин, супесей, а в верхах разреза – из континентальных образований. В строении площади выделяется три структурных этажа: верхнемеловой (первичное поднятие), палеоген-миоценовый (облекающий комплекс) и плиоцен-антропогеновый (не вовлеченный в складчатость).

Анализ и обсуждение. Нефтеносность Мурадханлинского месторождения связана с поверхностью эффузивных пород, эоценовыми и чокракскими отложениями (рис. 4). Залежь эффузивных образований приурочена к присводовой части и северо-западной периклинали поднятия (скв. 5, 10, 3, 43, 56, 58, 19 и др.).

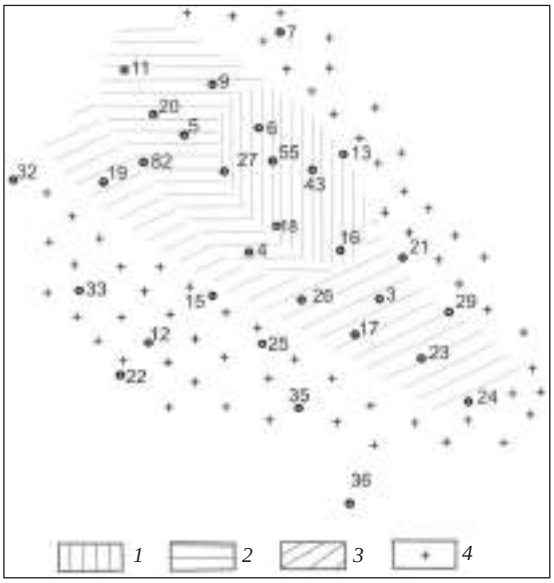

Рис. 3. Палеогеологическая карта перекрытия поверхности эффузивов:
1 – майкопские; *2* – эоценовые; *3* – палеоценовые; *4* – верхнемеловые отложения

Fig. 3. Paleogeologic map of volcanic surface overlapping:
1 – Maikop; *2* – Eocene; *3* – Paleocene; *4* – Upper Cre-taceous deposits

По данным лабораторных исследований, пористость этих пород составляет 10–16 % с практически нулевой проницаемостью. Получение высоких дебитов в скважинах при указанных значениях проницаемости, очевидно, связано с наличием трещинных коллекторов [8, 9]. Получение разных дебитов из скважин указывает на неравномерное развитие трещин по площади. В разрезе эоценовых отложений выявлены две самостоятельные залежи: в I мергельной пачке (скв. 8, 17, 23); в надмергельной пачке (скв. 12, 22, 33). Обе эти пачки вверх по восстанию пластов выклиниваются, обусловливая образование стратиграфических и частично литологических залежей. Ни одна из них пока полностью не оконтурена. Нефтеносные пласты обладают пористостью 14–18 %. Таким образом, площадь Мурадханлы является многопластовым месторождением с пятью выявленными залежами, одна из которых приурочена к эродированной поверхности эффузивных образований, две – к эоценовым и по одной – к майкопским и чокракским отложениями. Говоря о типизации залежей, следует отметить, что залежь эффузивов может относиться к массивно-пластовому, а залежь эоценовых отложений – к стратиграфическому типу. Залежь майкопской свиты является литологически

ограниченной, а залежь чокракского горизонта – пластовой. Основными нефтегазообразующими толщами являются отложения эоцена и майкопской свиты, имеющие широкое развитие в Евлах-Агджабединском прогибе.

Образовавшиеся в этих толщах углеводороды мигрировали вверх по восстанию пластов и насыщали ловушки, одной из которых является Мурадханлинская. Так как отложения эоцена и майкопской свиты в головной части поднятия облекают разрыхленные эффузивные породы, насыщение последних правомерно допустить за счет облекающего палеоген-миоценового комплекса отложений. Как известно, площадь Мурадханлы, в плане совпадающая с одноименным гравитационным максимумом, расположена северо-восточней борта Евлах-Агджабединского прогиба.

В ее строении участвуют мезокайнозойские образования. Причем в «складчатость» вовлечены только верхнемеловые эффузивы и карбонаты, а палеоген-миоценовые образования в виде облекающего комплекса занимают, в основном, погруженные части поднятия. Верхи миоцена и плиоцен-антропогеновые образования залегают почти горизонтально и не участвуют в складчатости. Промышленные притоки нефти получены из разрыхленной части поверхности эффузивов (кора выветривания), из мергельно-песчаной пачки среднего эоцена и из песчаников низов майкопа, а в трех скважинах – из чокракского горизонта (первая модель).

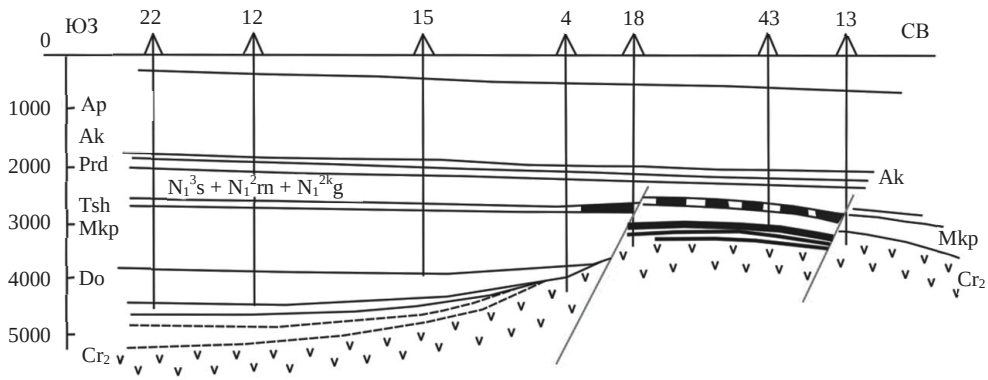

Рис. 4. Геологический профиль
Fig. 4. Geological section

Итак, по второй и наиболее общепринятой модели (рис. 5, *а*) предполагается, что в регионе основными нефтегазогенерирующими комплексами являются палеогеновые (эоцен) и олигоцен-миоценовые (майкоп) образования, насытившие боковой миграцией головные части вулкано-тектонических структур с последующим перераспределением нефти в коллекторах [10–12]. При этом спорадический характер нефтенасыщения эффузивов контролировался неравномерным распределением трещиноватости или зон вторичной пористости.

По третьей модели допускалось, что нефтегазообразующей толщей являются карбонаты верхнего мела (рис. 5, *б*), залегающие под или над «грибком» вулканического ядра. Предполагалось, что нефть мигрировала из нефтематеринских карбонатных отложений верхнего мела в коллекторы «коры выветривания» с последующим перераспределением в ней. Хотя в этой концепции много уязвимых мест (отсутствие сейсмических отражений в толще мезозоя – ниже сейсмического горизонта *P*, отсутствие в призабойной зоне глубокой скв. № 7 карбонатных пород, сравнительно низкое содержание $C_{орг}$, в карбонатах – меньше 0,4 % и др.), она пока все же разделяется определенным кругом специалистов.

Область применения результатов. Разведочные работы на площади будут продолжены с целью дооконтуривания выявленных залежей в эффузивных образованиях верхнего мела, прослеживания нефтеносности терригенно-карбонатных отложений палеоген-миоцена, а также поисков новых залежей в погруженных частях структуры.

Выводы:

– мезозойское направление разведки не должно рассматриваться наряду с плиоценовыми как главное; палеоген-миоценовое и мезозойское направления должны быть отнесены к дополнительному направлению разведки и в дальнейшем нужно руководствоваться именно этим принципом;

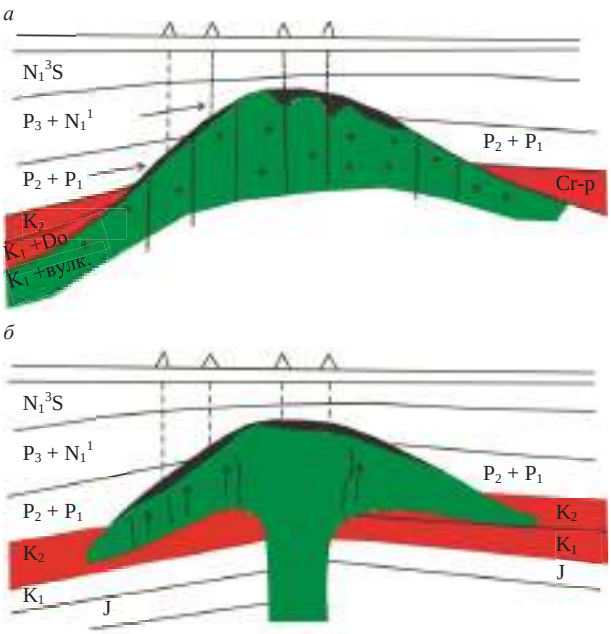

Рис. 5. Месторождение Мурадханлы: модель строения и миграции углеводородов
Fig. 5. Muradkhanly field: hydrocarbon structure and migration model

– в свете новых данных геофизических исследований и бурения необходимо обобщать накопленный материал по мезозою с разработкой новых критериев нефтегазоносности;

– если указанная карбонатная толща действительно имеет нижнемеловой возраст, то остается открытым вопрос, почему на других площадях ее нет;

– открыто перспективное нефтяное месторождение Мурадханлы нового для Азербайджана типа, приуроченное к поверхности эффузивных образований верхнего мела;

– учитывая совпадение на плане контуров нефтеносности по верхнемеловым вулканогенным образованиям и чокракскому горизонту, оценку их нефтегазоносности целесообразно совместить с бурением одного этажа разведки, а прослеживание залежи эоценовых отложении и поиски новых залежей на погружении юго-западного крыла осуществлять другим этажом разведки;

– попутными задачами разведочных и опережающе-эксплуатационных скважин является оценка нефтегазоносности других стратиграфических единиц майкопской свиты, верхнемиоценовых и средне-полиоценовых отложений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алиев А. И. Нижний этаж нефтегазоносности: перспективное направление поисково-разведочных работ в Азербайджане // Известия Азербайджанской национальной академии наук. Науки о земле. 2005. № 2. С. 23–32.

2. Алиев Г.-М. Ф., Алиев А. А., Велиев С. Р. Условия нефтегазообразования в меловых и палеогеновых отложениях Евлах-Агджабединского прогиба // Геолог Азербайджана: научный бюллетень. 2000. № 4. С. 35–44.

3. Мехтиев Ш. Ф., Гасанов А. Г., Гезалов Ф. А., Искендеров Н. А., Гасаналиева Т. Н. Месторождение нефти Мурадханлы // Нефтегазоносность западного Азербайджана: сб. трудов. Баку, 1992. 210 с.

4. Мамедов П. З. О причинах быстрого прогибания земной коры в Южно-Каспийской впадине // Азербайджанское нефтяное хозяйство. 2008. № 1. С. 8–19.

5. Саатлинская сверхглубокая скважина / под ред. В. Е. Хаина, А. А. Амезаде, А. Д. Исмаилзаде. Баку: Нафта-Пресс, 2000. 288 с.

6. Мамедов П. З. Сейсмостратиграфические (возрастные) подразделения осадочного чехла ЮКМВ // Стратиграфия и седиментология нефтегазаносных бассейнов. 2007. № 1. С. 102–118.

7. Рахманов Р. Р. Закономерности формирования и размещения нефти и газа в мезокайнозойских отложениях Евлах-Агджабекинского прогиба. Баку: Такрар, 2007. 191 с.

8. Гасанов А. Б., Сеидов В. М., Меликов Х. Ф. Оценка распределения коллекторов в пространстве по комплексу геофизических и петрофизических данных // НТВ «Каротажник». 2008. Вып. 7(172). С. 50–57.

9. Шилов Г. Я., Худавердиева Л. А. Повышение эффективности изучения известково-мергельных пород методами ГИС на площадях Азербайджана / Определение параметров коллекторов и залежей нефти и газа по материалам ГИС: тез. докл. // НТВ «Каротажник». 1992. № 3. С. 62–65.

10. Кочарли Ш. С. Проблемные вопросы нефтегазовой геологии Азербайджана. Баку: Ганун, 2015. 278 с.

11. Кочарли Ш. С. К природе геологических феноменов Азербайджана // Азербайджанское нефтяное хозяйство. 2001. № 3. С. 1–5.

12. Шихалиев Ю. А., Кочарли Ш. С., Ахмедов А. М. Новые данные о нефтегазоносности Сулейман-Ахтарминской антиклинали // Ggeophysics news in Azerbaijan. 2010. № 4. С. 38–41.

Поступила в редакцию 10 апреля 2018 года

Сеидов В. М. Исследование нефти мезозойских отложений Азербайджана: месторождения Мурадханлы // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 6. С. 50–58.

Сведения об авторах:

Сеидов Вагиф Миргамза оглу – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой геофизики Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности. E-mail: 1961sv@mail.ru

TO THE PROBLEM OF MESOZOIC OIL IN AZERBAIJAN: MURADKHANLA DEPOSITS

Seidov V. M.[1]

[1] Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan.

Introduction. In the practice of geological exploration, there are rarely cases where a particular problem does not find its solution for many decades. This is exactly what happened to the problem of Mesozoic oil in Azerbaijan, raised more than 80 years ago. Over this period, more than 300 wells with a penetration of 1 million m were drilled into the Mesozoic deposits, 3–4 small deposits were opened with total reserves in the industrial category of about 20 million tons. Mesozoic published hundreds of scientific articles, several dozen monographs, and in almost all of these works the problems of large Mesozoic oil are solved positively. However, the results obtained in the sense of preparing hydrocarbon reserves in the industrial category turned out to be lower than expected, and this situation should be taken into account carrying out further work. The reason for the modest results of exploration for the Mesozoic deposits by a number of researchers is due to the insufficient validity of some of the baseline oil and gas criteria, such as the analogy with neighboring regions, the paleogeographical and geochemical conditions of oil and gas formation, tectonic conditions, and etc.

Research methodology. Despite the relatively long period of study of Mesozoic deposits, the discovery of several unique deposits with reserves not exceeding 20 million tons, the problem of large Mesozoic oil in Azerbaijan was not positively solved. An attempt was made to analyze the main causes of unsatisfactory results of exploration for Mesozoic deposits in Azerbaijan by assessing the role of individual criteria with an emphasis on the need for in-depth analysis of the accumulated geological and geophysical material.

Results. In accordance with the results of geophysical and drilling exploration work, specific zones were specified in terms of the priority and prospects. In accordance with the results of new geological and geophysical studies, the direction of further work on individual regions is justified.
Key words: Mesozoic; geological exploration; geological criteria; deposits; deposits; geological model; section.

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-50-58

REFERENCES

1. Aliev A. I. [The lower oil-and-gas bearing layer is a promising direction in geological exploration of Azerbaijan]. *Izvestiia Azerbaidzhanskoi natsional'noi akademii nauk. Nauki o zemle – Proceeding of Azerbaijan National Academy of Sciences. Earth Sciences*, 2005, no. 2, pp. 23–32.
2. Aliev G.-M. F., Aliev A. A., Veliev S. R. [Conditions of oil and gas formations in Cretaceous and Paleogene deposits of Yevlakh-Aghjabadi trough]. *Geolog Azerbaidzhana. Nauchnyi biulleten' – Azerbaijan Geologist. Research Bulletin*, 2000, no. 4, pp. 35–44.
3. Mekhtiev Sh. F., Gasanov A. G., Gezalov F. A., Iskenderov N. A., Gasanalieva T. N. [Muradkhanly oil field]. *Neftegazonosnost' zapadnogo Azerbaidzhana: sb. trudov* [Collected papers "Oil-and-Gas Bearing of the Western Azerbaijan"]. Baku, 1992. 210 p.
4. Mamedov P. Z. [Regarding the reasons for rapid earth's crust warping in the South Caspian depression]. *Azerbaidzhanskoe neftianoe khoziaistvo – Azerbaijan Oil Industry*, 2008, no. 1, pp. 8–19.
5. *Saatlinskaia sverkhglubokaia skvazhina / pod red. V. E. Khaina, A. A. Amezade, A. D. Ismailzade* [Saatly superdeep borehole. Edited by V. E. Khain, A. A. Amezade, A. D. Ismailzade]. Baku, Nafta-Press Publ., 2000. 288 p.
6. Mamedov P. Z. [Seismo-stratigraphic (age-specific) subdivisions of the South Caspian megadepression sedimentary cover]. *Stratigrafiia i sedimentologiia neftegazanosnykh basseinov – Stratigraphy and Sedimentology of Oil-Gas Basins*, 2007, no. 1, pp. 102–118. (In Russ.)
7. Rakhmanov R. R. *Zakonomernosti formirovaniia i razmeshcheniia nefti i gaza v mezokainozoiskikh otlozheniiakh Evlakh-Agdzhabekinskogo progiba* [Regularities of oil and gas formation and placement in Meso-Cenozoic deposits of Yevlakh-Aghjabadi trough]. Baku, Takrar Publ., 2007. 191 p.
8. Gasanov A. B., Seidov V. M., Melikov Kh. F. [Estimation of reservoirs spatial distribution according to the complex of geophysical and petrographic data]. *NTV Karotazhnik – Scientific and Technical Bulletin Well Logger*, 2008, issue 7(172), pp. 50–57. (In Russ.)
9. Shilov G. Ia., Khudaverdieva L. A. [Improving the effectiveness of investigating into limestone-marlstone rocks with GIS methods at the horizontals of Azerbaijan]. *Opredelenie parametrov kollektorov i zalezhei nefti i gaza po materialam GIS: tez. dokl.* [Abstracts "Determining Oil and Gas Reservoirs and Fields Parameters According to GIS Data"]. 1992, no. 3, pp. 62–65. (In Russ.)
10. Kocharli Sh. S. *Problemnye voprosy neftegazovoi geologii Azerbaidzhana* [Problematic issues of oil-and-gas geology of Azerbaijan]. Baku, Ganun Publ., 2015. 278 p.
11. Kocharli Sh. S. [On the nature of Azerbaijan geological phenomena]. *Azerbaidzhanskoe neftianoe khoziaistvo – Azerbaijan Oil Industry*, 2001, no. 3, pp. 1–5.
12. Shikhaliev Iu. A., Kocharli Sh. S., Akhmedov A. M., and others. [New data on the oil-and-gas content of the Suleiman-Akhtarminsk anticline]. *Geophysics News in Azerbaijan*, 2010, no. 4, pp. 38–41.

Information about authors

Seidov Vagif Mirgamza oglu – Doctor of Engineering sciences, Professor, Head of the Department of Geophysics of Azerbaijan State University of Oil and Industry. E-mail: 1961sv@mail.ru

UDC Identifier 622.016.6:622.4:681.5.015 DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-59-68

CONTROLLED OBJECT STRUCTURAL IDENTIFICATION IN THE PRODUCTION UNIT OPTIMAL CONTROL PROBLEM

BABENKO A. G.[1], KOTEGOVA E. V.[1]
[1] The Ural State Mining University
(Kuibysheva Str., 30, Ekaterinburg, the Russian Federation)

Introduction. *The basic way of ensuring high profitability of coal production is mining operations concentration and intensification. Coal bed methane content, progressive mineral production flowsheets, and highly productive longwall mining equipment lead to the increased methane content of stopes, gassings downtimes, and significant economical wastes.*
Research methodology. *The given contradiction can be settled by means of optimal control over the production unit which provides for simultaneous provision of high productivity and aerological safety. With the use of known descriptions of aerological, technological, and geogasdynamic processes the structure of coal production process simulation model is worked out. It is suggested to describe gas mixture motion and methane emission out of various sources in a longwall face in discrete time and space. The analysis is fulfilled of gas sources influence in general airgas flow. The process of forming a fluid flow in a coal bed is examined and the possibility for the detailed description of gas desorption process is assessed.*
Results. *The article analyzes the model forms of gas emission out of a coal bed and out of loose coal, and airgas flow motion in a longwall face; adequate, to the author's opinion, model structures are suggested. The correlation between methane emissions out of various sources and process equipment operating modes is discovered. As a result, sufficient amount of variables is determined and coal production process parametric simulation model is formed to develop the winning machine optimal control system.*

Key words: *stoping area; gas emission; methane; identification; model.*

Aim. High methane-bearing capacity of stopes defined by the methane content of the developed coal beds, progressive coal production flowsheets, and highly productive longwall sets of equipment is a reason for hazardous aerological situations – gassings which lead to winning equipment downtimes and, consequently, to loss of coal producers economic efficiency [1]. Longwall set of equipment optimal control problem reduces to productivity maximization when excluding gassings.

Methodology. Optimal control system synthesis requires structural and parametric identification of coal production process. Fig. 1 reveals the developed generalized model of a production unit as a controlled object. Henceforward, if additional determination is not given: bold type refers to vectors and matrices, normal type refers to scalars; u and S – control and state; Q (m^3/s), C (% volume fraction), M (N·m), p (Pa), v (m/s), J (kg/s), and $\{x, y, z\}$ (m) – consumption of gas mixture (ГС), concentration, moment, pressure, velocity, productivity, and coordinates; P and T (s) – probability density function and time constant; superscripts "З", "CH4" refer to the prescribed value, methane, "П" and "Р" – shearer loader's feed drive and cutting drive; subscripts "ПОСТ" and "ИСХ" – intake flow and outgoing flow, "УП", "ВП", "Л", and "КР" – coal bed, worked out area, longwall face, and roof, "МК", "К", and "ОК" – mechanized support, face conveyor, and shearer loader, "ВУ", "ГОС", and "ДГС" – fan units (and equipment), gas-suction plant, and degassing system, "СОПР" – stoping face resistance against the effect

of a shearer loader, "НП" is a normative threshold. If not specified, all variables are time functions and their full listing in the form of $y(t)$ is reduced to y.

Production unit complete optimal control system (СУ) should possess a transfer operator in the form of $[\mathbf{u}_{ОК}, \mathbf{u}_{УП}, \mathbf{u}_{К}, \mathbf{u}_{ГОС}, \mathbf{u}_{ДГС}, \mathbf{u}_{ВУ}, \mathbf{u}_{МК}] = \mathbf{G}_{СУ}(\mathbf{S}_{ОК}, \mathbf{S}_{УП}, \mathbf{S}_{К}, \mathbf{S}_{ГОС}, \mathbf{S}_{ДГС}, \mathbf{S}_{ВУ}, \mathbf{S}_{МК}, \mathbf{S}_{Л})$, where $\mathbf{G}_{СУ}$ is a transfer operator of СУ. By a state $\mathbf{S}$ is meant a quantity of variables and parameters characterizing the corresponding element of a controlled object or a process and can be controlled by СУ; by a control $\mathbf{u}$ is meant a quantity of controlling impacts on each element of a controlled object. However, since many state variables are difficult for measuring, control over ВУ, ГОС and ДГС is characterized by significant lag [2], МК control is connected with lightly regulated and poorly controlled process of КР destruction, control over gas emission out of УП is based on its properties (degassing) alternation and has long term of realization, and К control is carried out depending on ОК operating parameters, then production unit rational control capabilities are connected with ОК control channels which are characterized by maximum operation speed and high sensitivity. In this case optimal control problem can be formulated as follows:

$$\begin{cases} J_{ОК}(\mathbf{u}_{ОК}) \to \max; \\ P\left(C^{CH4} > C^{CH4}_{НП}\right) \le P^3(h); \\ \mathbf{u}_{ОК} = \mathrm{u}_{ОК}(J^3_{ОК}, \mathbf{S}_{Л}, \mathrm{S}_{ОК}, \mathrm{S}_{К}, \mathrm{S}_{УП}, \mathrm{S}_{ВУ}, P^3(h)), \end{cases} \tag{1}$$

where $P(C^{CH4} > C^{CH4}_{НП})$ – a probability that methane content exceeds НП; P^3 – a given value of an acceptable exceedance probability $C^{CH4} > C^{CH4}_{НП}$ depending on the quantity of gassings h.

In order to develop СУ (1) it is necessary to control, assess, and forecast the content of methane in a longwall face, for this purpose the identification of aerogasdynamic processes in stopes is required.

Analysis and discussion. *Gas balance equation and gas mixture motion.* Fig. 2 introduces a computational scheme and a stoping model. Stoping face is divided into spatial discretes $\Delta L = L_З / n$, where $L_З$ – longwall face (stope) length, m; n – discretes quantity (enumeration in the direction of ГС motion). Since there is a tendency towards the decrease in the width of a face working space, then methane emissions out of enclosing rock $\mathbf{Q}_{ПОР}$ are neglected because of their relatively small share (0.1–0.01% of total gas emission in a longwall face [3]) and the processes of gas emission in $\{x, y\}$ plane are further considered.

In the model, each discrete is considered as a functional block ensuring transfer and mixing of ГС which is formed at its inlet:

$$\mathbf{Q}_{ИСХ,i} = G\left(\mathbf{Q}_{ИСХ,(i-1)} + \mathbf{Q}_{УП,i} + \mathbf{Q}_{К,i} + \mathbf{Q}_{ВП,i}\right), \qquad 1 \le i \le n, \tag{2}$$

where $\mathbf{Q} = [Q^{N2}, Q^{O2}, Q^{CO}, Q^{CO2}, Q^{NO}, Q^{NO2}, \ldots]$; N2, O2, CO, CO2, NO, NO2 – chemical formulae of gases composing ГС; G – transfer operator describing transfer and mixing of ГС. For the first and the last discrete correspondingly:

$$\mathbf{Q}_{ИСХ,(i-1)} = \mathbf{Q}_{ПОСТ}, \qquad i = 1; \tag{3}$$

$$\mathbf{Q}_{ИСХ,n} = \mathbf{Q}_{ГОС} + \mathbf{Q}_{ИСХ}, \qquad i = n, \tag{4}$$

where $\mathbf{Q}_{ГОС} = k_{ГОС}\,\mathbf{Q}_{ИСХ,n}$ and $\mathbf{Q}_{ИСХ} = (1 - k_{ГОС})$; $\mathbf{Q}_{ИСХ,n}$ – consumption of ГС removed by ГОУ, and in the outgoing flow of a stoping area; $k_{ГОС}$ – coefficient modeling the separation of a flow coming out of a longwall face.

Increased stope load leads to the alteration in the weights of separate sources of gas emission into the space of a stope. Then, $\mathbf{Q}_{УП}$ increases up to the value determined by the characteristics of УП itself $Q_{УП}^{max}$, $\mathbf{Q}_{К}$ increases not only in proportion to the output, but also by means of increasing gas content of coal detached from ground, and $\mathbf{Q}_{ВП}$, with proper design and correct ДГС operation, becomes indiscernible. In this connection, under intensive recovery gas balance of the face working space will be made up of three sources: $\mathbf{Q}_{ПОСТ}$, $\mathbf{Q}_{УП}$, and $\mathbf{Q}_{К}$. Great influence on $\mathbf{Q}_{УП}$ and $\mathbf{Q}_{К}$ is made by the displacement velocity of ОК which carries out the recovery: because of change in the amount of removed coal and increase in the area of a desorbing surface through which almost all free sorbed gas comes out, coal degassing is more intense. Thus, gas emission at production unit depends on the parameters of incoming ГС and longwall face advance rate determined by $v_{ОК}^{П}$ ($J_{ОК}$), and on the time which passed from the moment of bed stripping with ОК operating body.

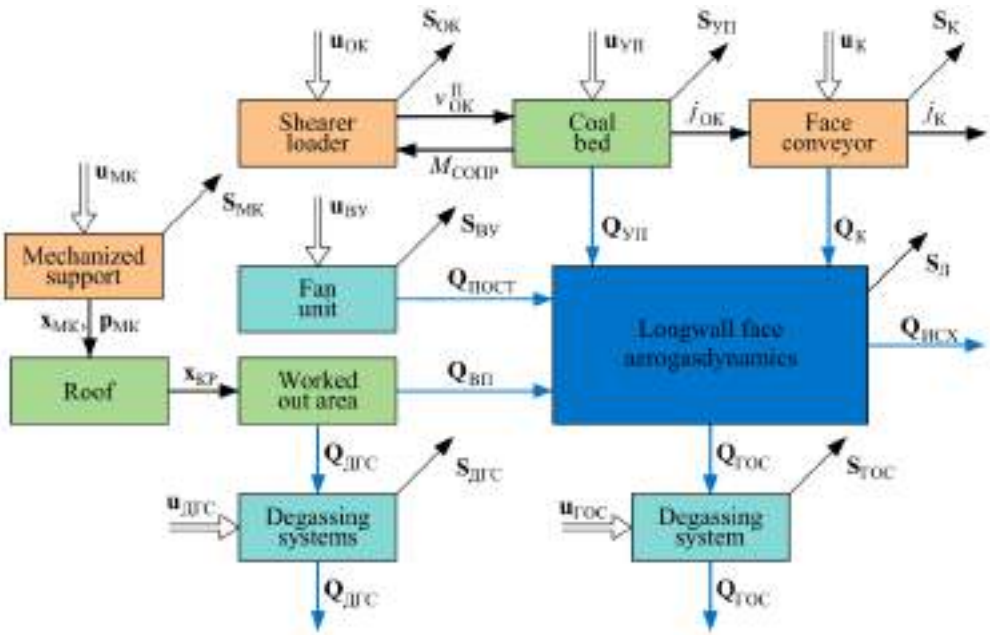

Fig. 1. Generalized structure of a production unit model as a controlled object
Рис. 1. Обобщенная структура модели добычного участка как объекта управления

Operator G in (2) describes aerogasdynamics and is generally realized with mathematical physics equations in partial derivatives of various types [4], however for engineering purposes and in СУ such approach is not applicable. In [5] mathematical description of mine workings and their typical connections in the form of the systems of integro-differential (differential) and algebraic equations is suggested, together with the methods of setting up the equations of gas balance for a group of mine workings, at inputs and outputs of which gas consumption and content is regulated. At that with the account of a range of suppositions for a section of a mine working with the length l, m:

$$Q_{ИСХ,i}(s) = G(s)Q_{ИСХ,(i-1)}(s) = \frac{\exp(-\tau(t)s)}{(T_C s+1)^c} Q_{ИСХ,(i-1)}(s), \quad (5)$$

where T_C – mixing time constant, s; $\tau(t) = l / v(t)$ – time of ГС displacement along the mine working, s; $v(t)$ and $Q(t)$ – ГС velocity and consumption, $v(t) = Q(t) / 60S$;

S – mine working section area, m^2; c = ceil(l / ΔL), ceil – function of mathematical rounding; s – Laplace operator. Similar approach is described in [6].

Coal bed. Coal bed (УП) represents inhomogeneous fractured-porous sorbing media removal of which leads to a range of aerogas and thermophysical processes generation and development within the limits of a mining extracted area [7]: filtration and diffusion gas transfers, interbedding combustion, and coal gasification.

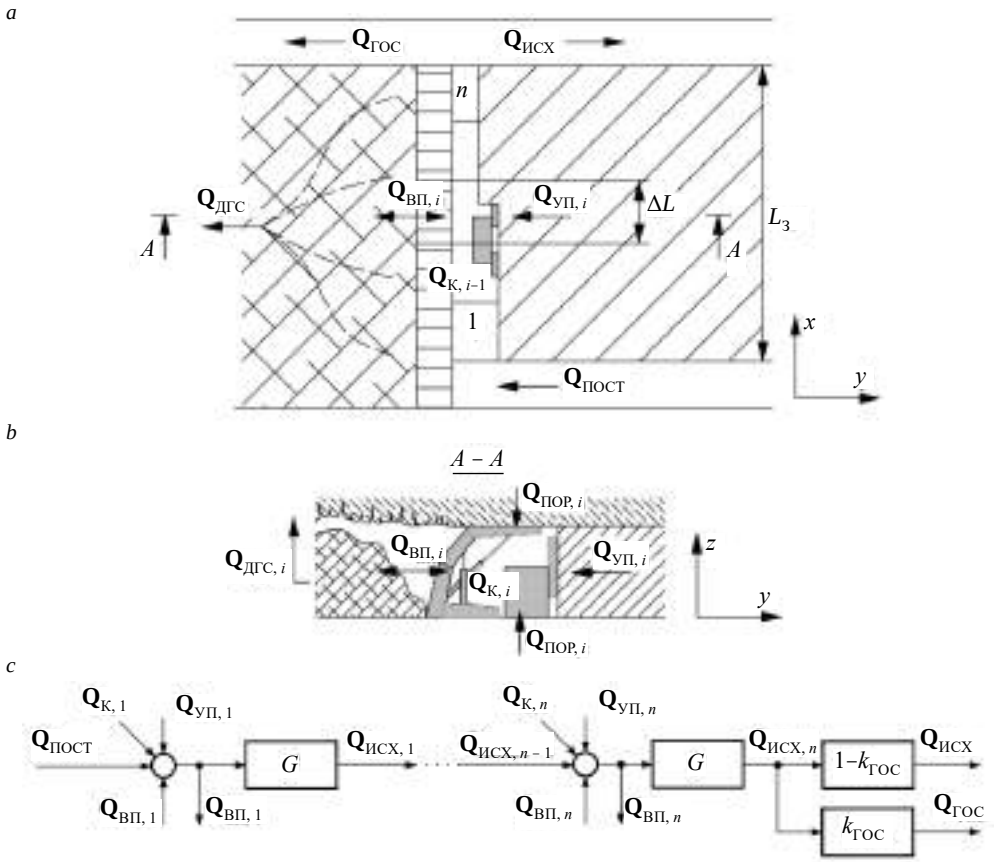

Fig. 2. Longwall face aerogasdynamics model:
a, b – scheme of ГС flows in a stope, *c* – structure of longwall face aerogasdynamics model
Рис. 2. Аэрогазодинамическая модель лавы:
а, б – схема потоков ГС в очистной выработке; *в* – структура аэрогазодинамической модели лавы

Fluid flow, with regard to in the impact of stoping processes on the massif, is closely interconnected with the stresses in УП. Out of blocks which discretize a coal massif, methane inflows to the fissures by means of diffusion. Flow of ГС (methane) along the fissures is determined by the value of rock pressure and is described as a filtration process with Darcy's law [8]: $v_{\Phi} = Q_{УП}^{СОР} / S_{\Phi} = k_{ПР}\, \Delta p_{\Gamma}\, (\mu\, \lambda)^{-1}$, where v_{Φ} – ГС filtration linear velocity; $Q_{УП}^{СОР}$ – volume flow rate of sorbed ГС in a gas bearing coal massif; S_{Φ} – filtration block cross section area, m^2; $k_{ПР}$ – coal massif permeability coefficient, m^2; μ – ГС dynamic viscosity, Pa · s; Δp_{Γ} – pressure drop causing filtration through porous medium with the length λ, m. Then for gas volume flow rate $Q_{УП}^{СОР} = S_{\Phi}\, k_{ПР}\, \Delta p_{\Gamma}\, (\mu\, \lambda)^{-1}$. This approach supplemented with the equations of diffusion on the basis of Fick's law seams well grounded and its use in СУ requires comprehensive information on the properties of УП $S_{УП}$ in $\{x, y, z\}$ space. Existing technologies allow determining blocky structure (assess S_{Φ} and λ) and pressure gradients Δp_{Γ} in УП [9] which is necessary but

inadequate to build a model and СУ based on Darcy's law. Because of difficulty determining $k_{ПР}$ and μ in high-speed geodynamic and mining-technological conditions and unavailable data on sorption capacity parameters of the coal block, diffusion coefficient, and other methane motion characteristics which were examined at calculations, the use and the implementation of this model of methane motion in УП and its emission at this stage is impeded but possible if УП isotropy is accepted and average for УП values of $k_{ПР}$ and μ are used at calculations.

Hereafter alternative approach is used which considers only face working part of УП with ОК coverage. Researches in the field of methane emission from the surface of УП consider general regularity between the degree of coal degasation in a massif and increase in velocity $v_{ОК}^{П}$ which totally corresponds to stresses alternation in УП near the face. The highest methane emission intensity is observed at the freshly exposed УП surface near the operating body (t_0, $x_{ОК}^0$) and is defined by coal maximum volume gas content which $Q_{УП,i}^{max}$ (fig. 3, *a*) depends on.

In front of ОК there is the rise of gas emission (*curve 1*) conditioned on the redistribution of stresses in УП in the connection with ОК advance along the face $\tau_i < \tau_{0,i}$; then there is a fall in the intensity of gas emission (*curve 2*) at the freshly exposed surface:

$$Q_{УП,i} = \begin{cases} Q_{УП,i}^{max} \exp\left((\tau_{0,i} - \tau_i)/T_{1,i}\right), & \tau_i < \tau_{0,i}; \\ Q_{УП,i}^{max} \exp\left((\tau_{0,i} - \tau_i)/T_{2,i}\right), & \tau_i > \tau_{0,i}, \quad \tau_i \to \infty, \end{cases} \tag{6}$$

where $T_{1,i}$ and $T_{2,i}$ are УП draining time constants typical for i discrete before and after ОК operating body affects УП, which depend on $p_Г$ and on the coefficient of $k_{A,I}$ coal massif draining; τ_i, $\tau_{0,i}$ are local time and the term the operating body of ОК is in *i* discrete [7], $\tau_{i+1} = \tau_i + \Delta L / v_{ОК}^{П}$. Correlation (6) is verified in [4]. For $Q_{УП,i}^{max}$ it is possible to write $Q_{УП,i}^{max} = J_{ОК}\, k_{УП}\, m\, \rho^{-1}$, where $k_{УП}$ – coefficient of methane transfer from УП surface; *m* and ρ – porosity and density, kg/m^3, of coal in a massif, then the model of gas emission out of УП will be written as:

$$Q_{УП,i} = \begin{cases} J_{ОК} k_{УП} m \rho^{-1} \exp\left((\tau_{0,i} - \tau_i)/T_{1,i}\right), & \tau_i < \tau_{0,i}; \\ J_{ОК} k_{УП} m \rho^{-1} \exp\left((\tau_{0,i} - \tau_i)/T_{2,i}\right), & \tau_i > \tau_{0,i}, \quad \tau_i \to \infty. \end{cases} \tag{7}$$

Fig. 3, *b* displays emission in the neighboring discretes along the face: dotted line refers to physical time, and bold vertical lines refer to methane emission in corresponding discretes for this time point. At that, maximum gas emission $Q_{УП,i} = Q_{УП,i}^{max}$ at the point $\tau_i = \tau_{0,i}$ corresponds to stoping in real time $t = \tau_i + \tau_{0,i}$ in *i* discrete (second from the top graph at fig. 3, *b*).

The given approach allows to determine gas emissions out of the face of stope within the limits of a discrete based on the УП parameters ($k_{УП}$, *m*, ρ, and $T_{1,i}$ and $T_{2,i}$, depending on $p_Г$ and k_A) and the characteristics of ОК operation ($J_{ОК}$, $v_{ОК}^{П}$ and $x_{ОК}$).

Shearer loader. The base of a shearer loader model make up cutting drives and feed drives (fig. 4); their mathematical description creates no problems under sufficient initial information [10]. Interaction between these two drives and УП requires determining the moments of coal resistance against destruction which happen when ОК operating body affects УП and prevent the development of dynamic phenomenon.

One of methods is based on *t* simultaneous solution of the equations $F_{СОПР}^{Р} = 150\, r\, f\, k_{ОТ}$ [11] and $r^2 - 2rR_{ОК}^{Ш} + 2\delta_С (R_{ОК}^{Ш} z \omega_{ОК}^{Р})^2 (4\pi v_{ОК}^{П})^{-2} = 0$ [12], where $F_{СОПР}^{Р}$ – cutting resistance force, N · m; *f* – hardness coefficient according to

Protodyakonov's scale; r – УП cutting depth, m; k_{OT} – coefficient of coal sloughing characterizing УП and enclosing rock, strength, bedding angle, face advance rate, operating body coverage width, and mine working length, kg/s^{-2}; $R_{\text{OK}}^{\text{Ш}}$ – cutting screw radius, m; δ_C – chip thickness, m; z – an average number of cutters in a cutting line.

However, all roots of the last formula are nonnegative rational numbers which prevents from getting unambiguous solution, and because of the smallness of $v_{\text{OK}}^{\text{П}}$ and $\omega_{\text{OK}}^{\text{P}}$ (for example, for OK Eickhoff SL 300 nominal values are: $v_{\text{OK}}^{\text{П}}$ = 0.618 m/s, $\omega_{\text{OK}}^{\text{P}}$ = 0.77 rad/s) the solutions lose their physical significance. Another method [13] takes into account the equality $M_{\text{СОПР}}^{\text{P}} = v_{\text{OK}}^{\text{П}} k_1$ which is expected in many instances in СУ, where k_1 is a parameter characterizing УП capability to resist against destruction, kg · m/s. On the basis of the presented observations transfer operator $W_{\text{УП}}$ (fig. 4) is further described by the equations $M_{\text{СОПР}}^{\text{P}} = v_{\text{OK}}^{\text{П}} k_1 + \omega_{\text{OK}}^{\text{P}} k_2$ and $M_{\text{СОПР}}^{\text{П}} = v_{\text{OK}}^{\text{П}} k_3$ where k_2 – proportionality factor of cutting speed and cutting resistance moment, kg · m^2/s · rad; k_3 – proportionality factor of feeding speed and feeding resistance moment, kg · m/s.

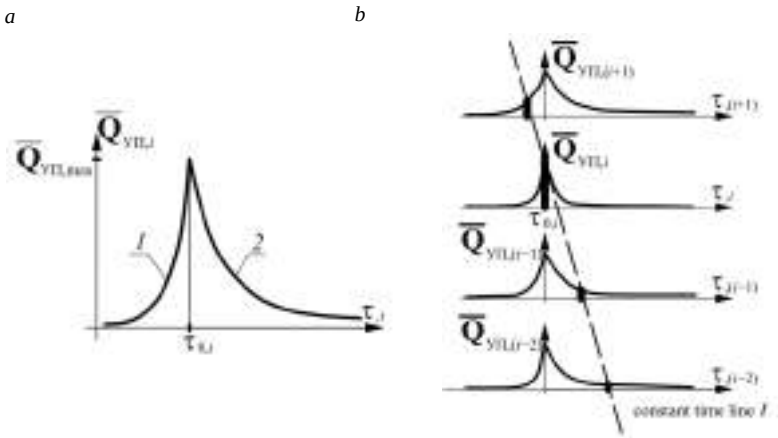

Fig. 3. Gas emission from УП surface:
a – general regularity of methane emission from УП surface; *b* – regularity for the neighboring spatial discretes

Рис. 3. Газовыделение с поверхности УП:
а – общая зависимость выделения метана с поверхности УП; *б* – зависимости для соседних пространственных дискрет

To forecast methane emission in a longwall face it is necessary to control x_{OK} (n_{OK}) – OK position (spatial discrete no.), its velocity $v_{\text{OK}}^{\text{П}}$ and productivity, kg/s,

$$J_{\text{OK}} = rHv_{\text{OK}}^{\text{П}}\rho, \tag{8}$$

where H – thickness (bed depth) of rock layer, m [12].

Loose coal. In the result of УП destruction loose coal is loaded on the conveyor (К), at that, its insignificant part is left at the machine runway if OK free running with cleanup is not provided. Space-time character of external actions is defined by the coal winning technology [14].

At the existing face output, gas emission out of loose coal is 10–30% in gas balance of face working space [7]. With the increase of stoping face advance rate conditioned on $v_{\text{OK}}^{\text{П}}$, the degree of coal degassing in a massif continually declines, i. e. coal transfers into the loosened state with growing gas content w_{K} which leads to the rise of Q_{K}. Specific weight of this source in gas balance increases because of the produced coal volume increase

$$\Delta J_{\text{K},i} = \int_0^{t_{\text{Д}}} S_{\text{K}} v_{\text{K}} v_{\text{OK}}^{\text{П}} \rho\psi\varphi \left(\Delta L\right)^{-1} dt, \tag{9}$$

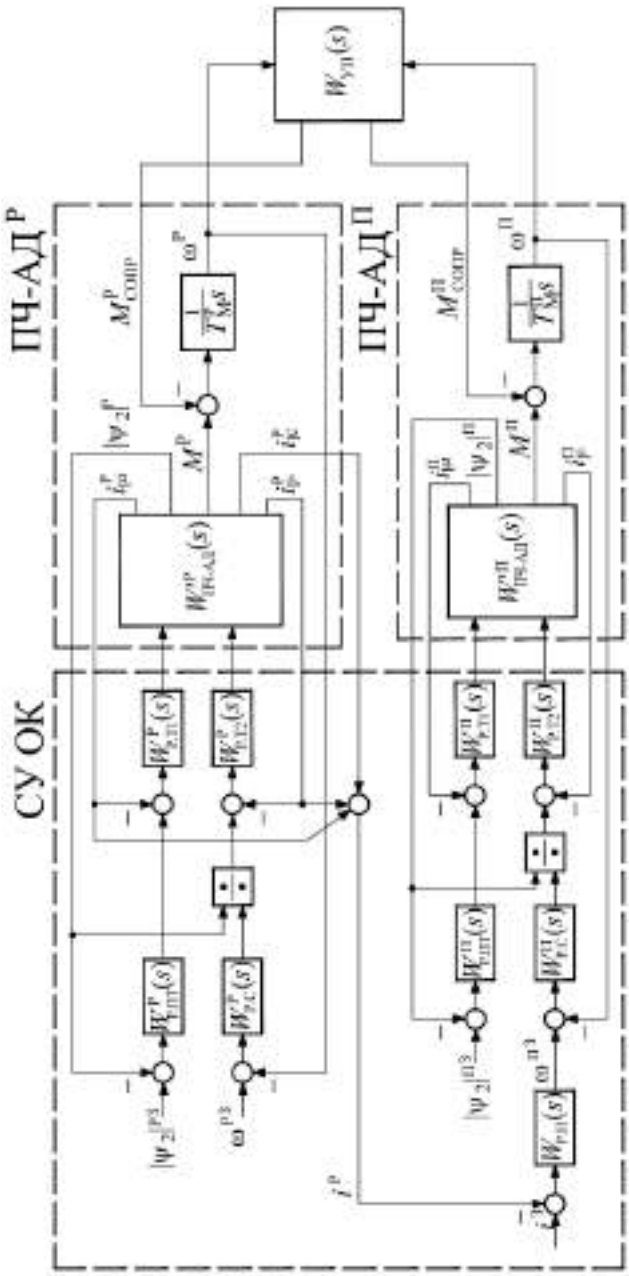

Fig. 4. Structure of a shearer loader model by the example of vector control system:
СУ ОК – shearer loader control system; ПЧ-АД – frequency converter – acynchronous motor; W_{P*} – controller transfer function: ПТ – flow, Т – current, С – speed, Н – load; $W'_{ПЧ-АД}$ – matrix transfer operator of ПЧ-АД electrics without mechanicals characterized by the time constant T_M; $W_{УП}$ – УП transfer operator

Рис. 4. Структура модели очистного комбайна на примере системы векторного управления:
СУ ОК – система управления очистным комбайном; ПЧ-АД – преобразователь частоты – асинхронный двигатель; W_{P*} – передаточная функция регулятора: ПТ – потока, Т – тока, С – скорости, Н – нагрузки; $W'_{ПЧ-АД}$ – матричный передаточный оператор электрической части ПЧ-АД без механической части, характеризующейся постоянной времени T_M; $W_{УП}$ – передаточный оператор УП

where $S_К$ – trough cross section area К, m^2; $v_К = f(v_{ОК}^{П})$ – loose coal conveying speed К, m/s; ψ – trough filling rate; φ – coefficient taking into account inclination angle of К.

Increase in the area of gas discharging surface leads to intensive gas emission out of coal at К. Gas content of loose coal decreases by means of diffusion flows motion inside a coal piece directed towards gas discharging surfaces. According to [7] loose coal desorption process is physically identical to УП degassing. Sorbed in ultra- and micropores gas transfers into loose conditions due to the pressure decline in macropores. Along the latter the desorbed methane comes out towards the surface of coal and enters the atmosphere. The difference is in the number of macropores, their lateral dimensions, and length. Loose coal possesses more macropoes, they are wider and shorter, i. e. their resistance against gas diffusion is much lower than in conditions of a coal massif, so desorption process abruptly intensifies. Consequently, loose coal degassing can be described with the same correlations as a coal massif: $w_К = w^{max} \exp(-t / T_3)$, where w^{max} – coal gas content at the moment of its detaching from the massif, m^3/kg; T_3 – degassing parameter depending on physical-chemical properties of coal.

Researchers of [15] developed the methods of calculating methane inflow out of loose coal in the course of transportation time at on the basis of differential equation of methane mass transfer with the account of coal granulometric composition (methane inflows into the longwall face grow at the increase of the degree of loos coal grinding) and technological parameters of face operation. As coal piece decomposing into spherical particles with typical intensity of gas emission causes difficulties at measuring, methane emission process out of loose coal at К is suggested to be described as follows:

$$Q_К = \begin{cases} k_К m\, r\, \Delta L\, J_К (t\rho)^{-1} \exp((t_0 - t) / T_3), & t > t_0; \\ 0, \quad t < t_0, \end{cases} \tag{10}$$

where $k_К$ – coefficient of methane transfer from the surface of loose coal at К, $1 = k_{УП} + k_К$; t – loosened piece of coal transportation in the longwall face by К, s; t_0 – the moment of loose piece of coal loading on К, s.

Thus, in order to determine gas emission out of loose coal at the conveyor it is necessary to know coal properties ($k_К$, ρ, m, T_3), characteristics and parameters of ОК operation (r, $v_{ОК}^{П}$) and К ($S_К$, ψ, φ) and shearer control law $v_К = f(v_{ОК}^{П})$.

Application area. Formulae (2)–(10) are the basis for the construction of the coal production process simulation model [16] in the problem of a mining machine optimal control system synthesis.

Conclusions. The suggested model of coal production process allows fully considering coal production process and taking it into account with limitations and suppositions, connecting stoping area aerogasdynamics, technological equipment operation, and coal bed behavior.

REFERENCES

1. Coal mine methane country profiles. U.S. Environmental Protection Agency Coalbed Methane Outreach Program. Global Methane Initiative, June 2015. 381 p.

2. Fred N. Kissell, Jerry CJ Tien, and Edward D. Thimons. Methods for controlling explosion risk at coal mine working faces. *Mining Publication*, 2007, September, 9 p.

3. Guidance on coal shafts ventilation design. Moscow, Nedra Publ., 1975. 238 p. (In Russ.)

4. Kachurin N. M., Mokhnachuk I. I., Pozdeev A. A., Stas' G. V. [Mathematical models of aerogasdynamics processes at different mines production faces]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennye nauki – Proceedings of the Tula State University. Natural Sciences*, 2013, no. 1, pp. 267–276. (In Russ.)

5. Babenko A. G. [Detection and localization of fires on early stages with multi-purpose security systems in coal mines]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2014, no. 6, pp. 53–64. (In Russ.)

6. Lapko V. V., Cherednikova O. Iu. [Aerodynamic models of mine ventillation network longwalls with lumped parameters]. *Naukovi pratsi Donets'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universitetu. Informatika, kibernetika ta obchisliuval'na tekhnika – Scientific Papers of Donetsk National Technical University. Informatics, Cybernetics and Computer Science*. 2008, vol. 9 (132), pp. 111–114.

7. Abramov F. A., Gretsinger B. E., Sobolevskii V. V., Shevelev G. A. [Working area aerogasdynamics]. *Biblioteka gornogo inzhenera* [Mining engineer's library]. Vol. 16, book 4. Moscow, Gornoe delo OOO "Kimmeriiskii tsentr" Publ., 2011. 232 p.

8. Basu A., Singh R. N. Comparison of Darsy's law and Fic's law of diffusion to determine the field parameters related to methane gas drainage in coal seams. IMWA Proc. 1994. Int. Mine Water Congress. Nottingham (U. K.). September 1994, pp. 59–70.

9. Pisetskii V. B., Lapin E. S., Patrushev Iu. V., Chevdar' S. M., Zudilin A. E., Vlasov V. V. [Methods and technologies of assessing structure and parameters of rock massif stress-strained state according to seismic data in the processes of mineral deposits exploitation and underground facilities construction]. *Bezopasnost' truda i effektivnost' proizvodstva gornodobyvaiushchikh predpriiatii s podzemnym sposobom razrabotki. Sb. dokl. I Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. 1st Int. Sci.-Tech. Conf. "Workplace safety and industrial effectiveness of mining enterprises with underground mining"]. Ekaterinburg, April 2016, pp. 57–63. (In Russ.)

10. Basharin A. V., Novikov V. A., Soklovskii G. G. U*pravlenie elektroprivodami: ucheb. posobie dlia vuzov* [School book for institutes of higher education "Control of electric drive"]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1982. 392 p.

11. Solod V. I., Zaikov V. I., Pervov K. M. *Gornye mashiny i avtomatizirovannye kompleksy: uchebnik dlia vuzov* [School book for institutes of higher education "Mining machines and automated complexes"]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 503 p.

12. Kislov N. V., Kazachenko G. V., Tsybulenko P. V., Basalai G. A. [Distribution estimation of cut thickness' design values while crushing ore by road headers and shearers]. *Gornaia mekhanika – Mining Mechanical Engineering and Machine Building*, 2013, no. 1, pp. 46–55. (In Russ.)

13. Grinberg Ia. P., Solov'ev V. S., Rudakov V. V. *Sposob avtomaticheskogo regulirovaniia nagruzki privoda rezaniia ugol'nykh kombainov* [Method of automatic load control of coal shearers' cutting drive]. Patent RF, no. 2170820, 2001.

14. Jaroslaw Brodny, Sara Alszer, Jolanta Krystek, and Magdalena Tutak. Availability analysis of selected mining machinery. *Archives of Control Science*, 2017, vol. 27 (LXIII), no. 2, pp. 197–209.

15. Karkashadze G. G., Mazanik E. V., Semykin Iu. A. [Calculation procedure for methane inflow from loose coal in longwall mining]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2014, no. 6, pp. 18–22. (In Russ.)

16. C. Ozgen Karacan, and William P. Handbook for methane control in mining: information circular "Diamond. Forecasting gas emissions for coal mine safety applications". 2009, pp. 113–126.

Received 7th April, 2018

Babenko A. G., Kotegova E. V. Controlled object structural identification in the production unit optimal control problem // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal. 2018. No. 6. Pp. 59–68.

Information about the authors:

Babenko Aleksandr Grigor'evich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation and Computer Technologies. The Ural State Mining University. E-mail: babenkoag@ingortech.ru

Kotegova Ekaterina Vladimirovna – Master's degree student of the Department of Automation and Computer Technologies. The Ural State Mining University. E-mail: kotegova.katena@mail.ru

СТРУКТУРНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ В ЗАДАЧЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДОБЫЧНЫМ УЧАСТКОМ

Бабенко А. Г.[1], Котегова Е. В.[1]

[1] Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия.

Введение. Основным путем обеспечения высокой рентабельности добычи угля является концентрация и интенсификация горных работ. Метаноносность угольного пласта, прогрессивные технологические схемы добычи, высокопроизводительная очистная техника приводят к росту метанообильности очистных выработок, загазированиям, простоям и значительным экономическим потерям.

Методика проведения исследований. Данное противоречие может быть разрешено путем оптимального управления добычным участком, которое предусматривает одновременное обеспечение высокой производительности и аэрологической безопасности. С использованием известных описаний аэрологических, технологических и геогазодинамических процессов разработана структура имитационной модели процесса добычи угля. Движение газовой смеси и выделение метана из раз-

личных источников в лаве предложено описывать в дискретном времени и пространстве. Осуществлен анализ влияния источников газа в общем газовоздушном потоке. Рассмотрен процесс формирования флюидного потока в угольном пласте и оценена возможность детального описания процесса десорбции газов.
Результаты. Проанализированы варианты моделей газовыделения из угольного пласта и из отбитого угля и движения газовоздушной струи в лаве и предложены адекватные, по мнению автора, структуры моделей. Выявлена взаимосвязь выделений метана из различных источников с режимами работы технологического оборудования. В результате определено достаточное количество переменных и сформирована параметрическая имитационная модель процесса добычи угля для разработки системы оптимального управления добычной горной машиной.
Ключевые слова: очистной участок; газовыделение; метан; идентификация; модель.

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-59-68

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Coal mine methane country profiles. U.S. Environmental Protection Agency Coalbed Methane Outreach Program. Global Methane Initiative, June 2015. 381 p.
2. Fred N. Kissell, Jerry CJ Tien, and Edward D.Thimons. Methods for controlling explosion risk at coal mine working faces // Mining Publication. September, 2007. 9 p.
3. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. М.: Недра, 1975. 238 с.
4. Качурин Н. М., Мохначук И. И., Поздеев А. А., Стась Г. В. Математические модели аэрогазодинамических процессов на очистных участках шахт и рудников // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2013. № 1. С. 267–276.
5. Бабенко А. Г. Обнаружение и локализация пожаров на ранних стадиях с помощью многофункциональных систем безопасности угольных шахт // Известия вузов. Горный журнал. 2014. № 6. С. 53–64.
6. Лапко В. В., Чередникова О. Ю. Аэродинамические модели с сосредоточенными параметрами лавы шахтной вентиляционной сети // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. 2008. Вып. 9 (132). С. 111–114.
7. Абрамов Ф. А., Грецингер Б. Е., Соболевский В. В., Шевелев Г. А. Аэрогазодинамика выемочного участка // Библиотека горного инженера. Т. 16. Кн. 4. М.: Горное дело ООО «Киммерийский центр», 2011. 232 с.
8. Basu A., Singh R. N. Comparison of Darsy's law and Fic's law of diffusion to determine the field param-eters related to methane gas drainage in coal seams // IMWA Proceedings 1994. International mine water congress. Nottingham (U. K.). September 1994. P. 59–70.
9. Писецкий В. Б., Лапин Э. С., Патрушев Ю. В., Чевдарь С. М., Зудилин А. Э., Власов В. В. Методы и технологии оценки структуры и параметров напряженно-деформированного состояния горного массива по сейсмическим данным в процессах разработки месторождений полезных ископаемых и строительства подземных сооружений // Безопасность труда и эффективность производства горнодобывающих предприятий с подземным способом разработки. Сб. докл. I Междунар. науч.-техн. конф. Екатеринбург, апрель 2016 г. С. 57–63.
10. Башарин А. В., Новиков В. А., Сокловский Г. Г. Управление электроприводами: учеб. пособие для вузов. Л.: Энергоиздат, 1982. 392 с.
11. Солод В. И., Зайков В. И., Первов К. М. Горные машины и автоматизированные комплексы: учебник для вузов. М.: Недра, 1981. 503 с.
12. Кислов Н. В., Казаченко Г. В., Цыбуленко П. В., Басалай Г. А. Оценка распределения расчетных значений толщин стружки при измельчении руды проходческими и очистными комбайнами // Горная механика. 2013. №1. С. 46–55.
13. Способ автоматического регулирования нагрузки привода резания угольных комбайнов: пат. 2170820 Рос. Федерация. № 99121117/03; заявл. 06.10.1999; опубл. 20.07.2001. Бюл. № 9.
14. Jaroslaw Brodny, Sara Alszer, Jolanta Krystek and Magdalena Tutak. Availability analysis of selected mining machinery // Archives of Control Science. Vol. 27 (LXIII). 2017. № 2. P. 197–209.
15. Каркашадзе Г. Г., Мазаник Е. В., Семыкин Ю. А. Методика расчета притоков метана из отбитого угля в лаве в процессе очистных работ // ГИАБ. 2014. № 6. С. 18–22.
16. C. Ozgen Karacan, and William P. Diamond Forecasting gas emissions for coal mine safety applications // Handbook for methane control in mining: information circular. 2009. P. 113–126.

Сведения об авторах:

Бабенко Александр Григорьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматики и компьютерных технологий Уральского государственного горного университета. E-mail: babenkoag@ingortech.ru
Котегова Екатерина Владимировна – магистрант кафедры автоматики и компьютерных технологий Уральского государственного горного университета. E-mail: kotegova.katena@mail.ru

УДК 622.7.09:620.113 DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-69-76

ПРОЯВЛЕНИЕ И РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОЙ СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРОБОВАНИЯ НА ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИКАХ

КОЗИН В. З.[1], КОМЛЕВ А. С.[1], ВОДОВОЗОВ К. А.[1]
[1] Уральский государственный горный университет
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30)

Цель работы. *Несмотря на многочисленные проявления при опробовании руд и продуктов обогащения, вероятная систематическая погрешность на практике не рассчитывается и не определяется. Ее проявления чаще всего относят к специфическим необъяснимым эффектам опробования либо к погрешностям, которые могут быть устранены при правильном опробовании. Целью работы является изложение вариантов проявления вероятной систематической погрешности и возможностей оценки ее величины.*
Методология исследования. *Существует несколько вариантов проявления и расчета вероятной систематической погрешности: по невязке товарного баланса; по расхождению рассчитанных по технологическому балансу масс ценных компонентов и их фактическому наличию; по распределениям массовой доли результатов опробования; по полям корреляции массовых долей в точках опробования; непосредственным сравнением результатов опробования одной и той же точки принятым на предприятии способом и способом, исключающим вероятную систематическую погрешность.*
Область применения результатов. *Оценки вероятных систематических погрешностей привели к выводу о необходимости перехода при опробовании на обогатительных фабриках к непрерывному отбору проб, что означает отбор точечных проб при использовании способа поперечных сечений через короткие промежутки времени (вплоть до 30 с), либо отбор проб способом продольных сечений.*
Выводы. *Оценки вероятных систематических погрешностей следует включать в расчет допустимых значений невязок товарных балансов и учитывать при анализе результатов расчетов технологических балансов.*

Ключевые слова: *вероятная систематическая погрешность; оценки; непрерывный отбор проб.*

Цель работы. Несмотря на многочисленные проявления при опробовании руд и продуктов обогащения, вероятная систематическая погрешность на практике не рассчитывается и не определяется (*ГОСТ Р ИСО 5725-1,2,3,4,5,6-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений)*. Ее проявления чаще всего относят к специфическим необъяснимым эффектам опробования либо к погрешностям, которые могут быть устранены при правильном опробовании [1, 2].

Целью работы является изложение вариантов проявления вероятной систематической погрешности и возможностей оценки ее величины.

Проявления вероятной систематической погрешности связаны с внутренней природой технологии опробования. При опробовании отбирают точечные пробы, после анализа которых находят среднее значение массовой доли. Так как число точечных проб всегда ограничено и обычно невелико, то в них не попадают редкие пробы, массовая доля которых значительно отличается от среднего значения.

Такая практика приводит к тому, что среднее значение массовой доли в бедных продуктах оказывается заниженным, а в богатых – завышенным на величину вероятной систематической погрешности. Компенсируют это занижение (или завышение) так называемые ураганные пробы, которые обычно рассматриваются как погрешности опробования и исключаются из расчетов. Так вероятная систематическая погрешность превращается в систематическую [3, 4].

Методология проведения исследований. Необычные проявления вероятной систематической погрешности (ВСП) известны давно. Так, еще в 1959 г. И. Н. Шоршер писал: «На Каджаранской фабрике наблюдается факт систематических излишков молибдена при составлении ежемесячного баланса металлов. Аналогичное явление имеет место и на других молибденовых фабриках» [5]. И это не погрешности взвешивания, так как в этом случае «…при составлении баланса должен был бы обнаруживаться избыток и второго металла (меди), чего в действительности никогда не бывает».

Тогда возникновение положительной невязки товарного баланса, обнаруживаемое каждый месяц в течение года, не нашло объяснения. И даже много позже бороться с проявлением вероятной систематической погрешности предлагалось путем использования поправочных коэффициентов [6].

Таблица 1. Товарное и технологическое извлечения и невязка товарного баланса по цинку, %
Table 1. Trade and technological recovery and zinc trade balance inconsistency, %

Месяц	$\varepsilon_{тов}$	$\varepsilon_{тех}$	Невязка Δ	Невязка $\Delta_{ВСП}$
1	75,67	75,92	– 0,25	–
2	83,75	73,67	+10,08	+7,58
3	85,02	75,60	+9,42	+6,92
4	80,68	72,10	+8,58	+6,08

Теоретическое обоснование проявления вероятной систематической погрешности существовало, прямых оценок не было. Постепенно появились прямые и косвенные оценки этой специфической погрешности.

Существует несколько вариантов проявления и расчета вероятной систематической погрешности:

– по невязке товарного баланса;

– по расхождению рассчитанных по технологическому балансу масс ценных компонентов и их фактическому наличию;

– по распределениям массовой доли результатов опробования;

– по полям корреляции массовых долей в точках опробования;

– непосредственным сравнением результатов опробования одной и той же точки принятым на предприятии способом и способом, исключающим вероятную систематическую погрешность.

Оценка по невязке товарного баланса. Фактическую невязку Δ на фабрике можно найти по разности товарного и технологического извлечений:

$$\Delta = \varepsilon_{тов} - \varepsilon_{тех}.$$

На фабрике, обогащающей медно-цинковые руды, получены следующие результаты (табл. 1).

Случайная составляющая невязки равна ±2,5 %. Массовая доля цинка в руде составляет 4 %.

Тогда составляющая невязки за счет вероятной систематической погрешности в среднем за четыре месяца будет +5,1 %. Следовательно, занижение массовой доли в руде за счет вероятной систематической погрешности составит $\Delta\alpha_{ВСП} = -0{,}204$ %.

Отсутствие $\Delta_{ВСП}$ в первый месяц только подтверждает вероятный характер ее возникновения.

Вероятные систематические погрешности опробования хвостов и концентрата влияют на невязку противоположным образом и могут компенсировать друг друга.

Оценка по расхождению расчетов технологического баланса и фактическому наличию продуктов. Массы концентратов до их отгрузки на фабриках обычно определяют не взвешивая, а расчитывая технологический баланс по формуле

$$M_{\beta} = M_{\alpha сух}\gamma_{\beta},$$

где M_{β} – сухая масса концентрата; $M_{\alpha сух}$ – сухая масса руды; γ_{β} – выход концентрата.

Влияние вероятных систематических погрешностей на величину γ_{β} может проявляться по-разному, поскольку расчет будет выполнен так:

$$\gamma_{\beta} = \frac{(\alpha - \Delta\alpha_{ВСП}) - (\vartheta - \Delta\vartheta_{ВСП})}{(\beta + \Delta\beta_{ВСП}) - (\vartheta - \Delta\vartheta_{ВСП})},$$

где ϑ – массовая для металла в хвостах; $\Delta\vartheta_{ВСП}$ – вероятная систематическая погрешность опробования массовой доли металла в хвостах.

В зависимости от величины $\Delta\alpha_{ВСП}$, $\Delta\vartheta_{ВСП}$, $\Delta\beta_{ВСП}$ γ_{β} может быть как завышен, так и занижен. При завышении очевидно преобладает $\Delta\vartheta_{ВСП}$, а при занижении – $\Delta\alpha_{ВСП}$ и $\Delta\beta_{ВСП}$, что в итоге и приведет к различию рассчитанной и фактической массы концентрата [7, 8].

Так как наибольшее влияние на расчет выхода концентрата оказывает вероятная систематическая погрешность определения массовой доли в руде, то на фабриках вероятнее появление излишков металлов. Приведем данные по медно-цинковой фабрике (табл. 2).

Таблица 2. Излишки (+) и недостача (–) металлов за месяц, %

Table 2. Surpluses (+) and shortages (–) of metals in a month, %

Месяц	Медь	Цинк
1	+1,40	+0,0
2	+0,50	+8,5
3	+0,01	+6,6
4	–0,60	+1,1
5	+0,40	+0,0

Оценка вероятных систематических погрешностей по распределениям массовых долей. Величину вероятной систематической погрешности $\Delta\alpha_{ВСП}$ можно найти прямым расчетом по распределению массовой доли, построенному по большому числу анализов точечных проб по формуле

$$\Delta\alpha_{ВСП} = \alpha_{мо} - \overline{\alpha},$$

где $\overline{\alpha}$ – среднее значение массовой доли; $\alpha_{мо}$ – мода.

Можно найти $\Delta\alpha_{ВСП}$ по точечным оценкам распределения:

$$\Delta\alpha_{ВСП} = -\frac{S_{\alpha}^{2}}{N_{т}\overline{\alpha}},$$

где S_{α}^{2} – дисперсия распределения; $N_{т}$ – число точечных проб, используемых для расчета среднего значения принятого контрольного периода.

Приведем распределение (гистограмму) массовой доли и расчет $\Delta\alpha_{ВСП}$ для фабрики, обогащающей золотую руду (рис. 1).

Среднее значение массовой доли $\bar{\alpha}$ = 2,06 г/т; дисперсия S_{α}^{2} = 0,848 (г/т)^2.

В смену отбирается шесть точечных проб, тогда $\Delta\alpha_{ВСП}$ = –0,07 г/т.

Относительное смещение результата опробования от среднего $\bar{\alpha}$ = 2,06 г/т на величину –0,07 г/т составляет –3,4 %.

Определение вероятной систематической погрешности путем сравнения результатов опробования двух точек технологического процесса по полю корреляции. Массовая доля в хвостах тесно связана с массовой долей в питании. Если построить поле корреляции (рис. 2), то на нем можно выделить теоретическую линию регрессии *1* и доверительные интервалы случайной погрешности *2*. При этом часть точек окажется за пределами доверительных интервалов.

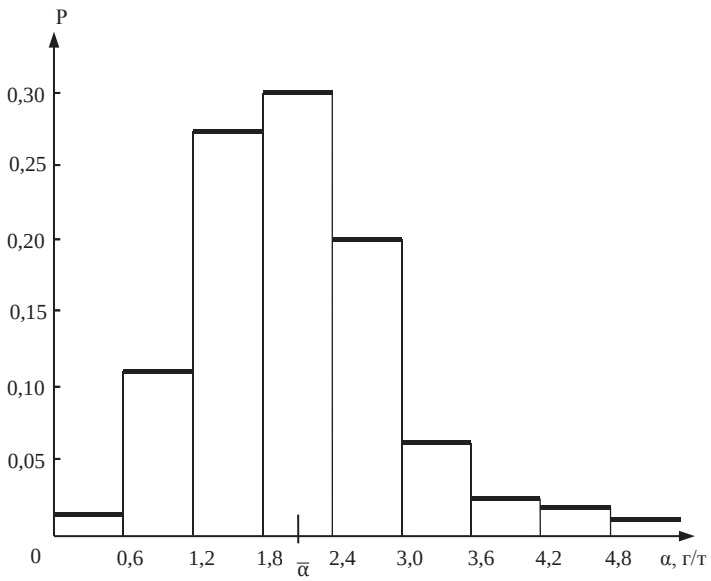

Рис.1. Гистограмма массовой доли золота в руде (298 сменных анализов за пять месяцев)
Fig.1. A histogram of gold mass fraction in ore (298 interchangeable analyses in five months)

Отклонение точек от верхней границы случайной погрешности можно считать минимальной оценкой вероятной систематической погрешности при опробовании руды.

Следует найти среднее значение для *n* выходящих за пределы точек:

$$\Delta\alpha_{ВСП} = \sum \Delta\alpha_{i\,ВСП} \,/\, n.$$

При построении поля корреляции для процесса флотации золотой руды обнаружилось 8,7 % точек, выходящих за верхнюю доверительную границу случайной погрешности, а среднее значение $\Delta\alpha_{ВСП}$ = –0,28 г/т.

Непосредственное определение вероятной систематической погрешности. Если имеется возможность выполнить отбор проб от одного и того же опробуемого массива способом поперечных сечений (небольшое число точечных проб) и способом продольных сечений (большое число точечных проб), то можно непо-

средственно определить $\Delta\alpha_{ВСП}$. Результаты опробования оказываются разными, и отличаются они именно на величину $\Delta\alpha_{ВСП}$:

$$\Delta\alpha_{ВСП} = \overline{\alpha}_{поп} - \overline{\alpha}_{пр},$$

где $\overline{\alpha}_{поп}$ – средняя массовая доля металла, найденная по результатам опробования способом поперечных сечений; $\overline{\alpha}_{пр}$ – то же способом продольных сечений.

Такое опробование было реализовано на одной из медно-цинковых обогатительных фабрик. На одном и том же продукте (хвостах) был выполнен отбор проб как способом поперечных, так и способом продольных сечений. При отборе проб способом поперечных сечений (1300 проб) зафиксировано занижение массовой доли меди в хвостах на 0,025 % и цинка на 0,06 %, что составляет занижение по меди на 8,22 % и по цинку на 8,28 %.

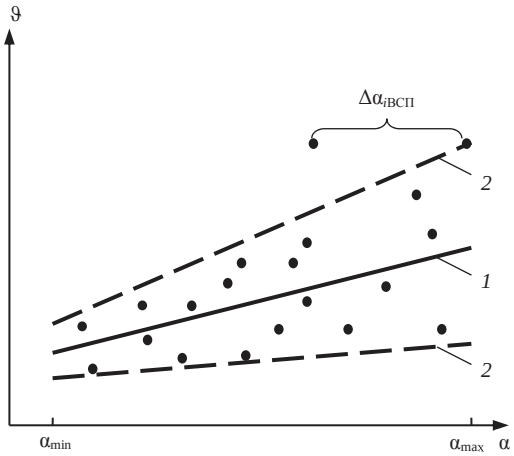

Рис. 2. Связь массовой доли в хвостах с массовой долей в руде
Fig. 2. Connection between mass fraction in tailings and mass fraction in ore

Аналогичная работа выполнена на хвостах золоторудной фабрики. При отборе проб способом поперечных сечений каждый час в течение месяца получено, что средняя массовая доля золота в хвостах равна 0,499 г/т, а при отборе проб способом продольных сечений – 0,527 г/т. Занижение составило 0,028 г/т, или 5,3 %.

Оценка вероятной систематической погрешности возможна при сопоставлении результатов анализа одних и тех же продуктов у поставщика и потребителя. Поставщики – обогатительные фабрики – обычно имеют меньше возможностей качественно отобрать пробы от концентратов, чем потребители – заводы. Тогда, приняв за опорное значение результат опробования у потребителя (завода), можно получить оценку вероятной систематической погрешности у поставщика (обогатительной фабрики).

Такое сопоставление выполнено на поставках медного концентрата по тринадцати партиям из 30 вагонов. Получено, что на фабрике завышают качество концентрата по меди на 0,187 % (1 % отн.) и занижают по золоту на 0,34 г/т (1,5 %), по серебру – на 0,35 г/т (1,4 %).

На этой же фабрике выполнено сопоставление качества концентрата по меди по сменным пробам: на производстве – 19,68 %, при отгрузке – 19,04 %. Завышение на производстве составило 0,64 % (3,4 % отн.).

Сравнение качества цинкового концентрата, полученного опробованием кека вакуум-фильтра (48,05 %) и на отгрузке концентрата (46,18 %), показало, что при опробовании кека массовая доля цинка в концентрате завышается на 1,87 %.

Результаты, анализ и обсуждение. Пять вариантов обнаружения проявления и оценок вероятной систематической погрешности, выполненных на разных обогатительных фабриках, дают основания рассматривать эту погрешность наравне с известными систематическими и случайными погрешностями опробования минерального сырья. Это позволит объективно оценить работу фабрик и при появлении неожиданных результатов, в том числе при появлении ураганных проб либо излишков ценных компонентов, снизить возможности получения брака по качеству концентратов и объяснить возможные разногласия с потребителями концентратов.

Область применения результатов. Оценки вероятных систематических погрешностей привели к выводу о необходимости перехода при опробовании на обогатительных фабриках к непрерывному отбору проб, что означает отбор точечных проб при использовании способа поперечных сечений через короткие промежутки времени (вплоть до 30 с), либо отбор проб способом продольных сечений [9–15].

Оценки вероятных систематических погрешностей следует включать в расчет допустимых значений невязок товарных балансов и учитывать при анализе результатов расчетов технологических балансов.

Выводы. Вероятная систематическая погрешность при опробовании продуктов обогащения может иметь значения, превосходящие случайные погрешности. Возможности определения вероятной систематической погрешности одним из пяти изложенных способов позволяют установить ее влияние и учесть при анализе получаемых результатов опробования и расчетах балансов. Для снижения вероятной систематической погрешности необходим переход к практически непрерывному отбору проб.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Локонов М. В., Петрова М. И., Рейнгардт Е. П. Методика подготовки для анализа проб руды, содержащей интерметаллические соединения платиновых металлов // Обогащение руд. 1971. № 2. С. 44–47.

2. Прокопьева С. В., Ванина А. С., Кавчик Б. К. Проблемы пробоподготовки и анализа проб с различной крупностью золота // Золотодобыча. 2014. № 2. С. 11–14.

3. Козин В. З., Комлев А. С. Ураганные пробы и их учет // Обогащение руд. 2015. № 4. С. 39–43.

4. Козин В. З., Водовозов К. А. Причины положительных невязок товарного баланса на обогатительных фабриках // Обогащение руд. 2013. № 2. С. 27–31.

5. Шоршер И. Н. О балансе молибдена на обогатительных фабриках // Обогащение руд. 1959. № 2. С. 50.

6. Чемезов В. В. Из опыта освоения россыпей // Маркшейдерский вестник. 2008. № 2. С. 34–40.

7. Петров С. В., Бедерова Л. Л., Бороздин А. П. К методике достоверного определения содержания благородных металлов в пробах с крупными выделениями самородных металлов // Обогащение руд. 2015. № 4. С. 44–48.

8. Pitard F. Correct sampling systems and statistical tools for metallurgical prosesses // XXVII International Mineral Processing Congress. Santiago, Chile. 2014. Chap. 15. P. 1.

9. Chunyue Song, Kailin Hu, Ping Li. Modeling and scheduling optimization for bulk ore blending process // Journal of Iron and Steel Research, International. 2012. Vol. 19. Issue 9. P. 20–28.

10. Разработка и применение автоматизированных систем управления процессами обогащения полезных ископаемых / В. В. Морозов [и др.]. М.: Руда и металлы, 2013. 512 с.

11. Kim T.-H., Maruta I., Sugie T. A simple and efficient constrained particle swarm optimization and ist application to engineering design problems // Journal of Mechanical Engineering Science. 2010. Vol. 224. Issue C2. P. 389–400.

12. Adams M. D. Summary of gold plants and processes // Advances in Gold Ore processing. Ser. Developments in Mineral Processing. Vol. 15. P. 994–1013.

13. Морозов В. В., Столяров В. Ф., Коновалов Н. М. Повышение эффективности управления флотацией с использованием поточных анализаторов состава пульпы // Обогащение руд. 2003. № 4. С. 33–36.

14. Морозов В. В., Столяров В. Ф., Дэлгэрбат Л., Ганбаатар З. Управление флотацией медно-молибденовых руд на основе непрерывного рентгенофлуоресцентного анализа // Автоматизация в горном деле, обогащении и металлургии: сб. научн. тр. Чили, Мар-дель-Плата, 2009. С. 1145–1148.
15. Cleary P. W., Robinson G. K. Sampling of cohesive bulk materials by falling stream cutters // Chemical Engineering Science. 2011. Vol. 66. Issue 17. P. 3991–4003.

Поступила в редакцию 10 апреля 2018 года

Козин В. З., Комлев А. С., Водовозов К. А. Проявление и расчет вероятной систематической погрешности результатов опробования на обогатительных фабриках // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 6. С. 69–76.

Сведения об авторах:

Козин Владимир Зиновьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой обогащения полезных ископаемых, декан горно-механического факультета Уральского государственного горного университета. E-mail: gmf.dek@ursmu.ru
Комлев Алексей Сергеевич – кандидат технических наук, инженер кафедры обогащения полезных ископаемых Уральского государственного горного университета. E-mail: magister-43@mail.ru
Водовозов Константин Александрович – ассистент кафедры обогащения полезных ископаемых Уральского государственного горного университета. E-mail: gmf.opi@ursmu.ru

SAMPLING RESULTS PROBABLE SYSTEMATIC INCLINATION MANIFESTATION AND CALCULATION AT CONCENTRATING MILLS

Kozin V. Z.[1], Komlev A. S.[1], Vodovozov K. A.[1]
[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Research aim. Despite multiple manifestations at ores and concentration products sampling, in practice, probable systematic inclination is not calculated and determined. Its manifestations are commonly assigned to incomprehensible sampling effects or inclinations which can be eliminated by correct sampling. Research aim is to state the variants of probable systematic inclination and its value estimability.
Research methodology. There are several variants of probable systematic inclination manifestation and calculation: by inconsistency of trade balance, by divergence of valuable components masses calculated according to the technological balance and their actual presence, by sampling results mass fraction distribution, by mass fractions correlation functions in sampling points, by direct comparison of sampling results of one and the same point with the method adopted at an enterprise or with the method eliminating probable systematic inclination.
Results application area. Assessments of probable systematic inclinations have lead to the conclusion about the necessity of transition to continuous sample collection at concentrating mills, which is point sampling with a method of cross sections through short periods of time (up to 30 sec.) or sampling with a method of longitudinal sections.
Conclusions. Assessments of probability systematic inclinations is to be included in trade balance inconsistency acceptable values calculation and taken into account in technological balance calculation results analysis.
Key words: probable systematic inclination; assessments; continuous sampling.

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-69-76

REFERENCES

1. Lokonov M. V., Petrova M. I., Reingardt E. P. [Methodology of preparing the samples of ore containing platinum metals intermetallic bonds for the analysis]. *Obogashchenie rud – Mineral Processing*, 1971, no. 2, pp. 44–47. (In Russ.)
2. Prokop'eva S. V., Vanina A. S., Kavchik B. K. [Problems of preparing and analyzing samples with various gold grain sizes]. *Zolotodobycha – Gold Mining*, 2014, no. 2, pp. 11–14. (In Russ.)
3. Kozin V. Z., Komlev A. S. [Hurricane samples and their registration]. *Obogashchenie rud – Mineral Processing*, 2015, no. 4, pp. 39–43. (In Russ.)
4. Kozin V. Z., Vodovozov K. A. [Reasons for positive inconsistencies of trade balance at concentration mills]. *Obogashchenie rud – Mineral Processing*, 2013, no. 2, pp. 27–31. (In Russ.)
5. Shorsher I. N. [On molybdenum balance at concentration mills]. *Obogashchenie rud – Mineral Processing*, 1959, no. 2, p. 50. (In Russ.)
6. Chemezov V. V. [Basing on the experience of placer deposits exploitation] *Marksheiderskii vestnik – Mine Surveying Bulletin*, 2008, no. 2, pp. 34–40. (In Russ.)
7. Petrov S. V., Bederova L. L., Borozdin A. P. [Regarding the methodology of reliable determination of noble metals content in the samples with native metals large isolations]. *Obogashchenie rud – Mineral Processing*, 2015, no. 4, pp. 44–48. (In Russ.)
8. Pitard F. Correct sampling systems and statistical tools for metallurgical processes. Proc. 27th Int. Mineral Processing Congress. Santiago, Chile, 2014, chap. 15, p. 1.
9. Chunyue Song, Kailin Hu, Ping Li. Modeling and scheduling optimization for bulk ore blending process. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2012, vol. 19, issue 9, pp. 20–28.

10. Morozov V. V., and others. [Mineral processing automated control systems development and application]. Moscow, Ruda i metally Publ., 2013. 512 p.
11. Kim T.-H., Maruta I., Sugie T. A simple and efficient constrained particle swarm optimization and ist application to engineering design problems. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2010, vol. 224, issue C2, pp. 389–400.
12. Adams M. D. Summary of gold plants and processes. *Advances in Gold Ore processing. Ser. Developments in Mineral Processing*, vol. 15, pp. 994–1013.
13. Morozov V. V., Stoliarov V. F., Konovalov N. M. [Improving the efficiency of flotation control with the use of pulp content continuous analyzers]. *Obogashchenie rud – Mineral Processing*, 2003, no. 4, pp. 33–36. (In Russ.)
14. Morozov V. V., Stoliarov V. F., Delgerbat L., Ganbaatar Z. [Controlling copper-molybdenum ores flotation on the basis of continuous X-ray fluorescence analysis]. *Avtomatizatsiia v gornom dele, obogashchenii i metallurgii: sb. nauchn. tr.* [Collection of studies "Automation in Mining, Processing, and Metallurgy"]. Chili, Mar-del'-Plata, 2009, pp. 1145–1148.
15. Cleary P. W., Robinson G. K. Sampling of cohesive bulk materials by falling stream cutters. *Chemical Engineering Science*, 2011, vol. 66, issue 17, pp. 3991–4003.

Information about authors

Kozin Vladimir Zinov'evich – Doctor of Engineering sciences, Professor, Head of the Department of Mineral Processing, Dean of the Mining Engineering Department, Ural State Mining University. E-mail: gmf.dek@ursmu.ru
Komlev Aleksei Sergeevich – Candidate of Engineering sciences, engineer of the Department of Mineral Processing, Ural State Mining University. E-mail: magister-43@mail.ru
Vodovozov Konstantin Aleksandrovich – assistant lecturer of Department of Mineral Processing, Ural State Mining University. E-mail: gmf.opi@ursmu.ru

УДК 622.7 DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-77-84

СВЯЗЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕНТГЕНОРАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ С КРУПНОСТЬЮ СОРТИРУЕМЫХ КЛАССОВ

ЦЫПИН Е. Ф.[1], ЕФРЕМОВА Т. А.[2], ЕЛИЗАРОВ Д. Б.[3], ОВЧИННИКОВА Т. Ю.[1]

[1] Уральский государственный горный университет
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, д. 30)
[2] АО «Уралмеханобр»
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Хохрякова, 62)
[3] Уральский государственный экономический университет
(Россия, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 62)

Предмет и цель работы. *Метод рентгенорадиометрической сепарации, использующий поверхностные признаки разделения, требует соблюдения определенных технологических приемов подготовки сырья к разделению, в частности выделения из исходного материала сортируемых классов. Различные распределения покускового содержания минеральных фаз, характер минерализации разделяемых кусков, применяемая геометрия измерения рентгеновских характеристик кусков при сепарации, соотношения параметров гранулометрических характеристик материала и элементов измерительной системы влияют на эффективность сепарации при назначении границ сортируемых классов. Целью данной работы является исследование влияния границ сортируемых классов и количества этих классов при различных покусковых распределениях содержаний минеральных фаз в сырье на эффективность разделения.*

Методология. *Для получения общих закономерностей о связях характеристик сырья и требуемых границ сортируемых классов была использована имитационная модель, учитывающая гранулометрический состав, распределение по содержанию минеральных фаз в кусках руды, характеристики идеального сепаратора, позволяющая осуществлять прогноз технологических показателей разделения.*

Результаты и область применения результатов. *Результатами моделирования являются кривые разделения для различных сортируемых классов крупности и плотностей распределения по содержанию минеральных фаз в кусках руды. В случае отнесения реального сырья к какому-либо типу из числа рассмотренных при моделировании могут быть осуществлены прогнозы технологических показателей разделения при различных границах сортируемых классов, выбрано требуемое число сортируемых классов и их границы.*

Выводы. *На эффективность разделения и возможность получения бедных хвостов при различной ширине сортируемых классов влияет характер покускового распределения содержаний минеральных фаз. При разработке схемы (выборе числа и границ сортируемых классов) необходимо учитывать характер покускового распределения содержаний минеральных фаз.*

Ключевые слова: *предварительное обогащение; рентгенорадиометрическая сепарация; число сортируемых классов; имитационная модель; кривые разделения.*

Введение. Предварительное обогащение – один из современных трендов развития обогатительной технологии [1–3]. В предварительном обогащении могут решаться различные технологические задачи, из них наиболее часто решаемой является задача предварительной концентрации, обеспечивающей ряд технологических, экономических и экологических преимуществ благодаря выводу части бедных кусковых хвостов, снижению затрат на транспортировку и глубокое обогащение, снижению платежей при складировании отходов.

Среди используемых методов особое значение имеют информационные методы обогащения [4–8], такие как радиометрические, рентгенорадиометрические, рентгенолюминесцентные, оптические, фотометрические, рентгеноабсорбцион-

ные, нейтронные, радиорезонансные. Наиболее универсальным и востребованным является рентгенорадиометрический (рентгенофлуоресцентный) метод [9–12]. Этот метод имеет ряд преимуществ перед другими информационными методами. Он имеет относительно высокую чувствительность, что позволяет осуществлять разделение при малых содержаниях компонентов. Данный метод применим для крупнокусковых продуктов (до 350–400 мм), позволяет определять содержания нескольких элементов одновременно и поэтому использовать наиболее выгодные алгоритмы сепарации многокомпонентных руд с решением разных технологических задач.

Предварительному обогащению с использованием этого метода подвергают различные виды минерального сырья. Рентгенорадиометрическая сепарация может быть использована для получения концентратов или для предварительной концентрации медных и медно-цинковых руд [13], свинцово-цинковых руд [14], золотосодержащих руд [15], алмазных [16], марганцевых, хромовых, сидеритовых руд [17], урановых руд [18], кварца [19], полевых шпатов [20], бокситов [21], угля [22] и других видов минерального сырья.

Рентгенорадиометрическая сепарация относится к методам, использующим поверхностные признаки разделения. Это требует соблюдения определенных технологических приемов подготовки сырья к разделению, в частности разделения исходного материала на сортируемые классы. Различные распределения покускового содержания минеральных фаз, характер минерализации разделяемых кусков, применяемая геометрия измерения рентгеновских характеристик кусков при сепарации, соотношения параметров гранулометрических характеристик материала и элементов измерительной системы влияют на эффективность сепарации при назначении границ сортируемых классов.

Различные виды минерального сырья отличаются покусковым распределением содержаний компонентов при одинаковых границах сортируемых классов и поэтому могут иметь разные показатели разделения. Однако это обстоятельство не учитывается при разработке схем рудосортировочного комплекса. Целью данной работы является исследование влияния границ сортируемых классов и количества этих классов при различных покусковых распределениях содержаний минеральных фаз в сырье на эффективность разделения.

Методология. Многообразие возможных сочетаний, которые потенциально могут встречаться при обогащении различных видов сырья, из-за отсутствия представительной коллекции проб различных видов минерального сырья не позволяет на основе натурных экспериментальных исследований установить связи между характеристиками сепарируемого сырья и различными границами классов. Такую возможность дает метод имитационного моделирования с заданием самых разнообразных ситуаций и характеристик сырья. Результатом имитационного моделирования может быть получение общих закономерностей о связях характеристик сырья и требуемых границ сортируемых классов. В случае отнесения реального сырья к какому-либо типу из числа рассмотренных при моделировании могут быть осуществлены прогнозы технологических показателей разделения при различных границах сортируемых классов, выбрано требуемое число сортируемых классов и их границы. Такая информация должна использоваться при проектировании схем рудосортировочных комплексов.

Используемая в исследованиях модель построена согласно следующим принципам:

– сырье характеризуется гранулометрической характеристикой, покусковым распределением содержания одной из минеральных фаз α в двухфазной системе с фиксированным содержанием компонента (элемента) в минеральных фазах

(в расчетах принято $\beta_м$ = 0,3 доли ед.), при допущениях о кубической форме всех кусков, постоянстве плотности минеральных фаз и равномерном распределении минеральных фаз по объему и поверхности отдельных кусков;

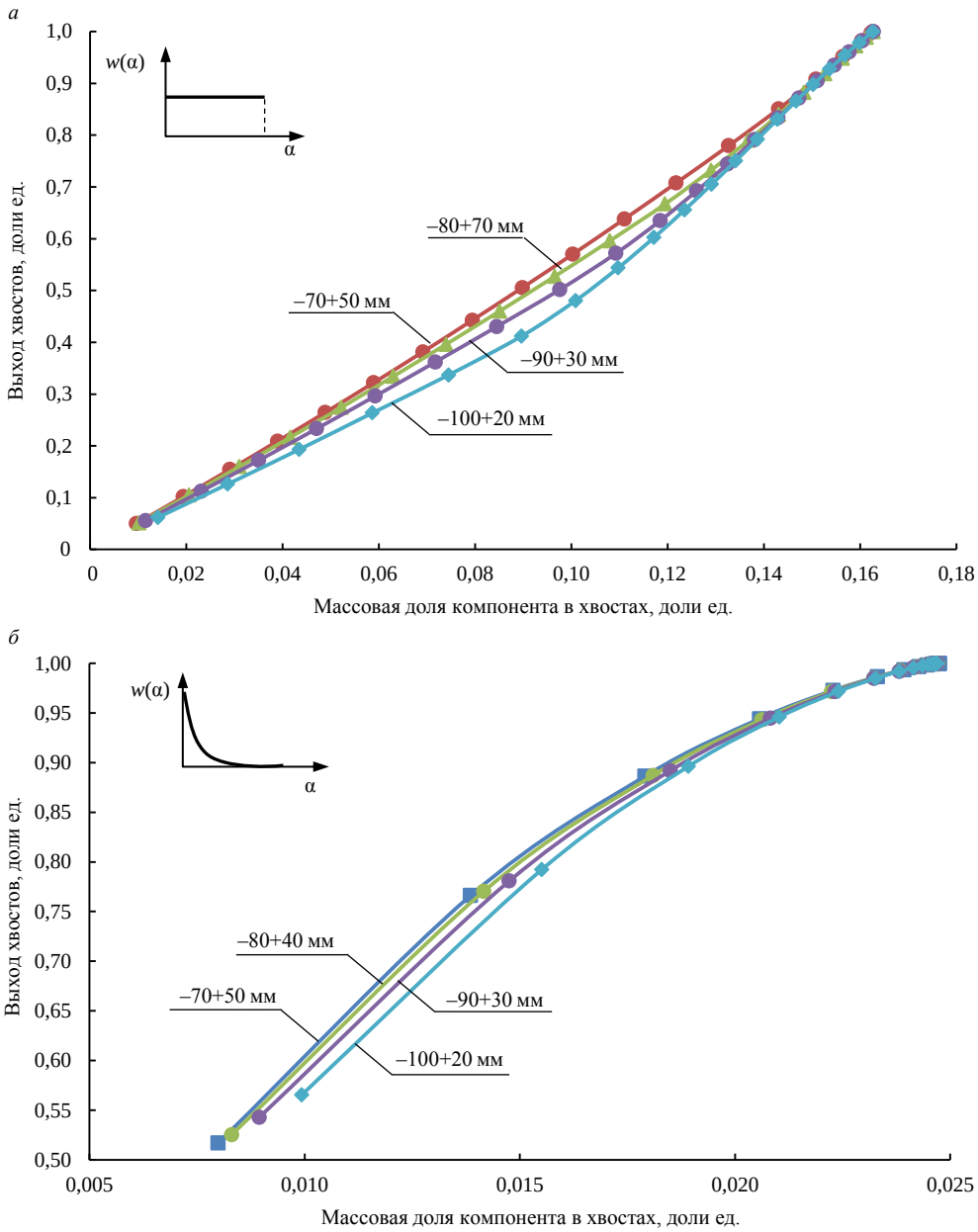

Рис. 1. Полученные при моделировании кривые разделения при разных покусковых распределениях минеральной фазы α и одинаковом среднем размере куска в сортируемом классе ($d_{ср}$ = 60 мм): *а* – равномерное распределение, $\alpha_{ср}$ = 0,5 доли ед.; *б* – правоасимметричное распределение, $\alpha_{ср}$ = 0,074 доли ед.

Fig. 1. Partition curves obtained at modeling under various lump distributions of mineral phase α and uniform average lump sizes in the sorted fraction ($d_{ср}$ = 60 mm): *a* – uniform distribution, $\alpha_{ср}$ = 0.5 unit fraction; *b* – right asymmetrical distribution, $\alpha_{ср}$ = 0.074 unit fraction

– геометрия измерения *рентгеновская трубка–коллиматор–кусок–детектор* с измерением рентгеновского излучения в обратном по отношению к первичному рентгеновскому излучению направлении с задаваемыми шириной и длиной кол-

лиматора, равной при моделировании 75 мм, при допущении прохождения куска на постоянном расстоянии от рентгеновского блока (от коллиматора, детектора);

– зависимости характеристик рентгеновского излучения (характеристических элементов, рассеянного излучения, их спектральных отношений) от соотношения размеров куска и коллиматора для каждой из минеральных фаз заданы на основе теоретического анализа и экспериментальных данных при допущении об аддитивности при различном содержании минеральных фаз в куске;

– имитируется прохождение единичного куска через измерительную систему сепаратора, характеристики куска получают с использованием генераторов случайных чисел для гранулометрической характеристики исходного и покусковых распределений содержаний минеральных фаз (параметры генераторов могут меняться), рассчитываются характеристики частицы (масса, объем, содержание компонента), сравнивается полученное расчетное значение параметра разделения куска с заданным граничным значением, принимается решение об отнесении куска в тот или иной продукт, при этом используется допущение об идеальном выделении куска в нужный продукт;

– осуществляется расчет технологических показателей разделения (выходов, массовых долей) по массам кусков и массам минеральных фаз, перешедших в конечные продукты.

Результаты исследований. На рис. 1 и 2 представлены результаты моделирования с различным покусковым распределением содержания минеральной фазы α.

Результаты разделения четырех сортируемых классов разной ширины с одинаковым значением среднего размера куска ($d_{ср}$ = 60 мм), где содержание минеральной фазы α по кускам распределено по равномерному закону, показаны на рис. 1, *а*.

Рис. 1, *б*; 2, *а* и 2 *б* соответствуют случаям, когда минеральная фаза α по кускам распределена по правоассиметричным законам. На рис. 1, *б* и 2, *а* представлены результаты моделирования разделения в четырех сортируемых классах разной ширины с одинаковым значением среднего размера куска ($d_{ср}$ = 60 мм) при различных видах правоасимметричного распределения минеральной фазы α. На рис. 2, *б* рассмотрено разделение в трех сортируемых классах с разным значением среднего размера куска и одинаковой шириной классов (20 мм).

Обсуждение результатов. При равномерном распределении доли минеральной фазы α увеличение ширины сортируемого класса при постоянном среднем размере куска в нем приводит к уменьшению выхода хвостов при фиксированной заданной массовой доле элемента в хвостах (рис. 1, *а*).

При правоассиметричном покусковом распределении минеральной фазы α (рис. 1, *б*) с $\alpha_{ср}$ = 0,074 доли ед. при сужении ширины сортируемого класса прирост выхода хвостов невелик, при правоассиметричном покусковом распределении со средним содержанием компонента (элемента) $\alpha_{ср}$ = 0,12 доли ед. наблюдается больший прирост выхода хвостов (рис. 2, *а*). При сужении границ сортируемого класса возможно получение хвостов с меньшей массовой долей компонента (элемента).

В случае правоассиметричного покускового распределения доли минеральной фазы α при размере среднего куска намного меньше длины коллиматора ($d_{ср}$ = 30 мм), бедные хвосты получить нельзя, по сравнению с частицами соразмерными с длиной коллиматора ($d_{ср}$ = 60 и 90 мм) (рис. 2, *б*), для которых получение более бедных хвостов возможно.

Таким образом, увеличение ширины класса крупности при любом покусковом распределении содержания минеральной фазы α приводит к уменьшению выхода хвостов при фиксированной заданной массовой доле компонента (элемента)

в хвостах. При правоассиметричном покусковом распределении доли минеральной фазы α в частице, если размер частицы намного меньше длины коллиматора, бедные хвосты получить нельзя, а при размерах кусков, соразмерных с длиной

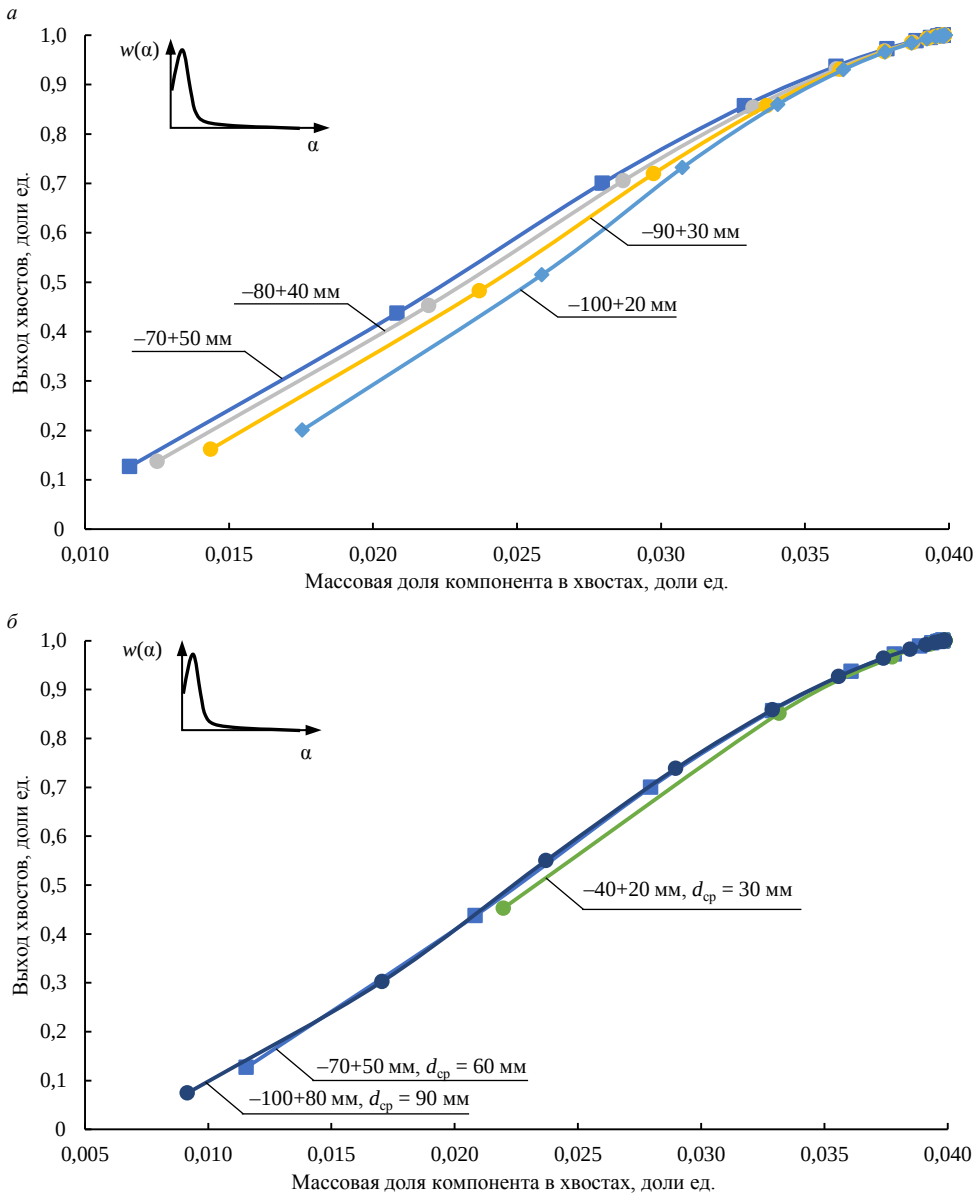

Рис. 2. Полученные при моделировании кривые разделения при одинаковом покусковом распределении минеральной фазы α ($\alpha_{ср}$ = 0,12 доли ед.) и разном среднем размере куска в сортируемом классе: *а* – при разной ширине сортируемых классов и одинаковом среднем размере куска ($d_{ср}$ = 60 мм); *б* – при одинаковой ширине сортируемых классов (20 мм) и разных средних размерах кусков в них

Fig. 2. Partition curves obtained at modeling under uniform lump distributions of mineral phase α ($\alpha_{ср}$ = 0.12 unit fraction) and various average lump sizes in the sorted fraction: *a* – under various width of the sorted fractions and uniform average sizes of lumps ($d_{ср}$ = 60 mm); *b* – under uniform width of the sorted fractions (20 mm) and various average sizes of lumps

коллиматора, могут быть получены более бедные хвосты. При правоассиметричных покусковых распределениях минеральной фазы α при сужении ширины сортируемого класса наблюдается небольшой прирост выхода хвостов, причем это

в большей степени характерно для распределения, показанного на рис. 2, *а*, в сравнении с распределением, приведенным на рис. 1, *б*. При правоассиметричных покусковых распределениях минеральной фазы α при сужении ширины сортируемого класса можно получить хвосты с меньшей массовой долей компонента (элемента) в относительно узком классе крупности.

Выводы. На эффективность разделения и возможность получения бедных хвостов при различной ширине сортируемых классов влияет характер покускового распределения содержаний минеральных фаз. В случае выраженного правоассиметричного распределения для получения бедных хвостов и повышения их выхода необходимо увеличить число сортируемых классов. При равномерном распределении также требуется увеличение числа сортируемых классов для потенциального роста выхода отвальных хвостов. Одной из причин является значимая зависимость сигнала измерительной системы от соотношения длины коллиматора и размера куска. При разработке схемы (выборе числа и границ сортируемых классов) необходимо учитывать характер покускового распределения содержаний минеральных фаз, что следует использовать при проектировании схем рудосортировочных комплексов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Максимов И. И. XXVII Международный конгресс по обогащению полезных ископаемых (часть 1) // Обогащение руд. 2015. № 3. С. 3–11.

2. Максимов И. И. XXVII Международный конгресс по обогащению полезных ископаемых (часть 2) // Обогащение руд. 2015. № 6. С. 50–58.

3. Härkki K. Overcoming sustainability challenges of future concentrator plants // Proc. of XXVII Int. Min. Proc. Congress. Santiago, Chile: Gecamin, 2014. Chap. 1. P. 51.

4. Цыпин Е. Ф., Овчинникова Т. Ю., Ефремова Т. А., Елизаров Д. Б. Кластер информационных методов обогащения полезных ископаемых // ГИАБ. 2017. Спец. вып. № 23. С. 483–492.

5. Knapp H., Neubert K., Wotruba H. Simulation of sensor-based on drill core analysis // Proc. of the XXVII Int. Min. Congress. Santiago, Chile, 2014. Chap. 16. P. 21–30.

6. Kolacz J. Sensor based sorting with signal pattern recognition: The new powerful tool in mineral processing // Proc. of the XXVII Int. Min. Congress. Santiago, Chile, 2014. Chap. 16. P. 106–115.

7. Robben C., Mosser A. X-ray-transmission-based sorting at the Mittersill tungsten mine // Proc. of the XXVII Int. Min. Congress. Santiago, Chile: Gecamin, 2014. Chap. 16. P. 159–168.

8. Кобзев А. С. Направления развития и проблемы радиометрических методов обогащения минерального сырья // Обогащение руд. 2013. № 1. С. 13–17.

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. Федоров М. Ю. Новые технические разработки, обеспечивающие повышение эффективности оборудования и технологий с использованием рентгенофлуоресцентной сепарации // Известия вузов. Горный журнал. 2011. № 8. С. 103–110.

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. Пестов В. В. Методика формирования сепарационного параметра для рентгенофлуоресцентной сепарации руд и техногенных материалов // Горный журнал. 2012. № 2. С. 145–150.

13. Цыпин Е. Ф., Тююшева Н. М., Комлев С. Г., Аржанников Г. И., Беляков В. А., Карбовская А. В. Рентгенорадиометрическая сепарация медно-цинковых руд // Цветные металлы. 1992. № 12. С. 58–61.

14. 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.

15. Санакулов К. С., Руднев С. В. Комплекс рентгенорадиометрического обогащения сульфидных руд месторождения «Кокпатас» // Горный вестник Узбекистана. 2010. № 1(40). С. 3–7.

16. Рахмеев Р. Н., Войлошников Г. И., Федоров Ю. О., Чикин А. Ю. Результаты испытаний рентгенорадиометрического сепаратора для обогащения алмазосодержащих концентратов // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 5. С. 80–88.

17. Цыпин Е. Ф., Шемякин В. С., Скопов С. В., Федоров Ю. О., Пестов В. В., Ентальцев Е. В. Обогащение минерального и техногенного сырья с использованием рентгенорадиометрической сепарации // Сталь. 2009. № 6. С. 75–78.

18. Колесаев В. Б., Корсаков А. К., Святецкий В. С., Литвиненко В. Г., Култышев В. И., Решетников А. А. Подземная разработка урановых месторождений Стрельцовского рудного поля // Горный журнал. 2008. № 8. С. 33–36.

19. 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.
20. Зверев В. В., Литвинцев 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.
21. Шемякин В. С., Макаров Н. М., Чепчугов С. А. Возможности обогащения бокситов СУБРа // Горный журнал. 2004. № 3. С. 35–38.
22. Алушкин И. В., Щипчин В. Б., Корнеев И. Г. Рентген-радиометрическая сепарация от TOMRA Sorting для предварительного обогащения угля // Уголь. 2014. № 5. С. 100–103.

Поступила в редакцию 12 июля 2018 года

Цыпин Е. Ф., Ефремова Т. А., Елизаров Д. Б., Овчинникова Т. Ю. Связь показателей рентгенорадиометрической сепарации с крупностью сортируемых классов // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 6. С. 77–84.

Сведения об авторах:

Цыпин Евгений Федорович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых Уральского государственного горного университета. E-mail: gmf.opi@ursmu.ru
Ефремова Татьяна Александровна – младший научный сотрудник АО «Уралмеханобр». E-mail: efremova_ta@umbr.ru
Елизаров Дмитрий Борисович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры бизнес-информатики Уральского государственного экономического университета. E-mail: elizarovdb@yandex.ru
Овчинникова Татьяна Юрьевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры обогащения полезных ископаемых Уральского государственного горного университета. E-mail: tt2979@yandex.ru

CONNECTION BETWEEN X-RAY RADIOMETRIC SEPARATION INDICATORS AND THE SIZE OF SORTED FRACTIONS

Tsypin E. F.[1], Efremova T. A.[2], Elizarov D. B.[3], Ovchinnikova T. Iu.[1]
[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.
[2] AO Uralmekhanobr, Ekaterinburg, Russia.
[3] Ural State Economical University, Ekaterinburg, Russia.

Research subject and aim. The method of X-ray radiometric separation using surface indicators of separation requires observance of certain processing methods of preparing raw material for separation, especially singling out the sorted fractions out of the initial material. Various distributions of mineral phases lump content, separated lumps mineralization character, the applied geometry of measuring X-ray characteristics of lumps during separation, and correlation between material granulometric characteristics parameters and measuring system elements influence the effectiveness of separation when setting the borders of the sorted fractions. The aim of the research is to investigate into the influencec of the sorted fractions borders and the quantity of these fractions under various distributions of mineral phases lump content in the raw material on the effectiveness of separation.
Methodology. In order to get common regularities in the connections between raw material characteristics and the sorted fractions required borders, simulation model is used which considers granulometric composition, distribution of mineral phases content in ore lumps, the characteristics of an ultimate separator and allowing to forecast separation technological characteristics.
Research results and application area. Partition curves for various sorted grain-size fractions and density of distribution of mineral phases content in ore lumps are the simulation results. If actual raw material is assigned to any type of the list of examined at simulation, the forecasts of separation technological indices under various borders of the sorted fractions can be carried out, and the required number and borders of the sorted fractions can be chosen.
Conclusions. The character of lump distribution of mineral phases content influences the effectiveness of separation and the possibility of obtaining poor tailings under various width of the sorted fractions. During scheme development (sorted fractions number and the borders selection) the character of lump distribution of mineral phases content should be taken into account.
Key words: preliminary concentration; X-ray radiometric separation; number of sorted fractions; simulation model; distribution of mineral phases content in ore lumps; partition curves.

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-77-84

REFERENCES

1. Maksimov I. I. [The 27th International Mineral Processing Congress (part 1)]. *Obogashchenie Rud – Mineral Processing*, 2015, no. 3, pp. 3–11. (In Russ.)

2. Maksimov I. I. [The 27th International Mineral Processing Congress (part 2)]. *Obogashchenie Rud – Mineral Processing*, 2015, no. 6, pp. 50–58. (In Russ.)
3. Härkki K. Overcoming sustainability challenges of future concentrator plants. Proc. of XXVII Int. Min. Proc. Congress, Santiago, Chile, Gecamin, 2014, chap. 1, p. 51.
4. Tsypin E. F., Ovchinnikova T. Iu., Efremova T. A., Elizarov D. B. [A cluster of information methods of mineral processing]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2017, special edition no. 23, pp. 483–492. (In Russ.)
5. Knapp H., Neubert K., Wotruba H. Simulation of sensor-based on drill core analysis. Proc. of the XXVII Int. Min. Congress, Santiago, Chile, 2014, chap. 16, pp. 21–30.
6. Kolacz J. Sensor based sorting with signal pattern recognition: The new powerful tool in mineral processing. Proc. of the XXVII Int. Min. Congress. Santiago, Chile, 2014, chap. 16, pp. 106–115.
7. Robben C., Mosser A. X-ray-transmission-based sorting at the Mittersill tungsten mine. Proc. of the XXVII Int. Min. Congress. Santiago, Chile, Gecamin, 2014, chap. 16, pp. 159–168.
8. Kobzev A. S. [Development trends and problems of radiometric methods of mineral processing]. *Obogashchenie rud – Mineral Processing*, 2013, no. 1, pp. 13–17. (In Russ.)
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 separation of ores]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2005, no. 5, pp. 21–37. (In Russ.)
10. Fedorov M. Iu. [New technical developments to ensure the increase of effectiveness in equipment and technology with the use of X-ray fluorescence separation]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2011, no. 8, pp. 103–110. (In Russ.)
11. Pestov V. V. [The development and use of methodical software X-ray florescent separation of mineral and technogenic raw materials]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2011, no. 8, pp. 111–117. (In Russ.)
12. Pestov V. V. [A methodology of developing separation parameter for X-ray fluorescent separation of ores and technogenic materials]. *Gornyi zhurnal – Mining Journal*, 2012, no. 2, pp. 145–150. (In Russ.)
13. Tsypin E. F., Tiuiusheva N. M., Komlev S. G., Arzhannikov G. I., Beliakov V. A., Karbovskaia A. V. [X-ray radiometric separation of copper-zinc ores]. *Tsvetnye metally – Non-ferrous Metals*, 1992, no. 12, pp. 58–61. (In Russ.)
14. Sanakulov K. S., Rudnev S. V., Kantsel' A. V. [On the possibility of mining Uchkulach deposits with the use of lead-zinc ore X-ray radiometric processing technology]. *Gornyi vestnik Uzbekistana – Mining News of Uzbekistan*, 2011, no. 1(44), pp. 17–20.
15. Sanakulov K. S., Rudnev S. V. [A complex of X-ray radiometric processing of sulphide ores at Kokpatas deposit]. *Gornyi vestnik Uzbekistana – Mining News of Uzbekistan*, 2010, no. 1(40), pp. 3–7.
16. Rakhmeev R. N., Voiloshnikov G. I., Fedorov Iu. O., Chikin A. Iu. [Results of the experiments over the X-ray radiometrical separator for diamond-bearing concentrates processing]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2017, no. 5, pp. 80–88. (In Russ.)
17. Tsypin E. F., Shemiakin V. S., Skopov S. V., Fedorov Iu. O., Pestov V. V., Ental'tsev E. V. [Processing mineral and technogenic raw material with the use of X-ray radiometric separation]. *Stal' – Steel*, 2009, no. 6, pp. 75–78. (In Russ.)
18. Kolesaev V. B., Korsakov A. K., Sviatetskii V. S., Litvinenko V. G., Kultyshev V. I., Reshetnikov A. A. [Streltsovsky orefield uranium deposits underground mining]. *Gornyi zhurnal – Mining Journal*, 2008, no. 8, pp. 33–36. (In Russ.)
19. Shemiakin V. S., Skopov S. V., Man'kovskii R. V., Krasil'nikov P. A., Mamonov R. S. [Preliminary concentration of quartz raw material]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2016, no. 8, pp. 74–79. (In Russ.)
20. 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 a basic process in the flowsheet of mineral processing]. *Obogashchenie rud – Mineral Processing*, 2001, no. 5, pp. 3–6. (In Russ.)
21. Shemiakin V. S., Makarov N. M., Chepchugov S. A. [Possibility of processing the bauxites of the NUBR]. *Gornyi zhurnal – Mining Journal*, 2004, no. 3, pp. 35–38. (In Russ.)
22. Alushkin I. V., Shchipchin V. B., Korneev I. G. [X-ray radiometric separation from TOMRA Sorting for coal preliminary processing]. *Ugol' – Coal*, 2014, no. 5, pp. 100–103. (In Russ.)

Information about authors

Tsypin Evgenii Fedorovich – Doctor of Engineering sciences, Professor, professor of the Department of Mineral Processing, Ural State Mining University. E-mail: gmf.opi@ursmu.ru
Efremova Tat'iana Aleksandrovna – junior researcher of AO Uralmekhanobr. E-mail: efremova_ta@umbr.ru
Elizarov Dmitrii Borisovich – Candidate of Engineering sciences, Associate professor, associate professor of the Department of Business Informatics, Ural State Economical University. E-mail: elizarovdb@yandex.ru
Ovchinnikova Tat'iana Iur'evna – Candidate of Engineering sciences, Associate professor, associate professor of the Department of Mineral Processing, Ural State Mining University. E-mail: tt2979@yandex.ru

UDC identifier 338.2:502 DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-85-92

THE NOTION OF BALANCE EVOLUTION IN THE NATURAL RESOURCE MANAGEMENT

IGNAT'EVA M. N.[1, 2]
[1] The Ural State Mining University
(Kuibysheva str., 30, Ekaterinburg, the Russian Federation)
[2] Institute of Economics, UB RAS
(Moskovskaya str., 29, Ekaterinburg, the Russian Federation)

Poor elaboration of sustainable development methodologies makes the problem of the said idea conceptual-categorical framework specification topical. The aim of the research is the determination of evolutionary changes and "balance" notion in the natural resource management, and its specification for the conditions of sustainable development. It has been stated that at the earlier stages balance was related to the need for natural resources conservation. Since the middle of the XX century in the conditions of environmental pollution and degradation, the requirement to substantiate ecological restrictions under economic growth has developed. The answer to the stated requirement was found in the development of a biosphere concept limiting anthropogenic impact on the environment up to 1% biota net primary production consumption, ensuring ecological-economic balance at natural resource management which provides for well-balanced correlation of various territory uses and maintenance of balanced state of the flow of matter and energy, discovery of the biosphere-technosphere threshold which reflects a balance between the technosphere environmental capacity and the territory environmental technogenic capacity, the determination of the threshold provides for the use of the energy approach. A new stage in balance substantiation is connected to a sustainable development concept aimed at reaching a balance between social and economic problems solution and environmental preservation; the concept is also aimed at uninterrupted unity of economy, ecology, and social justice which reflects in a balance between the goals of ecological, economic, and social subsystems. Economic concepts based on the use of social-economic and geoecosocioeconomic approaches show their own approach to balance.

Key words: *balance; concepts; approaches; natural science researches; economic researches; approximation.*

The analysis shows that the notion of balance in the natural resource management hasn't got any unique interpretation. Balance was originally considered in respect of the natural resources use and restoration which had a direct relationship to the idea of forest management aimed at excessive forest resources depletion prevention by means of their natural restoration. Hanz Carl von Carlowitz was the founder of the concept being the first one to formulate the concept of sustainability in his book "Silviculture and Economics" (1713). [1, p. 198]. Appearance of the book was connected with the problem of forest resources scarcity some European countries faced in the middle of the XVII century, and the need to create conditions for uninterrupted forest utilization (sustainable yield forestry). In the following years over a long period of time forestry researches were aimed at the substantiation of the most acceptable forms of growth and falling priority to ensure uninterrupted and sustainable forest utilization.

Acknowledgement of environmental protection significance in the middle of the XX century conditioned on the appearance of an environmental optimization concept; the author of the work [2, p. 24] reduces the sense of the concept to a "well-balanced

relation between the exploitation, conservation, and melioration". A. G. Isachenko considers environmental optimization from the position of "nature – society" relations optimization and believes that it is necessary to supplement efficiently controlled exchange between society and nature which provides for natural resources exploitation and protection with the third element – melioration (active involvement of people into natural processes in order to improve and enrich the environment). The term "optimization", in this case, and to the author's perspective, according to the content put into it is rather close to the notion of "sustainable (correct) natural resource management", the definition of the basic principles of which in national science is associated with the works by D. L. Armand [3].

With a certain degree of conditionality a similar characteristic of well-balanced natural resource management distinguishes works [4–6], where under natural resource management balance the authors understand that consumption rates of natural resources which are balanced by "the nature's possibility of restoring not only the quality of the environment, but also some renewable constituents of the resources" [4, p. 5]. Under further specification of a well-balanced natural resource management law, it is supplemented with a corrective addition, namely, taking into account assimilative capacity of a certain region within the framework of which the conditions of natural resource management balance are implemented [5, p. 264]. At that, the authors are not aimed at describing the mechanism of calculating assimilative capacity, they describe its value when constructing the nomograms of relationship between economic growth rates and natural resources and environmental quality restoration rates.

In the middle of the XX century natural resource management balance was officially defined as a possibility for economic growth within the framework of acceptable ecological-economic balance. Stating the essence of the eco-development concept M. Strong, the Secretary-General of the 1972 Stockholm Conference, announced requisitions for balance as a "balance between anthropogenic impact on the environment and its renewable and self-rectifying capacity with its endurance in relation to these impacts" [7]. Search for the criteria, environmental restrictions ensuring the fulfillment of ecological-economic balance (requisition for balance), led to the formation of a range of research directions, among which biosphere concept should be considered which recognizes the idea of "biological stabilization of the environment".

With the active development of biotic regulation idea initiated by V. I. Vernadskii and N. V. Timofeev-Resovskii, V. G. Gorshkov proved that biota is the only mechanism providing conditions required for life existence. Biotic regulation mechanism acknowledgement provided the possibility of stating an acceptable threshold of biota net primary production (NPP). On the assumption that 90% of vegetational organic (NPP) is consumed by mushrooms, bacteria, and unicellular organisms, more than 9% is consumed by small invertebrates, consumption of vegetational organic by vertebrates including human is valued at 1% [8, 9]. The same result was obtained by a group of American ecologists directed by P. M. Vitousek [10].

At the earlier stages of human development, consumption was limited by 1–2% of biotic energy which corresponded to the level of balance, i. e. nature resourse management complying with an accepted "biosphere corridor" [11–13]. In modern conditions the accepted "threshold" is exceeded by at least 10 times which leads to life destabilization on the Earth. Special hazard exposes the reduction of territories covered with uninterrupted biota. Biotic regulation potential violation and, correspondingly, environmental sustainability decrease, in this case, are verse results manifestation. From all has been said follows the priority of maintaining and restoring natural ecosystems (represented mainly by biota forest communities) to the extent sufficient for environmental regulation and stabilization [14].

Undisturbed natural ecosystems preservation relevance has predetermined the need for stating critical correlations between the territories developed and reorganized by human and territories occupied by undisturbed biota. In this case natural resource management balance provides for a possibility of replacing natural ecosystems (landscapes) by artificial ones in the process of natural resources use only within the limits of biosphere carrying ecological (economic) capacity which does not violate the mechanism of biotic regulation and prevents the threat of global ecological crisis. The point at issue is a correct territory organization, ecological-economic balance of the territory (EEB), which in B. I. Kochurov's definition represents "well-balanced correlation of various types of territory use and maintenance of balanced state of the flow of matter and energy providing landscapes sustainability and restoration of natural (renewable) resources without causing negative ecological changes in nature" [15]. Meeting the requirements of EEB testifies to a well-balanced development including well-balanced natural resource management.

It is assumed that the correlation between disturbed and undisturbed territories in Russia is better than that of the worldwide average level but requires improvement in terms of reducing disturbed land areas (first of all, areas with totally disturbed ecosystems) and increasing areas with natural undisturbed biota. According to the registration data in 1993, forest area in Russia was 51.8% of total land area, nature reserves – 1.5%, and wildlife sanctuaries – 2.7%. Taking into account that undisturbed forests occupy 71.8% of forested area then territories with undisturbed biota occupied 41.39%.

With the account of existing tendencies in forest management and specially protected natural areas (OOPT) creation, significant increase in the rate of the territories with undisturbed natural ecosystems is not awaited.

According to FAO of the UN's recommendations, forests should occupy 50% of the Earth's surface, farmlands – 45%, and built-up areas – 5%. K. Doxiadis' recommendations are close to the indicated correlation, in accordance with them all dry land of the planet has been divided into 12 types of zones which allowed obtaining the following correlation: undisturbed territories – 57%, reorganized territories – 40%, urban land – 3% [16, p. 92]. E. Odum also comes to the conclusion that one third of total human society habitat should make up … various protected areas of spontaneous nature [17]. In work [18] the advised percentage of territories for ecological balance preservation is defined as 50%. At that the authors of [19], apart from OOPT, consider the introduction of the reserved areas of historical-cultural heritage and traditional nature resourse management, together with the land used for nature protection and reserved areas used for resourse purposes into the undisturbed systems ecological network possible. As discussed in work [11, p. 281], academician A. D. Sakharov believed that "in the future, the division of dry surface into settled land and unsettled territory at the ratio of 3 : 8 is necessary" which closely corresponds to the results coming from the theory of biotic regulation of the environment. The authors [20, 21] think that the area of utilized forests should be reduced by 30% which will make it possible to enlarge the territory of undisturbed natural ecosystems, along with that it is advisable to stop the scaled-up utilization of the World Ocean.

Researches of the end of the XX century were accorded wide recognition, substantiating balance between the technosphere environmental capacity – U and the territory environmental technogenic capacity – T. In accordance with [22–24], the criterion of balance herewith means preventing the excess of technogenic load over the environmental technogenic capacity which reflects renewable potential of the territory's natural system. If balance is reached, when $U = \mathrm{T}$, manufacturing is performed without violation of assimilative capacity of the territory being compatible with nominally

favorable environmental conditions. Environmental technogenic capacity of the territory, in this case, is considered as maximum safe technogenic load (biosphere-technosphere threshold), ecological restriction of economic growth.

The considered criterion of balance is commonly used with respect to the environmental pollution and the assimilative capacity possibility of assimilating contaminants entering the atmosphere, soil, and water sources, at that, "environmental technogenic capacity of the territory constitutes only a part of the territory's total ecological capacity" [22, p. 337]. In making comparative assessments energy approach is recommended. It is the energy approach researches commonly refer to when assessing balance rate and, thereafter, the territory's environmental condition stress level [25, 26]. The interpretation of the acquired results is also possible from the point of view of environmental safety of industry anthropogenic impact on the environment including nature resource management. It follows from the analysis that all the indicated definitions of balance characterize it from the point of view of the natural science approach with an assessing focus on the energy measuring instruments.

A new stage in balance substantiation was introduced by the conference "Rio+20" (Rio de Janeiro Summit in 1992), where the global community appealed for transferring to a new ecological-economic development model. As compared to the eco-development model, sustainable development admits the social aspect equality. The World Commission on Environment and Development interpret sustainable development as "development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs" [27]. In the outcomes of the "Rio+20" conference sustainable development is defined as combining steady improvement of economic and social living conditions and long-term preservation of the life's natural fundamentals.

The concept of the Russian Federation transfer to sustainable development (1996) assumes that sustainable development will ensure "interconnected, internally well-balanced functioning of the triad – nature, population, and economy" [11, p. 393], O. I. Sergienko considers sustainable development as "well-balanced functioning of three components: quality of the environment, living standard, and economic development" [28, p. 32]. Author [29] believes that sustainable development provides for a balance between social-economic problems solution and environmental protection, meeting the vital requirements of the present generation and meeting the needs of the future generations. Defining sustainable development a range of works, taking into account indissoluble unity of ecology, economy, and social justice, consider these three aspects with reference to each other from the point of view of their objectives balance. In practice, it is either integration of social, ecological, and economic aspect, or the use of the system of indices reflecting separate aspects of sustainable development that are recommended for sustainability assessment [30]. At that, the issue of balance is not discussed as initially according to the definition of the English-Russian dictionary [31], sustainable development is characterized as well-balanced, self-sustaining, and self-sufficient, i.e. the level of sustainability is characterized by a balance between all three aspects under consideration.

Balance is also defined in the context of economic concepts. Like that, social-economic approach offered by authors [32–34] tolerates the maximization of economic gain only "in case of social standards are met and ecological balance is kept", i. e. the use of natural resources is expected within the limits of social and ecological restrictions [34, p. 16]. For comparison purposes the methodology of social-economic approach requires the expression of social and ecological consequences in monetary indicators and appeal to multi-criteria assessment which provides for the equality of social ecological and economic objectives.

Social-ecological approach develops into the further ecologization and geoecosocioeconomic approach methodological ideas development [35, 36], formed as a result of social-economic and geoecological approaches approximation. It is assumed that the given approach provides for harmonization of economic, social, and ecological subsystems' goals, establishing balance between an economic result (effect) and economic damage conditioned on ecological and social consequences.

There is no escaping another aspect of balance definition which is a balance between the interests of enterprises (natural resourse users) exploiting natural-resources potential and the interests of the population of a certain territory with regard to its social-economic development and environmental protection. Special role in interests harmonization at natural resource management belongs to the state intended to ensure social and economic stability, determine the strategy for the economic growth, as well as to the institutions of local government in oblast, autonomous district, city, and region, and to non-governmental organizations.

So, balance definition is not constant within the time aspect. Natural science researches are the most elaborate. After "Rio+20" conference economic concepts develop, reflecting social constituent. Definite approximation of natural science and economic investigations is typical for the modern stage which provides for the elaboration of a single integrated approach to the definition of balance and allows hoping for a positive solution of sustainable development problem.

REFERENCES

1. Pukman I. V., Adamovskii A. N. [Development of approaches to multipurpose forest management]. *Lesotekhnicheskii zhurnal – Forestry Engineering Journal*, 2013, no. 2, pp. 198–203. (In Russ.)

2. Isachenko A. G. *Optimizatsiia prirodnoi sredy* [Optimization of the environment]. Moscow, Mysl' Publ., 1980. 265 p.

3. Armand D. L. *Nam i vnukam* [To us and our children]. Moscow, Mysl' Publ., 1966. 252 p.

4. Ignatov V. G., Kokin A. V., Baturin L. A. *Sbalansirovannoe prirodopol'zovanie* [Sustainable nature resource management]. Rostov-on-Don, Rostizdat Publ., 1999. 432 p.

5. Ignatov V. G., Kokin A. V. *Ekologiia i ekonomika prirodopol'zovaniia* [Ecology and economy of natural resource management]. Rostov-on-Don, Feniks Publ., 2003. 512 p.

6. Ignatov V. G., Kokin A. V. [Ways of ensuring regional environmental protection at sustainable nature resourse management]. *Gosudarstvennoe i munitsipal'noe upravlenie. Uchenye zapiski SKAGS – State and Municipal Management. Proceedings of the SKAGS*, 2000, no. 2, pp. 17–27. (In Russ.)

7. Declaration of the United Nations Conference on the Human Environment, Stockholm, 1972. Available at: http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/declarations/declarathenv.shtml (Access date 20th March, 2018) (In Russ.)

8. Gorshkov V. G. [Physical and biological fundamentals of life sustainability]. *VINITI – All-Russian Institute of Scientific and Technical Information*, 1995, vol. 38, 472 p. (In Russ.)

9. Gorshkov V. G. [Structure of biospheric energy flows]. *Botanicheskii Zhurnal – Botanic Journal*, 1980, no. 11, pp. 1579–1590. (In Russ.)

10. Vitousek P. M. Beyond global warming: ecology and global change. *Ecology*, 1994, vol. 75, no. 7, pp. 1861–1876.

11. Danilov-Danil'ian V. I., Losev K. S. *Ekologicheskii vyzov i ustoichivoe razvitie* [Environmental challenge and sustainable development]. Moscow, Progress-Traditsiia Publ., 2000. 416 p.

12. Losev K. S. *Mify i zabluzhdeniia v ekologii* [Myths and delusions in ecology]. Samara, Nauchnyi mir Publ., 2011. 224 p.

13. Gorshkov V. G., Makar'eva A. M., Losev K. S. [On the agenda is the strategy of survival of the humanity]. *Vestnik RAN – Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2006, vol. 76, no. 4, pp. 309–314. (In Russ.)

14. Losev K. S. [Natural science fundamentals of life's sustainability]. *Vestnik RAN – Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2003, vol. 73, no. 2, pp. 110–116. (In Russ.)

15. Kochurov B. I. *Ekodiagnostika i sbalansirovannoe razvitie* [Ecological diagnostics and sustainable development]. Smolensk, Madzhenta Publ., 2003. 384 p.

16. Vladimirov V. V. *Urboekologiia* [Urban ecology]. Moscow, MNEPu Publ., 1999. 204 p.

17. Odum H. T., Odum E. P. Energy basis for man and nature. New York, 1972. 379 p.

18. Reimers N. F., Shtil'mark F. R. *Osobo okhraniaemye prirodnye territorii* [Specially protected natural areas]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 295 p.

19. Glazyrina I. P. *Prirodnyi kapital v ekonomike perekhodnogo perioda* [Natural capital in the economics of transition]. Moscow, NIA-Priroda, REFIA Publ., 2001. 204 p.

20. Gorshkov V. G., Kondrat'ev K. Ia., Losev K. S. [If we enter into alliance with the wisdom of Mother Nature] *Vestnik RAN – Herald of the Russian Academy of Sciences*, 1996, no. 2, pp. 802–806. (In Russ.)

21. Gorshkov V. G., Makar'eva A. M. [Biotic regulation of the environment: substantiating the need for natural biota maintenance and restoration in continental scale areas]. *Bioticheskaia reguliatsiia okruzhaiushchei sredy: tr. Mezhdunar. seminara* [Proc. Int. Seminar "Biotic Regulation of the Environment"]. Gatchina. 1998, pp. 3–20. (In Russ.)

22. Akimova T. A., Khaskin V. V. Ekologiia. *Chelovek – ekonomika – biota – sreda* [Ecology. Human – economics – biota – environment]. Moscow, IUNITI-DANA Publ., 2006. 495 c.

23. Akimova T. A., Khaskin V. V. *Tendentsii vzaimodeistviia biosfery i tekhnosfery* [Tendencies in biosphere and technosphere interaction]. Ekologo-ekonomicheskoe razvitie Rossii (analiz i perspektivy) – Ecological-Economic Development of Russia (analysis and prospects). Moscow, RAEN Publ., 2000. 416 p.

24. Akimova T. A. *Osnovy ekonomiki ustoichivogo razvitiia* [Fundamentals of sustainable development economics]. Moscow, Ekonomika Publ., 2013. 332 p.

25. Kuklin A. A., Belik I. S., Nikulina N. L. *Sotsial'no-ekonomicheskoe obosnovanie ekologicheskoi bezopasnosti regiona* [Social-economic substantiation of region's environmental safety]. Ekaterinburg, USTU – UPI Publ., 2005. 145 p.

26. Kochurov B. I., Marunich N. A. *Ekologo-energeticheskii analiz ekosistem* [Ecological-energy analysis of ecosystems]. Moscow, INFRA-M Publ., 2016. 144 p.

27. Our future: the report of the international commission over the environment and development: trans. from English. Edited by S. A. Evteev and R. A. Perelet. Available at: http://xn--80adbkckdfac8cd1ahpld0f.xn--p1ai/files/monographs/OurCommonFuture-introduction.pdf (Access date 15th March, 2018) (In Russ.)

28. Sergienko O. I. *Ekonomicheskoe prirodopol'zovanie* [Economic natural resource management]. Rostov-on-Don, Feniks Publ., 2004. 320 p.

29. Danilov-Danil'ian V. I. [Is "coevolution of nature and society" possible?]. *Voprosy filosofii – Problems of Philosophy*, 1998, no. 8, pp. 15–25. (In Russ.)

30. Bobylev S. M., and others. *Ustoichivoe razvitie: metodologiia i metodiki izmereniia* [Sustainable development: methodology and methods of measurement]. Moscow, Ekonomika Publ., 2011. 358 p.

31. Petrova T. E. *Metodicheskie osnovy otsenki ekologicheski ustoichivogo razvitiia regiona: dis. ... kand. ekon. nauk* [Methodological fundamentals of the region's environmentally sustainable development assessment. Cand. econ. sci. diss.]. Moscow, 1998. 176 c.

32. Kozakov E. M. *Ekonomicheskoe obosnovanie proektov gorno-obogatitel'nykh predpriiatii* [Economic substantiation of ore-dressing enterprises plans]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 210 p.

33. Kozakov E. M., Pakhomov V. P., Ignat'eva M. N. *Sotsial'no-ekonomicheskoe obosnovanie osvoeniia mineral'nykh resursov* [Social-economic substantiation of mineral resources exploitation]. Ekaterinburg, UB RAS Publ., 1992. 112 p.

34. Ignat'eva M. N. *Sotsial'no-ekonomicheskoe obosnovanie osvoeniia mineral'nykh resursov: avtoref. dis. ... d-ra ekon. nauk* [Social-economic substantiation of mineral resources exploitation. Abs. Dr. econ. sci. diss.]. Sverdlovsk, 1991. 57 p.

35. Ignat'eva M. N. [Basic ideas of geoecosocioecological approach on mineral resources exploitation]. *Izvestiya Ural'skogo Gosudarstvennogo Gornogo Universiteta – News of the Ural State Mining University*, 2014, no. 3 (35), pp. 74–80. (In Russ.)

36. Ignat'eva M. N., Litvinova A. A. [Ecologization of the socio-economic approach to natural resources development]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2015, no. 3, pp. 57–64. (In Russ.)

Received 20th March, 2018

Ignat'eva M. N. The notion of balance evolution in the natural resource management. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal. 2018. No. 6. Pp. 85–92.

Information about authors

Ignat'eva Margarita Nikolaevna – Doctor of Economics, Professor, professor of the Department of Economics and Management, Ural State Mining University. Leading researcher, Institute of Economics, UB RAS. Ekaterinburg, the Russian Federation. E-mail: rinis@mail.ru

ЭВОЛЮЦИЯ ПОНЯТИЯ СБАЛАНСИРОВАННОСТИ В ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИИ

Игнатьева М. Н.[1, 2]

[1] Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия.

[2] Институт экономики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.

Недостаточная разработка методологий устойчивого развития актуализирует проблему уточнения понятийно-категорийного аппарата этой концепции. Цель исследования – выявление эволюционных изменений, понятия «сбалансированность» в природопользовании и его уточнение для условий экоустойчивого развития. Установлено, что на ранних этапах сбалансированность увязывалась с необходимостью предотвращения истощения природных ресурсов. С середины XX века в услови-

ях загрязнения окружающей среды и ухудшения экологической ситуации формируется требование обоснования экологических ограничений при экономическом росте. Ответом на сформулированное требование явилась разработка биосферной концепции, ограничивающей антропогенное воздействие на природную среду 1 % потребления чистой первичной продукции биоты; обеспечение эколого-экономического баланса при природопользовании, предполагающего сбалансированное соотношение различных видов использования территорий и поддержание равновесного состояния потоков вещества и энергии; выявление биосферно-техносферного порога, отражающего сбалансированность природоемкости техносферы и экологической техноемкости территории, установление которого предусматривает использование энергетического подхода. Новый виток в обосновании сбалансированности связан с концепцией устойчивого развития, ориентированной на баланс в решении социально-экономических проблем и сохранение окружающей среды, на непрерывное единство экономики, экологии и социальной справедливости, что находит отражение в сбалансированности целевых установок экологической, экономической и социальной подсистем. Свой подход к сбалансированности демонстрируют и экономические концепции, базирующиеся на использовании социально-экономического и геоэкосоциоэкономического подходов.
Ключевые слова: сбалансированность; концепции; подходы; естественнонаучные исследования; экономические исследования; сближение.

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-85-92

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пукман И. В., Адамовский А. Н. Эволюция подходов к многоцелевому лесопользованию // Лесотехнический журнал. 2013. № 2. С. 198–203.
2. Исаченко А. Г. Оптимизация природной среды. М.: Мысль, 1980. 265 с.
3. Арманд Д. Л. Нам и внукам. М.: Мысль, 1966. 252 с.
4. Игнатов В. Г., Кокин А. В., Батурин Л. А. Сбалансированное природопользование. Ростов-на-Дону: Ростиздат, 1999. 432 с.
5. Игнатов В. Г., Кокин А. В. Экология и экономика природопользования. Ростов-на-Дону: Феникс, 2003. 512 с.
6. Игнатов В. Г., Кокин А. В. Пути обеспечения региональной экологической безопасности в сбалансированном природопользовании // Государственное и муниципальное управление. Ученые записки СКАГС. 2000. № 2. С. 17–27.
7. Декларация Конференции ООН по проблемам окружающей человека среды, Стокгольм, 1972. URL: http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/declarations/declarathenv.shtml (дата обращения: 20.03.2018)
8. Горшков В. Г. Физические и биологические основы устойчивости жизни // ВИНИТИ. 1995. XXXVIII. 472 с.
9. Горшков В. Г. Структура биосферных потоков энергии // Ботанический журнал. 1980. № 11. С. 1579–1590.
10. Vitousek P. M. Beyond global warming: ecology and global change // Ecology. 1994. Vol. 75. No. 7. P. 1861–1876.
11. Данилов-Данильян В. И., Лосев К. С. Экологический вызов и устойчивое развитие. М.: Прогресс-Традиция, 2000. 416 с.
12. Лосев К. С. Мифы и заблуждения в экологии. Самара: Научный мир. 2011. 224 с.
13. Горшков В. Г., Макарьева А. М., Лосев К. С. В повестке дня – стратегия выживания человечества // Вестник РАН. 2006. Т. 76. № 4. С. 309–314.
14. Лосев К. С. Естественнонаучная база устойчивой жизни // Вестник РАН. 2003. Т. 73. № 2. С. 110–116.
15. Кочуров. Б. И. Экодиагностика и сбалансированное развитие. Смоленск: Маджента, 2003. 384 с.
16. Владимиров В. В. Урбоэкология. М.: МНЭПу, 1999. 204 с.
17. Odum H. T., Odum E. P. Energy basis for man and nature. New York, 1972. 379 p.
18. Реймерс Н. Ф., Штильмарк Ф. Р. Особо охраняемые природные территории. М.: Наука, 1978. 295 с.
19. Глазырина И. П. Природный капитал в экономике переходного периода. М.: НИА-Природа, РЭФИА, 2001. 204 с.
20. Горшков В. Г., Кондратьев К. Я., Лосев К. С. Если взять в союзники мудрость матери-природы // Вестник РАН. 1996. № 2. С. 802–806.
21. Горшков В. Г., Макарьева А. М. Биотическая регуляция окружающей среды: обоснование необходимости сохранения и восстановления естественной биоты на территориях материковых масштабов // Биотическая регуляция окружающей среды: тр. Междунар. семинара. Гатчина, 1998. С. 3–20.
22. Акимова Т. А., Хаскин В. В. Экология. Человек – экономика – биота – среда. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2006. 495 с.
23. Акимова Т. А., Хаскин В. В. Тенденции взаимодействия биосферы и техносферы // Эколого-экономическое развитие России (анализ и перспективы). М.: РАЕН, 2000. 416 с.
24. Акимова Т. А. Основы экономики устойчивого развития. М.: Экономика, 2013. 332 с.
25. Куклин А. А., Белик И. С., Никулина Н. Л. Социально-экономическое обоснование экологической безопасности региона. Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2005. 145 с.
26. Кочуров Б. И., Марунич Н. А. Эколого-энергетический анализ экосистем. М.: ИНФРА-М, 2016. 144 с.
27. Наше общее будущее: докл. Междунар. комиссии по окружающей среде и развитию: пер. с англ. / под ред. С. А. Евтеева и Р. А. Перелета. URL: http://xn--80adbkckdfac8cd1ahpld0f.xn--p1ai/files/monographs/OurCommonFuture-introduction.pdf (дата обращения 15.03.2018)
28. Сергиенко О. И. Экономическое природопользование. Ростов-на-Дону: Феникс, 2004. 320 с.
29. Данилов-Данильян В. И. Возможна ли «коэволюция природы и общества»? // Вопросы философии. 1998. № 8. С. 15–25.
30. Устойчивое развитие: методология и методики измерения / С. М. Бобылев [и др.]. М.: Экономика, 2011. 358 с.
31. Петрова Т. Э. Методические основы оценки экологически устойчивого развития региона: дис. … канд. экон. наук. М., 1998. 176 с.
32. Козаков Е. М. Экономическое обоснование проектов горно-обогатительных предприятий. М.: Недра, 1987. 210 с.
33. Козаков Е. М., Пахомов В. П., Игнатьева М. Н. Социально-экономическое обоснование освоения минеральных ресурсов. Екатеринбург: УрО РАН, 1992. 112 с.

34. Игнатьева М. Н. Социально-экономическое обоснование освоения минеральных ресурсов: автореф. дис. … д-ра экон. наук. Свердловск, 1991. 57 с.
35. Игнатьева М. Н. Основные положения геоэкосоциоэкологического подхода к освоению природных ресурсов // Известия Уральского государственного горного университета. 2014. № 3 (35). С. 74–80.
36. Игнатьева М. Н., Литвинова А. А. Экологизация социально-экономического подхода к освоению природных ресурсов // Известия вузов. Горный журнал. 2015. № 3. С. 57–64.

Сведения об авторах:

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: rinis@mail.ru

УДК 65.011.4 DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-93-98

КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ ФУНКЦИОНАЛА ЛИНЕЙНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РАБОТНИКОВ

АЛЕКСЕЕНКО В. Б.[1]

[1] Уральский государственный горный университет
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30)

Введение. *В настоящее время остро стоит проблема вовлечения персонала в процесс развития эффективности производства, которая обусловлена неэффективным взаимодействием между руководящим составом и подчиненными. Взаимодействие между руководящим составом и подчиненными определяет существенную роль в вопросе устойчивости предприятия на рынке, так как все более очевидным становится влияние сформировавшейся на предприятии модели взаимодействия сотрудников на технико-экономические показатели производства.*
Целью *проводимой работы является разработка методических инструментов, позволяющих повышать уровень вовлеченности сотрудников предприятия в процесс развития производства.*
Методология. *Проведены анализ и обобщение существующих моделей взаимодействия сотрудников горнодобывающих предприятий, а также рассмотрено влияние этих моделей на производительность экскаваторов и себестоимость экскавации горной массы.*
Результаты. *Установлено, что изменение модели взаимодействия персонала может обеспечить увеличение производительности оборудования в 1,5–3,0 раза и снижение себестоимости производства более чем в 2,0 раза. Для освоения полученных результатов были установлены характеристики функций управления исследуемых моделей, определены их предназначения и получаемый результат в зависимости от существующей на предприятии модели взаимодействия.*
Вывод. *Концепция развития функционала ИТР заключается в изменении модели взаимодействия персонала и поэтапном переходе от модели, характеризующейся связью между руководящим составом и подчиненными, ориентированной только на выполнение плановых объемов, к модели, направленной на выполнение плановых объемов производства и развития в согласованности с ИТР, но без вовлечения в процесс развития бригадиров, затем к модели, представляющей собой тесную связь между директором и бригадиром, направленной на повышение эффективности и безопасности производства.*

Ключевые слова: *модель взаимодействия персонала; производительность экскаваторов; себестоимость производства; инженерно-технический работник; функционал; развитие.*

Цель работы. Процесс повышения эффективности производства на горнодобывающих предприятиях тесно связан с вовлеченностью персонала в данный процесс [1, 2]. На текущий момент на отечественных предприятиях сложилась ситуация, характеризующаяся низкой заинтересованностью сотрудников в развитии эффективности производства и снижении его себестоимости, что обусловлено сложившейся моделью их взаимодействия [3]. Цель работы – разработка инструментов, позволяющих влиять на уровень вовлеченности сотрудников предприятия в процесс развития производства.

Методология включает анализ функционирования производственных систем и структур российских и зарубежных горнодобывающих предприятий, обеспечивающих различную величину производительного времени операционного персонала [4].

Результаты исследований. Установлены три модели взаимодействия персонала. Каждая модель определяет различные границы производительности оборудования и себестоимости производства. Влияние этих моделей на эффективность производства, в частности для асбестодобывающих предприятий [5–7], представлено на рис. 1, где видно, что при переходе от модели взаимодействия *А*

Характеристика типов моделей взаимодействия персонала на горнодобывающем предприятии
Characteristics of personnel interaction model types at a mining enterprise

Функция управления	Предназначение функции (результат)	Типы моделей взаимодействия		
		А	*Б*	*В*
Планирование	Разработка производственных планов	Планируется выполнение только плановых объемов производства	Планируется выполнение плановых объемов производства и эпизодически разрабатываются решения по развитию производственных процессов	Наравне с планированием выполнения плановых объемов производства разрабатываются решения по развитию производственных процессов
Организация	Обеспечение взаимодействия персонала для выполнения производственных планов	Взаимодействие по всему уровню управления только по выполнению плановых объемов производства	Директор во взаимодействии с ИТР разрабатывает требования к улучшению производственных процессов. ИТР принуждают бригадиров реализовывать требования	Директор совместно с бригадирами и ИТР согласовывают требования к улучшению производственных процессов. Директор контролирует, ИТР организуют реализацию требований, бригадиры осваивают эти улучшения
Мотивация	Обеспечение вовлеченности персонала в процесс выполнения производственного плана	Премия за выполнение плановых объемов производства	Премия за перевыполнение плановых объемов производства	Премия за улучшение производственных процессов
Контроль	Непрерывное наблюдение за процессом реализации производственного плана и приведение его в нормальное состояние	Контроль за выполнением наряд-заданий	Контроль за выполнением норм и стандартов	Контроль за динамикой развития показателей безопасности и эффективности производственных процессов
Приоритетная функция ИТР		Выполнение плановых объемов производства	Выполнение плановых объемов производства при возможности произвести улучшения производственных процессов	На основе улучшения производственных процессов обеспечить повышение эффективности и безопасности производства
Результаты	Производительность, раз	Равна единице	Увеличивается в 1,5–2,5 раза	Увеличивается более чем в 3 раза
	Себестоимость, раз	Равна единице	Уменьшается в 1,2–2,0 раза	Уменьшается более чем в 2 раза

к модели взаимодействия *Б* происходит увеличение производительности экскаваторов в среднем в 1,5–2,5 раза и снижение себестоимости производства в 1,2–2,0 раза, а переход к модели *В* позволяет обеспечить более чем трехкратное увеличение производительности и двухкратное снижение себестоимости производства.

Принципиальные схемы моделей взаимодействия представлены на рис. 2.

Анализ и обсуждение. Модель *А* характеризуется тем, что взаимодействие *директор–ИТР–бригадир* направлено на выполнение только плановых объемов производства, без связи и согласованности, направленных на развитие производства. В модели *Б* в дополнении к модели *А* добавляется согласованная деятельность директора и ИТР по развитию производства с последующим принуждением к этой деятельности бригадиров. Модель *В* характеризуется непосредственной и ключевой связью между директором и бригадиром, направленной на повышение эффективности и безопасности производства, в развитии этой модели реализуется функционал ИТР.

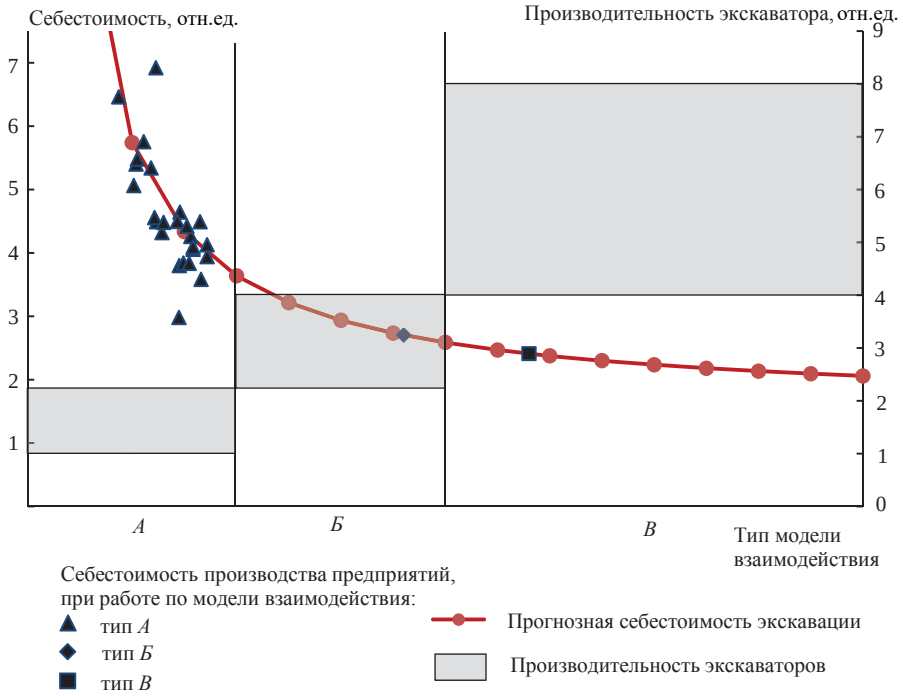

Рис. 1. Зависимость себестоимости экскавации горной массы и производительности экскаватора (ЭКГ-8И и ЭКГ-10) от типа модели взаимодействия персонала

Fig. 1. Dependence between the prime coast of rock mass excavation and the excavating machine productivity (EKG-8I и EKG-10), and the personnel interaction model type

С целью освоения требуемых моделей взаимодействия персонала произведено исследование содержания основных функций управления в зависимости от типа применяемой модели, что позволило их охарактеризовать (таблица) [8–12].

Выводы. Таким образом, концепция развития функционала ИТР заключается в изменении модели взаимодействия персонала и поэтапном переходе от модели, характеризующейся связью между руководящим составом и подчиненными, ориентированной только на выполнение плановых объемов, к модели, направленной на выполнение плановых объемов производства и развития в согласованности с ИТР, но без вовлечения в процесс развития бригадиров, затем к модели, представ-

ляющей собой тесную связь между директором и бригадиром, направленной на повышение эффективности и безопасности производства. Применение полученных результатов в области организации производства при освоении модели *В*

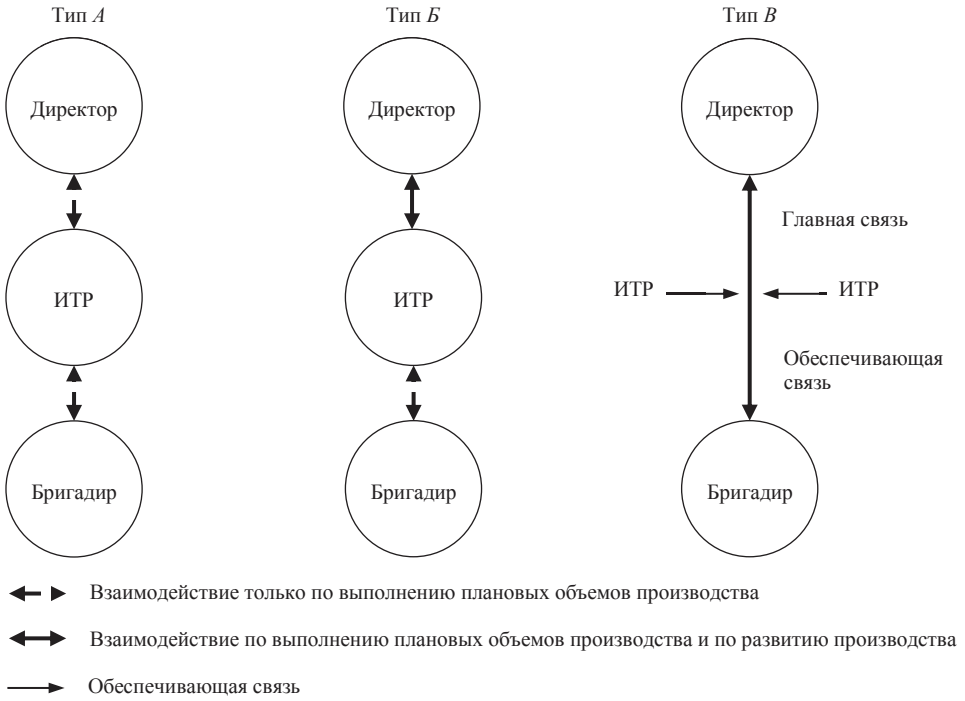

Рис. 2. Принципиальные схемы моделей взаимодействия
Fig. 2. Circuit diagrams of interaction models

может обеспечить трехкратное увеличение производительности оборудования и двухкратное снижение себестоимости производства по отношению к результатам работы по первой модели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Артемьев В. Б., Килин А. Б., Азев В. А., Костарев А. С., Шаповаленко Г. Н., Кузнецов А. Н., Галкин В. А. Концептуальный подход к формированию системы непрерывного повышения эффективности и безопасности угледобычи на основе развития мотивации и квалификации персонала // Уголь. 2011. № 10 (1027). С. 52–54.

2. Алексеенко В. Б., Припадчев В. С., Венедиктов И. Л., Глебов М. А., Иванов С. А., Хакимьянов В. А. О развитии системы технического использования экскаваторов рудоуправления ОАО «Ураласбест» // Открытые горные работы в XXI веке – результаты, проблемы и перспективы развития-2. ГИАБ. 2017. Спец. вып. 38 (12). С. 105–109.

3. Алексеенко В. Б. Критерий эффективности реализации функционала линейных инженерно-технических работников // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 5. С. 25–28.

4. Фомин А. В., Горев Д. Е., Натейкин В. Ю., Захаров С. И., Хажиев В. А. Об организации производства и труда на предприятиях Германии // Уголь. 2016. № 5. С. 86–89.

5. Bradbury J., Sendbuehler M. Restructuring asbestos mining in western Canada // Canadian Geographer. 1988. No. 32. P. 296–306.

6. Herrmann H., Bucksch H. Asbestos mining // Dictionary Geotechnical Engineering. 2014. No. 1. P. 37–42.

7. Mazzeo A. The temporalities of asbestos mining and community activism // The Extractive Industries and Society. 2018. No. 5. P. 15–21.

8. Сухарьков И. Н. Развитие функций управления техническим сервисом обеспечения работоспособности горнотранспортного оборудования // ГИАБ. 2017. № 12 (спец. вып. 39). С. 45–52.

9. Сухарьков И. Н. Концепция формирования технического сервиса обеспечения работоспособности горнотранспортного оборудования // ГИАБ. 2017. № 12 (спец. вып. 39). С. 53–60.

10. Сухарьков И. Н., Фукс С. Г., Гвоздев В. В., Байкин В. С. О системе премирования работников цеха ДВС АО «Черногорский ремонтно-механический завод» ООО «СУЭК-Хакасия» // ГИАБ. 2015. Отд. вып. № 45-2. С. 139–143.

11. Сухарьков И. Н., Вакулин Е. А., Волкова Т. Ю. Опыт освоения положения об оплате труда персонала по ремонту автосамосвалов // ГИАБ. 2015. Спец. вып. № 62. С. 288–293.
12. Шаповаленко Г. Н., Зубарев С. Ф., Глухорев В. В., Байкин В. С. Повышение эффективности проведения технического обслуживания БелАЗ на разрезе «Черногорский» ООО «СУЭК-Хакасия» // ГИАБ. 2015. Отд. вып. № 45-2. С. 122–128.

Поступила в редакцию 15 марта 2018 года

Алексеенко В. Б. Концепция развития функционала линейных инженерно-технических работников // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 6. С. 93–98.

Сведения об авторах:

Алексеенко Владимир Борисович – аспирант кафедры разработки месторождений открытым способом Уральского государственного горного университета. E-mail: chief.mine@uralasbest.ru

OPERATING ENGINEERING AND TECHNICAL PERSONNEL FUNCTIONS DEVELOPMENT CONCEPT

Alekseenko V. B.[1]
[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Introduction. The problem of the personnel involvement into the process of industrial effectiveness improvement is urgent nowadays; it is conditioned on ineffective cooperation between administrative and subordinate staff. Interaction between administrative and subordinate staff plays significant role in the matter of the enterprise stability at the market as the influence of the personnel interaction established model on the technical economic production factors are becoming increasingly evident.
Research aim is the development of methodological instruments allowing to increase the degree of the personnel involvement into the process of industrial improvement. The article reveals the results of analysis and generalization of mining enterprises personnel interaction existing models. The article also considers the influence of these models on the excavating machines productivity and rock mass excavation prime cost.
Results. It has been determined that the personnel interaction model alteration can provide equipment productivity increase by 1.5–3.0 times and production prime cost reduction by more than 2.0 times. In order to master the acquired results, the applied models control functions characteristics were determined, their assignment and the acquired result were defined depending on the interaction model that exists at the enterprise.
Conclusion. The concept of engineering and technical workers' functions development consists in the personnel interaction model alteration and phased transition from the model characterized by connection between administrative and subordinate staff to the model targeted at the accomplishment of standard volume of production and development in coordination with engineering and technical workers but without foremen's involvement into the process of development, and further to the model representing close connection between the director and a foreman aimed at industrial effectiveness and safety improvement.
Key words: personnel interaction model; excavating machines productivity; production prime cost; engineering and technical worker; functions; improvement.

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-93-98

REFERENCES

1. Artem'ev V. B., Kilin A. B., Azev V. A., Kostarev A. S., Shapovalenko G. N., Kuznetsov A. N., Galkin V. A. [Conceptual approach to coal production effectiveness and safety continuous improvement system development based on the development of personnel motivation and qualification]. *Ugol' – Coal*, 2011, no. 10 (1027), pp. 52–54. (In Russ.)
2. Alekseenko V. B., Pripadchev V. S., Venediktov I. L., Glebov M. A., Ivanov S. A., Khakim'ianov V. A. [Regarding the development of excavating machines industrial application system of the Industrial complex "Uralasbest"]. *Otkrytye gornye raboty v XXI veke – rezul'taty, problemy i perspektivy razvitiia-2. Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal) "Opencast Mining in the 20th Century. Results, Problems, and Prospects-2"]. 2017, special issue 38 (12), pp. 105–109. (In Russ.)
3. Alekseenko V. B. [Effectiveness criterion for the implementation of operating engineering and technical personnel job description]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2018, no. 5, pp. 25–28. (In Russ.)
4. Fomin A. V., Gorev D. E., Nateikin V. Iu., Zakharov S. I., Khazhiev V. A. [On the production and labour management at the enterprises of Germany]. *Ugol' – Coal*, 2016, no. 5, pp. 86–89. (In Russ.)
5. Bradbury J., Sendbuehler M. Restructuring asbestos mining in western Canada. *Canadian Geographer*, 1988, no. 32, pp. 296–306.

6. Herrmann H., Bucksch H. Asbestos mining. *Dictionary Geotechnical Engineering*, 2014, no. 1, pp. 37–42.
7. Mazzeo A. The temporalities of asbestos mining and community activism. *The Extractive Industries and Society*, 2018, no. 5, pp. 15–21.
8. Sukhar'kov I. N. [Mining automobile transport availability ensuring technical service management functions development]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2017, no. 12 (special edition no. 39), pp. 45–52. (In Russ.)
9. Sukhar'kov I. N. [The concept of mining automobile transport availability ensuring technical service formation]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2017, no. 12 (special edition no. 39), pp. 53–60. (In Russ.)
10. Sukhar'kov I. N., Fuks S. G., Gvozdev V. V., Baikin V. S. [On the incentive schemes for ICE workshop employees of LLC SUEK-Khakassia Chernogorsky repair and engineering works]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2015, fascicle no. 45-2, pp. 139–143. (In Russ.)
11. Sukhar'kov I. N., Vakulin E. A., Volkova T. Iu. [Experience of mastering compensation and benefits to employees on haulage trucks repair] *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2015, special edition no. 62, pp. 288–293. (In Russ.)
12. Shapovalenko G. N., Zubarev S. F., Glukhorev V. V., Baikin V. S. [Improving the effectiveness of providing maintenance service of BelAZ at Chernogorsky open pit of LLC SUEK-Khakassia]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2015, fascicle no. 45-2, pp. 122–128. (In Russ.)

Information about authors

Alekseenko Vladimir Borisovich – PhD student of the Department of Open Cut Mining, Ural State Mining University. E-mail: chief.mine@uralasbest.ru

УДК 338.2:502 DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-99-108

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В УСЛОВИЯХ МОНОГОРОДОВ ГОРНОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

СТРОВСКИЙ В. Е.[1], КУБАРЕВ М. С.[1]
[1] Уральский государственный горный университет
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30)

Введение. *В современных условиях надвигающегося экологического кризиса важное значение имеет решение проблемы обеспечения экологической безопасности.*
Цель исследования *– улучшение качества окружающей среды в условиях старопромышленных регионов, специфической особенностью которых является огромная масса накопленных отходов, обусловливающих неблагоприятную экологическую ситуацию в первую очередь в моногородах, градообразующую роль в которых выполняют предприятия горнодобывающего и металлургического профиля.*
Методы исследований. *В процессе исследования использовались такие методы, как научное обобщение и систематизация, сравнительный и факторный анализ.*
Результаты. *Выявлены специфика старопромышленных регионов, к числу которых относится Свердловская область, и основные объекты формирования техногенных минеральных образований (ТМО) в Екатеринбургской, Нижнетагильской и Серовской системах поселений. Проанализировано размещение промышленных отходов в границах управленческих округов Свердловской области и занимаемая ими площадь, из чего следует, что наибольшая часть отходов, представленных отвалами, приурочена к Южному округу, отходы хвостохранилищ на три четверти сосредоточены на территории Северного округа. Подтверждена опасность миграции тяжелых металлов (ТМ) из отходов в окружающую среду и их воздействие на здоровье населения, в том числе в условиях Свердловской области, а также взаимосвязь состава ТМ с геохимической специализацией вмещающих пород. Учитывая, что заболеваемость в определенной степени определяется характером загрязнения ТМ, металлогения Уральского складчатого пояса позволяет прогнозировать основные типы заболеваний и реальность угрозы ухудшения качества жизни населения. Анализируются пути решения проблемы обеспечения экологической безопасности на региональном и федеральном уровнях и специфика ее решения в условиях старопромышленных регионов.*
Выводы. *В результате проведенных исследований выявлены приоритетные направления государственного регулирования сферы обращения с ТМО, позволяющие наиболее эффективно решать проблему экологической безопасности. Авторские рекомендации относительно обеспечения экологической безопасности могут быть использованы при выработке и проведении экологической политики на региональном уровне.*

Ключевые слова: *отходы; загрязнение; заболеваемость; экологическая безопасность; моногорода; государственное регулирование.*

Введение. В городах и прочих населенных пунктах человеком создается гигантская инфраструктура искусственной среды обитания, необходимая для его существования. Территории городских поселений изымаются из естественной среды обитания и преобразуются в искусственную (урбанизированную) среду. Концентрация населения и производства на этих территориях формирует мощные очаги антропогенного воздействия, обусловливающего необратимые разрушения природы, угнетение и гибель биоты; изменение структуры, свойств и на-

Таблица 1. Сведения о размещении промышленных отходов
Table 1. Information on industrial wastes distribution

Округ	Наличие отходов на конец 2016 г., тыс.т/%	Отвалы			Отстойники, хвостохранилища			Площадь округа, %	Численность округа, %
		Количество/%	Отходы, тыс.т/%	Площадь, га/%	Количество/%	Отходы, тыс. т/%	Площадь, га/%		
Северный	2 841 264,4/30,8	59/40,7	1 180 995,7/16,8	3087 /45,5	13/16,9	1 659 533,6/76,6	3756,5/44,4	40,9	16,6
Горнозаводской	416 381,96/4,5	21/14,5	195 923,1/2,8	619,6/9,1	19/24,6	217 311,0/10,0	2019,4/24,0	8,4	24,0
Западный	241 678,3/2,6	25/17,2	189 600,2/2,7	443,6/6,5	22/28,5	44 188,8/2,1	664,4/7,8	12,9	20,6
Южный	5 636 711,5/61,2	24/16,5	5 391 476,1/76,6	2316,7/34,2	20/26,0	244 578,0/11,3	2001,4/23,7	5,8	21,7
Восточный	73 520,3/0,9	16/11,1	73 427,1/1,1	307,9/4,7	3/4,0	5,2/–	6,2/0,1	32,0	17,1
Итого	9 209 557,46/100	145/100	7 031 422,2/100	6774,9/100	77/100	2 165 616,6/100	8447,9/100	100	100

В общем количестве промышленных отходов учитываются свалки и прочие отходы, численность и площадь округов дана без учета г. Екатеринбурга.

рушение самоочищения почв, полное прекращение круговорота веществ и деградацию почвенного покрова, сокращение способности атмосферы к самоочистке; ухудшение свойств воздуха и так далее. Природный комплекс большинства городов настолько загрязнен, что почти неспособен к воспроизводству кислорода. Радиус влияния крупных городов на окружающую среду оказывается в 50 раз больше, чем радиус их собственной территории. По данным [1], в начале 2000-х гг. только 19 % из 1037 городов России можно было отнести к территориям с удовлетворительной и благоприятной экологической ситуацией. Экологическая ситуация в каждом втором городе определялась как умеренно напряженная, в каждом четвертом – как напряженная, в каждом десятом – как критическая. И на сегодня 17 % городского населения (17,1 млн чел.) продолжает проживать в городах с высоким и очень высоким уровнем загрязнения воздуха [2]. Все характеристики (репродуктивная способность территорий, экологическая емкость, геохимическая активность, биохимическая активность, устойчивость к физическим нагрузкам), которые характеризуют уровень экологического равновесия, оказываются нарушены.

Специфика Свердловской области. Значительная часть городского населения Свердловской области проживает в моногородах, где градообразующую роль выполняют предприятия горнодобывающего или металлургического профиля. По причине наличия на Урале богатейшего минерально-сырьевого потенциала край превратился в крупнейший центр горного дела и металлургии уже в начале XVIII века. В результате сегодня Свердловская область относится к числу старопромышленных областей, городское население которой составляет 84,5 % (на 01.01.2016 г.). При этом более 34,0 % составляет население г. Екатеринбурга. Согласно перечню, утвержденному распоряжением Правительства РФ от 29.07.2014 г. № 1398-р, составленному на основании критериев, утвержденных Постановлением РФ от 29.07.2014 г. № 709, на территории Свердловской области к числу моногородов отнесено 17 муниципальных образований, в их числе: Краснотурьинск, Волчанск, Карпинск, Североуральск, Красноуральск, Качканар, Серов, которые входят в Северный управленческий округ (7 единиц); Верхняя Тура, Верхняя Салда и Нижний Тагил, относящиеся к Горнозаводскому управленческому округу (3 единицы); Первоуральск, Полевской, Ревда, Верхняя Пышма, входящие в Западный управленческий округ (4 единицы), и Каменск-Уральский, Асбест и поселок Малышева, относящиеся к Южному управленческому округу (3 единицы). В границах большинства этих городов размещена огромная масса промышленных отходов, большая часть которых представлена техногенными минеральными образованиями.

Для большинства моногородов Свердловской области основным источником неблагополучия окружающей человека среды выступают отходы производств, которые в силу разрастания городских поселений зачастую расположены в границах городской черты (города Нижний Тагил, Асбест, Краснотурьинск, Березовский и другие). Формирование техногенных минеральных образований (ТМО) четко связано с распределением минерально-сырьевых ресурсов и размещением трех систем поселений: Екатеринбургской, включающей города Асбест, Березовский, Верхняя Пышма, Первоуральск, Полевской, Ревда, Екатеринбург, а также Белоярский, Нижнесергинский и Сысертский районы; Нижнетагильской, включающей города Качканар, Кушву, Нижнюю и Верхнюю Туру, Кировград, Нижний Тагил, Верхнюю Салду и Невьянск, и Серовской системы поселений, расположенной на севере и включающей города Ивдель, Краснотурьинск, Карпинск, Серов.

Для Екатеринбургской системы поселений характерно формирование ТМО, связанных с деятельностью горнодобывающих предприятий: Первоуральского РУ, Асбестовского ГОКа, Березовского РУ, Дегтярского РУ, с деятельностью

Среднеуральской и Пышминской обогатительных фабрик и Среднеуральского металлургического завода. В пределах Зауралья формирование ТМО обуславливает наличие Уральского алюминиевого завода (красные бокситовые шламы) и Режевского никелевого завода. Нижнетагильская группа поселений обусловила появление отвалов Качканарского ГОКа, Гороблагодатского РУ, Высокогорского РУ, Кировградского МПК, III Интернационала, АО «Волковский рудник», хвостохранилища Гороблагодатского РУ, Качканарского и Высокогорского ГОКов, Кировградской ОФ, шлаковых отвалов Кировградского МПК и Нижнетагильского МК.

С Серовской системой поселений связаны такие ТМО, как отвалы Полуночного, Марсятского, Богословского РУ, Красноуральского МПК, угольных шахт Карпинска, Волчанска, хвостохранилища Туринской и Красноуральской ОФ, шлаковые отвалы Краснотурьинской МПК, металлургического завода им. А. К. Серова, Серовского завода ферросплавов, породные отвалы СУБРа, Серовского месторождения. Наиболее значимыми предприятиями в формировании ТМО являются: металлургический завод им. А. К. Серова, Серовский завод ферросплавов, Богословский алюминиевый завод и др. К числу городов с экологически неблагоприятной обстановкой, обусловленной наличием масштабных отвалов или хвостохранилищ, относятся: Ревда, Нижний Тагил, Кировград, Асбест, Реж, Каменск-Уральский, Красноуральск, Краснотурьинск, Серов.

Помимо лежалых отходов, формирование которых связано с деятельностью закрытых предприятий, ежегодно образуется большая масса текущих отходов действующих производств. Только за 2016 г. в Свердловской области образовалось 176,959 млн т отходов (с учетом сельскохозяйственных и коммунальных), общее же количество отходов на конец года составило 9 294,99 млн т (с учетом бесхозных объектов размещения отходов) [3]. Из анализа размещения промышленных отходов (табл. 1) следует, что превалирующая их доля, скопившаяся в отвалах, характерна для Южного управленческого округа, скопление ТМО в хвостохранилищах в большом количестве связано с деятельностью предприятий Северного управленческого округа. Большую угрозу для ухудшения экологической обстановки представляют отвалы, которые занимают 76,3 % в общей величине промышленных отходов, и более 76 % из них расположено на территории Южного управленческого округа. Что касается хвостохранилищ, то составляя примерно четверть от общей величины отходов, на 76,6 % они сосредоточены в границах Северного округа. В целом на одного жителя Южного округа приходится примерно 9000 т отходов – больше, чем в любом другом округе, при том, что в этом округе самая высокая плотность населения.

Зависимость состояния здоровья населения от загрязнения окружающей среды ТМ. Отходы воздействуют на все элементы природной среды, при этом отходы в отстойниках по экологическому классу опасности в ряде случаев более вредны, чем отходы в отвалах, и имеют более высокий риск техногенных аварий. Особую опасность представляет миграция тяжелых металлов (ТМ) из отходов в окружающую среду. Наличие ТМ в отходах, формирующихся в процессе добычи, первичной переработки, металлургического передела, обуславливает металлоносность рудо- и литосубстрата. В качестве примера могут рассматриваться геохимические ассоциации химических элементов, присущие некоторым типам рудных месторождений (табл. 2: составлено по [4, с. 21]).

При пылении отходов, инфильтрации атмосферных осадков через отходы происходит загрязнение атмосферы и водных ресурсов. Подвижные формы ТМ мигрируют во всех направлениях от центра воздействия, загрязняют почву и растительность. Экологическая ситуация как неудовлетворительная начинает оцениваться уже на расстоянии 12–14 км от месторасположения источника за-

грязнения [5]. Формируются так называемые экологические зоны с разной степенью загрязнения окружающей среды, в первую очередь почв [6, 7]. Их опасность для человека заключается в том, что ТМ, мигрируя в воду и почву, накапливаются в растениях и по пищевой цепочке поступают в организм человека, вызывая разнообразные виды заболеваний.

Для Урала, в том числе Свердловской области, где осуществлялось длительное интенсивное освоение минерального сырья, характерно существенное накопление ТМ в депонирующих средах, напрямую связанное с деятельностью горнодобывающих и металлургических предприятий. Размещение отходов (ТМО), антропогенных по своему происхождению и аномальных по содержанию ТМ, приурочено, как указывалось ранее, к промышленным узлам и районам, а их состав определяется геохимической специализацией вмещающих пород основных формаций, определяемых геологическим строением Уральского горно-складского пояса и его металлогенией.

Таблица 2. Геохимические ассоциации химических элементов
Table 2. Geochemical associations of chemical elements

Месторождения	Геохимическая ассоциация
Медно-никелевые	Cu, Ni, Co, Ba, Pb, Zn, Ag, Bi, Sn, Be, W, Zr
Медные	Ba, As, Pb, Zn, Ag, Sn, Cu, Bi, Co, Ni, Mo
Медистые песчаники	Cu, Ag, Pb, Ba, Bi, W, Cr, Zn, Mo
Оловорудные	Sn, Pb, As, Cu, Bi, Zn, Ag, Mo, Co, Ni, W
Медно-молибденовые	Cu, Mo, As, Ag, Pb, Zn, Bi, Co, Ni, Be, W
Ртутные	Hg, Ba, Ag, Pb, Zn, Cu, Co, Ni, Sn, No, W

Обратная реакция кардинально преобразованных ландшафтов, которая проявляется в ухудшении окружающей среды (загрязнение атмосферы, питьевой воды, почвы и, как следствие, продуктов питания), в конечном счете приводит к ухудшению здоровья населения (росту заболеваний, инвалидности, смертности). Взаимозависимость между загрязнением окружающей среды и состоянием здоровья населения на сегодня имеет многократное подтверждение [8–10]. Так, повышенное содержание свинца в крови может вызывать психические расстройства у детей. Доказано, что избыточное поступление ТМ в организм человека снижает иммунитет, вызывает патологию эндокринной системы, установлена взаимозависимость между наличием кадмия в моче и признаками почечных заболеваний. В работе [11] анализируется зависимость заболеваемости населения от загрязнения территории, обусловленного влиянием хвостохранилища Садонского свинцово-цинкового комбината. Прямым следствием влияния мышьяка, свинца, молибдена, цинка, сурьмы, концентрация которых в несколько раз превышает предельно допустимую, является мочекаменная болезнь, хронический бронхит, пневмокориоз и др. Высокие коэффициенты корреляции выявлены между распространением болезней системы кровообращения и дыхания и выбросами оксидов меди, свинца, цинка, хрома, окиси ванадия, марганца и других загрязнителей.

Авторы [12] на примерах состояния здоровья населения, находящегося в радиусе воздействия эксплуатируемых месторождений полезных ископаемых, доказывают существование дополнительного ущерба, обусловленного ростом заболеваемости и смертности по сравнению с контрольным городом. В числе рассматриваемых объектов: город Орск, находящийся в 13 км от Орско-Халиловского железорудного горно-металлургического комбината; город Качканар, расположенный в радиусе влияния выбросов железорудного горно-металлургиче-

ского комбината ОАО «ЕВРАЗ Качканарский ГОК»; рудничный поселок месторождения Акчатау, город Сибай, испытывающий воздействие карьера, его отвалов, обогатительной фабрики и хвостохранилища отрабатываемого Cu-Zn колчеданного месторождения; поселок Октябрьский, население которого попадает под воздействие Приаргунского горно-химического комбината. Достаточно обширный обзор по рассматриваемой проблеме представлен в работе [13], где на основе анализа 36 источников подтверждается прямая взаимосвязь между загрязнениями окружающей среды и ухудшением здоровья населения.

О неблагополучии экологической безопасности на территории Свердловской области говорят данные о заболеваемости, приведенные в [14] (табл. 3).

Таблица 3. Показатели оценки воздействия на здоровье населения факторов загрязнения среды обитания, %

Table 3. Assessment indices of human environment contamination factors impact on the health of the population, %

Показатель	Годы			
	2003	2005	2006	2007
Количество случаев заболеваний, обусловленных загрязнением окружающей среды на территориях с неблагоприятной экологической обстановкой, случ./1000 чел.	100	136,7	149,6	136,7
в том числе: взрослое население	100	133,7	158,8	133,7
дети	100	138,0	145,9	138,0
Средняя продолжительность жизни, лет	63,7	63,2	64,9	65,8

При этом данные общей и первичной заболеваемости взрослого населения болезнями системы кровообращения (БСК) количественно растут: в 2011 г. 177,5 случаев на 1000 человек, в 2015 – 198, 3 случаев на 1000 человек и в 2011 г. 26,2 случаев на 1000 человек, в 2015 г. – 33,9 случаев на 1000 человек; соответственно, как и динамика новообразований – 379,4 случаев на 100 тыс. человек в 2011 г. и 392,8 случаев на 100 тыс. человек в 2015 г. В результате в 2015 г. показатель заболеваемости по БСК по Свердловской области превысил аналогичный по УрФО на 20 % и по РФ – на 10,9 %. Показатель заболеваемости по новообразованиям – на 11 % и 10,8 % соответственно. Подтверждением неблагополучия служат и данные о смертности [15], из которых следует, что общие показатели смертности, в том числе от болезней системы кровообращения, от новообразований и туберкулеза, по Свердловской области превышают аналогичные по УрФО и по Российской Федерации.

Проблема ухудшения условий жизни, возрастания риска заболеваемости и смертности имеет особо высокую степень в условиях населенных пунктов, имеющих большую массу размещаемых и накопленных отходов. К их числу относятся города: Нижний Тагил, Каменск-Уральский, Кировград, Красноуральск, Ревда, Асбест, Серов и Реж. Если учесть, что население данных городов составляет 928,22 тыс. человек, то почти четверть населения Свердловской области проживает на территориях с неблагополучной экологической ситуацией, обусловленной, в первую очередь, техногенным воздействием отходов на окружающую среду. Ряд образовавшихся отходов классифицируются как источники с наибольшей степенью опасности воздействия на окружающую среду. В их числе: шламохранилища рудничных и сточных вод, отражательных печей, обогатительной фабрики, огарков (г. Кировград), шламохранилище (ОАО «ВГОК»), шламохранилище

фосфогипса (ОАО «Святогор»), шламохранилище обогатительной фабрики (ОАО «Уралэлектромедь») и другие.

Решение проблемы обеспечения экологической безопасности. Реальность угрозы ухудшения качества жизни населения и невозможность создания условий для безопасной и здоровой жизни граждан предопределяет приоритетность решения проблемы обеспечения экологической безопасности за счет сокращения объемов накопленных и образующихся текущих отходов на урбанизированных территориях, в первую очередь тех, которые относятся к числу экологически неблагополучных [16, 17]. Задача внедрения энерго-, ресурсосберегающих и малоотходных технологий в целях предотвращения или снижения объема текущих отходов, а также вовлечение в производство все большего количества отходов производства и потребления, организация их переработки определяется в числе необходимых для обеспечения рационального использования природных ресурсов и их комплексов, что способствует реализации цели Концепции экологической безопасности Свердловской области на период до 2020 г., которая формулируется как «обеспечение благоприятного состояния окружающей среды и создание условий для повышения качества жизни граждан, сохранение и восстановление естественных экосистем, природных ландшафтов и природных комплексов» [18, с. 15].

Цель и задачи Концепции отражают общую целевую направленность Основ государственной политики в области экологического развития РФ на период до 2030 г., где для достижения стратегической цели предусматривается в том числе решение задачи экологически безопасного обращения с отходами (предупреждение, сокращение образования отходов, их вовлечение в хозяйственный оборот, внедрение ресурсо- и малоотходных технологий, повышение безопасности их обезвреживания, размещения, захоронения, экологическое восстановление территорий после эксплуатации отходов и т. д.). Подобная целевая ориентация имеет прямое отношение и к Стратегии экологической безопасности РФ на период до 2025 г., в которой предусматривается решение задачи эффективного использования природных ресурсов, повышения уровня утилизации отходов производства и потребления, а также ликвидации накопленного вреда окружающей среде при развитии системы эффективного обращения с отходами производства и потребления, создания индустрии утилизации.

Специфические особенности проблем природопользования Свердловской области, относящейся к старопромышленному типу территории, что обусловило четвертое место среди десятка регионов, имеющих наибольший объем образования отходов, предопределили приоритетность решения проблем, связанных с накоплением и образованием отходов производства. Это потребовало разработки Стратегии по обращению с отходами производства на территории Свердловской области до 2030 г., утвержденной постановлением Правительства Свердловской области 29.04.2015 №324-ПП, базирующейся на требованиях федерального и областного законодательства, и включения задачи по обеспечению безопасного обращения с отходами производства и потребления в числе первоочередных в государственную программу Свердловской области «Обеспечение рационального и безопасного природопользования на территории Свердловской области до 2020 года», подпрограмму «Обеспечение благоприятного состояния окружающей среды как необходимого условия улучшения качества жизни и здоровья населения».

Выводы. Основными механизмами, которые должны использоваться при государственном регулировании обращения с ТМО на региональном уровне, согласующимися с теми, что находят применение на федеральном уровне, являются:

– совершенствование нормативно-правовой базы в сфере обращения с отходами производства, введение большего числа законов прямого действия; своевре-

менность подготовки нормативного сопровождения федеральных и областных законов;

– постановка всеобъемлющей системы учета ТМО (уточнение классификации ТМО), ведение кадастра, выявление и регистрация бесхозных ТМО; дополнение информации о техногенных месторождениях сведениями эколого-экономической эффективности их освоения;

– создание необходимых условий для перехода на наилучшие доступные технологии, успешной реализации системы технического регулирования процессов сбора, транспортировки, переработки, утилизации, обезвреживания и захоронения ТМО;

– создание эффективного экономического механизма регулирования деятельности по обращению с отходами с использованием опыта развитых стран, успешно реализующих систему экономических мер, стимулирующих предотвращение, снижение объема образования и ликвидации накопленного ущерба, обусловленного отходами производства;

– планирование деятельности по обращению с ТМО на стратегическом уровне с выделением ее приоритетных направлений, участие в выполнении федеральных, разработка и выполнение региональных программ в области обращения с ТМО; реализация пилотных инвестиционных проектов;

– развитие государственно-частного партнерства в сфере обращения с отходами производства, создание благоприятных условий для развития экологического предпринимательства, в том числе в сфере обращения с ТМО;

– развитие системы экологического образования, повышение квалификации кадров, принимающих участие в области обеспечения экологической безопасности;

– информированность населения об источниках негативного воздействия на окружающую среду, качестве окружающей среды и предпринимаемых мерах по ее улучшению.

Использование указанных механизмов позволит наиболее эффективно решать проблему экологической безопасности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Осипов В. И. Экологические проблемы России // Геоэкология. 2004. № 1. С. 5–12.

2. Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года, утв. Указом Президента РФ от 19.04.2017 № 176. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

3. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды в Свердловской области в 2016 году. Екатеринбург, 2017. 328 с.

4. Трофимов В. Г., Зилинг Д. Г. Экологическая геология. М.: Геоинформмарк, 2002. 415 с.

5. Cannata M. G., Carvalho R., Detroli A., Augusto A. S., Dastos A. R., Carvalho Y. G., Freitas M. P. Effects of cadmium and leadon plant growth and content of neavy metals in arugula cultivated in nutritive solutijn // Commun. Soil Sci. and Plant Anal. 2013. Vol. 44. No. 5. P. 952–961.

6. Игнатьева М. Н., Литвинова А. А., Косолапов О. В. Экономическая оценка экологических последствий освоения минеральных ресурсов // Известия вузов. Горный журнал. 2012. № 7. С. 13–16.

7. Игнатьева М. Н., Литвинова А. А., Косолапов А. В. К методическому обеспечению прогнозирования экологических последствий воздействия добычи нефти и газа в северных регионах // Известия вузов. Горный журнал. 2011. № 7. С. 70–76.

8. Kermani M., Dowlati M., Jafari A. J., Kalantari R. R. Number of mortality, chronic obstructive pulmonary disease and acute myocardial infarction due to exposure to sulfur dioxide in Tehran, during 2005–2014 // Koomesh. 2018. Vol. 20. Issue 1. P. 34–42.

9. Pun V. C., Tian L. Short-term effects of fine and coarse particles on deaths in Hong Kong elderly population: An analysis of mortality displacement // Environmental Pollution. 2018. Vol. 241. P. 148–154.

10. Guo H., Huang S., Chen M. Air pollutants and asthma patient visits: Indication of source influence // Science of the Total Environment. 2018. Vol. 625. P. 355–362.

11. Голик В. И., Бурдзиева О. Г. Комплексная оценка влияния хвостохранилища на здоровье населения горнопромышленного региона // Безопасность труда в промышленности. 2015. № 12. С. 57–61.

12. Россман Г. И., Пикалева В. С., Королева Н. Л. Проблема эколого-экономической оценки ущерба здоровью населения при составлении ТЭО кондиций и проектов освоения месторождений минерального сырья // Разведка и охрана недр. 2015. № 11. С. 52–58.

13. Потапова И. И., Карцева Е. В., Корешкова С. В., Щетинина И. А. Экологические проблемы и здоровье населения России // Экономика природопользования. 2016. № 1. С. 15–33.
14. О состоянии здоровья граждан, проживающих в Свердловской области в 2015 году: доклад к постановлению Правительства Свердловской области от 12.10.2016 № 707-ПП. Доступ из справ.-правовой системы «Гарант».
15. Обеспечение рационального и безопасного природопользования на территории Свердловской области до 2020 года: государственная программа, утв. Правительством Свердловской области от 21.10.2013 №1269-ПП. Доступ из справ.-правовой системы «Техэксперт».
16. Towards a thematic strategy on the prevention and recycling of waste. Commission of the European Communities. Communication from the Commission. Brussels, 27.05.2003, COM(2003)301 final.
17. Stimulating technologies for sustainable development: an environmental technologies action plan fhe the European Union. Comission of the European Communities. Communication from the Council and the European Parliament. Brussels, 28.01.2004, COM (2004) 38 final.
18. Концепция экологической безопасности Свердловской области на период до 2020 года, утв. постановлением Правительства Свердловской области 28.07.2009 № 865-ПП. Доступ из справ.-правовой системы «Техэксперт».

Поступила в редакцию 15 марта 2018 года

Стровский В. Е., Кубарев М. С. Обеспечение экологической безопасности в условиях моногородов горнопромышленного комплекса // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 6. С. 99–108.

Сведения об авторах:

Стровский Владимир Евгеньевич – доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры экономики и менеджмента Уральского государственного горного университета. E-mail: rinis@mail.ru
Кубарев Михаил Сергеевич – кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики и менеджмента Уральского государственного горного университета. E-mail: kubarev.mc@mail.ru

ENSURING ECOLOGICAL SECURITY IN THE CONDITIONS OF MINING MONOTOWNS

Strovskii V. E.[1], Kubarev M. S.[1]
[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Introduction. In the modern conditions of approaching ecological crisis ecological security problem solution is of great importance.
Research aim is to improve the quality of the environment in the condition of old industrial regions specific feature of which is a great mass of cumulative wastes causing negative ecological situation primarily in monotowns whose economy is dominated by the enterprises of mining and metallurgical industry.
Research methodology. In the course of investigation the following methods were used: scientific generalization and systematization, comparative and factor analysis, and logical approach.
Results. The article reveals some distinctive features of old industrial regions including Sverdlovsk region and the main facilities generating technogenic mineral formations (TMF) in Ekaterinburg, Nizhny Tagil, and Serov systems of human settlements. Industrial wastes distribution within the boundaries of Sverdlovsk region administrative districts has been analyzed together with area the wastes occupy, thus, the major part of wastes presented by waste dumps are timed to the Southern district, tailings storage wastes are three-quarters focused at the territory of the Northern district. Heavy metals (HM) migration from wastes into the environment has been confirmed as well as their impact on the population health, including the conditions of Sverdlovsk region, and also correlation between HM composition and enclosing rock geochemical specialization. Taking into account that incidence to some extent is conditioned on the character of HM contamination, metallogeny of the Ural orogen allows forecasting the main types of diseases and the real hazard of the population quality of life degradation. The ways of solving the problem of environmental security at the local and federal levels are analyzed together with the specificity of its solution in the conditions of the old industrial regions.
Conclusions. As a result of the investigations, the priority guidelines of governmental regulation in the sphere of TMF handling are determined which make it possible to effectively solve the problem of ecological security. The author's recommendations on the environmental protection can be used when developing and pursuing the ecological policy at the local level.
Key words: wastes; contamination; incidence; ecological security; monotowns; governmental regulation.

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-99-108

REFERENCES

1. Osipov V. I. [Ecological problems in Russia]. *Geoekologiia – Environmental Geoscience*, 2004, no. 1, pp. 5–12. (In Russ.)

2. *Strategiia ekologicheskoi bezopasnosti Rossiiskoi Federatsii na period do 2025 goda, utv. Ukazom Prezidenta RF ot 19.04.2017 № 176. Dostup iz sprav.-pravovoi sistemy «Konsul'tantPlius»* [On the Strategy of Ecological Security of the Russian Federation for the period until 2025: Decree of the President of the Russian Federation of April 19, 2017, no. 176. Access from the legal reference system "Consultant Plus"]. (In Russ.)
3. *Gosudarstvennyi doklad o sostoianii i ob okhrane okruzhaiushchei sredy v Sverdlovskoi oblasti v 2016 godu* [A national report on the environmental condition and protection in Sverdlovsk region in 2016]. Ekaterinburg, 2017. 328 p.
4. Trofimov V. G., Ziling D. G. *Ekologicheskaia geologiia* [Environmental geology]. Moscow, Geoinformmark Publ., 2002. 415 p.
5. Cannata M. G., Carvalho R., Detroli A., Augusto A. S., Dastos A. R., Carvalho Y. G., Freitas M. P. Effects of cadmium and leadon plant growth and content of neavy metals in arugula cultivated in nutritive solutijn. *Commun. Soil Sci. and Plant Anal.*, 2013, vol. 44, no. 5, pp. 952–961.
6. Ignat'eva M. N., Litvinova A. A., Kosolapov O. V. [Economic evaluation of environmental impacts of mineral development]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2012, no. 7, pp. 13–16. (In Russ.)
7. Ignat'eva M. N., Litvinova A. A., Kosolapov O. V. [To methodical provision of forecasting of ecological consequences of the impact of oil extraction in northern regions]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2011, no. 7, pp. 70–76. (In Russ.)
8. Kermani M., Dowlati M., Jafari A. J., Kalantari R. R. Number of mortality, chronic obstructive pulmonary disease and acute myocardial infarction due to exposure to sulfur dioxide in Tehran, during 2005–2014. *Koomesh*, 2018, vol. 20, issue 1, pp. 34–42.
9. Pun V. C., Tian L. Short-term effects of fine and coarse particles on deaths in Hong Kong elderly population: An analysis of mortality displacement. *Environmental Pollution*, 2018, vol. 241, pp. 148–154.
10. Guo H., Huang S., Chen M. Air pollutants and asthma patient visits: Indication of source influence. Science of the Total Environment, 2018, vol. 625, pp. 355–362.
11. Golik V. I., Burdzieva O. G. [Integrated assessment of a tailingsstorage influence on the health of a mining region's population]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti – Occupational Safety in Industry*, 2015, no. 12, pp. 57–61. (In Russ.)
12. Rossman G. I., Pikaleva V. S., Koroleva N. L. [The problem of ecological-economic evaluation of health damage in the preparation of feasibility study of conditions and development projects of mineral deposits]. *Razvedka i okhrana nedr – Prospect and Protection of Mineral Resources*, 2015, no. 11, pp. 52–58. (In Russ.)
13. Potapova I. I., Kartseva E. V., Koreshkova S. V., Shchetinina I. A. [Ecological problems and health of population in Russia]. *Ekonomika prirodopol'zovaniia – Environmental Economics*, 2016, no. 1, pp. 15–33. (In Russ.)
14. *O sostoianii zdorov'ia grazhdan, prozhivaiushchikh v Sverdlovskoi oblasti v 2015 godu: doklad k postanovleniiu Pravitel'stva Sverdlovskoi oblasti ot 12.10.2016 № 707-PP. Dostup iz sprav.-pravovoi sistemy «Garant»* [On the Health Status of the Population of Sverdlovsk Region of October 12th, 2016, no. 707-PP. Access from the legal reference system "Garant"]. (In Russ.)
15. *Obespechenie ratsional'nogo i bezopasnogo prirodopol'zovaniia na territorii Sverdlovskoi oblasti do 2020 goda: gosudarstvennaia programma, utv. Pravitel'stvom Sverdlovskoi oblasti ot 21.10.2013 № 1269-PP. Dostup iz sprav.-pravovoi sistemy «Tekhekspert»* [Ensuring Rational and Safe Nature Resource Management at the Territory of Sverdlovsk Region until 2020: Government Program approved by the Government of Sverdlovsk Region of October 10th, 2013, no. 1269-PP. Access from the legal reference system "Tekhekspert"]. (In Russ.)
16. Towards a thematic strategy on the prevention and recycling of waste. Commission of the European Communities. Communication from the Commission. Brussels, 27.05.2003, COM(2003)301 final.
17. Stimulating technologies for sustainable development: an environmental technologies action plan fhe the European Union. Comission of the European Communities. Communication from the Council and the European Parliament. Brussels, 28.01.2004, COM (2004) 38 final.
18. *Kontseptsiia ekologicheskoi bezopasnosti Sverdlovskoi oblasti na period do 2020 goda, utv. postanovleniem Pravitel'stva Sverdlovskoi oblasti 28.07.2009 № 865-PP. Dostup iz sprav.-pravovoi sistemy «Tekhekspert»* [Concept of Ecological Safety of Sverdlovsk Region for the Period until 2020, approved by the Governmental Decree of Sverdlovsk Region of July 28th, 2009, no. 865-PP. Access from the legal reference system "Tekhekspert"]. (In Russ.)

Information about authors

Strovskii Vladimir Evgen'evich – Doctor of Economic sciences, Professor, professor of the Department of Economics and Managements, Ural State Mining University. E-mail: rinis@mail.ru
Kubarev Mikhail Sergeevich – Candidate of Economic sciences, associate professor of the Department of Economics and Managements, Ural State Mining University. E-mail: kubarev.mc@mail.ru

УДК 621.867 DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-109-117

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНВЕЙЕРА С ЗАГРУЗОЧНЫМ БУНКЕРОМ ПРИ СТУПЕНЧАТОМ РЕГУЛИРОВАНИИ СКОРОСТИ

РЕУТОВ А. А.[1]

[1] Брянский государственный технический университет
(Россия, г. Брянск, бульв. 50 лет Октября, 7)

Введение. *Рассмотрены особенности работы конвейеров при нерегулярных грузопотоках. Проанализированы возможности регулирования скорости конвейера. Показано, что для повышения точности расчетов конвейерных систем необходимо моделирование их работы с реальными значениями грузопотоков.*

Цель работы. *Разработка процедуры оптимизации параметров конвейера с загрузочным бункером при ступенчатом регулировании скорости конвейера.*

Методика проведения исследований. *Сформулирована задача оптимизации параметров конвейера с загрузочным бункером при ступенчатом регулировании скорости конвейера. В качестве частных критериев оптимальности приняты номинальная производительность конвейера, емкость бункера, среднее значение скорости. Количество переключений скорости за время моделирования учтено как ограничение. Для определения значений частных критериев оптимальности проведено имитационное моделирование процесса ступенчатого регулирования скорости конвейера с использованием программы Mathcad. Оптимальные параметры транспортной системы выбраны из Парето-доминирующих решений с использованием обобщенного критерия – суммы амортизационных отчислений от капитальных затрат и затрат на электроэнергию.*

Анализ и обсуждение результатов. Отличием процедуры оптимизации является учет алгоритма регулирования скорости конвейера и реальной реализации грузопотока вместо его вероятностных характеристик. Рассмотренный пример оптимизации с использованием 130 дискретных значений грузопотока и программы Mathcad показал, что установка загрузочного бункера позволяет снизить номинальную производительность конвейера на 10–30 %. Пять лучших Парето-доминирующих решений примера включают конвейер с минимальной шириной ленты. Разработанная процедура имитационного моделирования может быть использована для оптимизации параметров и других транспортных систем с нерегулярными грузопотоками.

Ключевые слова: *ленточный конвейер; загрузочный бункер; регулирование скорости; критерии оптимальности; имитационное моделирование; амортизационные отчисления.*

Введение. Грузопотокам горных предприятий присуща неравномерность, обусловленная особенностями работы забойного оборудования [1, 2]. Для сглаживания неравномерности грузопотоков системы непрерывного транспорта горных предприятий включают аккумулирующие бункеры в местах загрузки и перегрузки.

По результатам статистической обработки эмпирических данных грузопотоков проектными организациями разработаны рекомендации по определению параметров конвейеров и бункеров, соответствующих характеристикам забойного оборудования.

В [3] приведена методика расчета емкости $E_б$ загрузочного бункера конвейера угольной шахты:

$$E_б = Q_{max} K_б,$$

где Q_{max} – максимальный минутный грузопоток, поступающий в бункер; $K_б$ – нормативный коэффициент, табличные значения которого составлены на основе эмпирических данных.

Эту методику нельзя использовать для транспортных систем, характеристики грузопотоков которых недостаточно изучены.

Вероятностные методы расчета транспортных систем применимы для грузопотоков с устойчивыми характеристиками, однако в большинстве случаев забойные грузопотоки не являются ни стационарными, ни нормальными случайными процессами. Поэтому их статистические характеристики можно использовать лишь для ориентировочных расчетов.

Неполная загрузка конвейера ведет к гиперболическому увеличению удельных энергозатрат на транспортирование. Так, работа конвейера с 25 %-ной загрузкой увеличивает энергозатраты на 160 % по сравнению с номинальной загрузкой [4].

Для горных предприятий с учетом технологии добычи необходимо использовать значения фактического грузопотока за рабочую смену или за сутки. Результаты замеров грузопотока и мощности привода магистрального ленточного конвейера 2ЛУ120 в течение 4 сут. на шахте «Должанская-Капитальная» представлены в [5].

В [6] описано применение программируемого логического контроллера для управления конвейерной системой электростанции вместо полуавтоматической системы управления на основе реле. Отмечается повышение надежности управления, возможность мониторинга конвейерной системы в реальном времени.

Стратегия управления ленточным конвейером с использованием теории нейронной сети для оптимизации параметров ПИД-регулятора скорости, позволяющая устранить неравномерности движения ленты, предложена в [7].

В [8] представлен метод нечеткого управления ленточными конвейерами для повышения их энергоэффективности. Отмечено, что дискретное управление предпочтительно при регулировании скорости ленты, а нечеткая логика применяется для изменения скорости загрузки.

В [9] разработана система управления транспортной системой угольной шахты, включающей угольный комбайн, участковый конвейер и магистральный конвейер с загрузочным бункером, но оптимизация параметров транспортной системы не рассмотрена. Для более точных расчетов необходимо моделирование работы транспортных систем с реальными значениями грузопотоков за установленное время [10].

Возможности регулирования скорости конвейера. Важным способом снижения эксплуатационных расходов горного транспорта является регулирование скорости транспортирования груза в соответствии с фактическим грузопотоком.

Грузопоток, поступающий на конвейер из забоя, изменяется почти непрерывно. Если устройство регулирования также изменяет скорость конвейера непрерывно в соответствии с изменением грузопотока, то конвейер постоянно работает в переходном динамическом режиме с повышенным износом и энергозатратами. Ступенчатое регулирование скорости сокращает количество и время переходных динамических процессов, повышает эффективность работы конвейера за счет обеспечения полной загрузки ленты без просыпания груза, уменьшения потерь энергии и износа узлов конвейера [11].

Установка загрузочного бункера сглаживает неравномерность грузопотока и позволяет использовать конвейер меньшей производительности. Стационарный загрузочный бункер устанавливают в месте перегрузки с участкового конвейера на магистральный. Небольшой загрузочный бункер, перемещаемый вместе с забоем, может быть установлен в месте загрузки участкового конвейера [12].

В [13] предложен способ регулирования скорости конвейера с загрузочным бункером, согласно которому загрузку бункера производят независимо от работы конвейера, если уровень заполнения бункера ψ не превышает предельного значения Ψ_N.

Конвейер включают, если уровень заполнения ψ бункера больше начального значения Ψ_0. Автоматизированный питатель непрерывно подает груз из бункера на конвейер в соответствии с текущей приемной способностью конвейера.

Затем скорость конвейера изменяют до значения V_i, если значение уровня заполнения ψ соответствует условию $\Psi_{i-1} < \psi \le \Psi_i$, а $V \ne V_i$, $i = 1 \ldots N$ (Ψ_i – значение i-го уровня заполнения бункера; V_i – значение i-й ступени скорости ленты; N – количество ступеней регулирования скорости конвейера), или обеспечивают скорость конвейера $V = V_n$, если $\psi > \Psi_N$ (V_n – номинальная скорость конвейера).

Конвейер останавливают, если уровень заполнения ψ бункера меньше начального значения ψ_0, или скорость V не принимает значения V_i в течение времени регулирования, или система управления подала команду остановки конвейера.

Цель работы – разработка процедуры оптимизации параметров конвейера с загрузочным бункером при ступенчатом регулировании скорости конвейера.

Методика проведения исследований. Рассмотрим транспортную систему, состоящую из загрузочного бункера и конвейера со ступенчатым регулированием скорости. Поступающий в бункер грузопоток $Q_с$ представим массивом данных регулярных замеров, произведенных с интервалом t_Q.

Сформулируем задачу оптимизации. Оптимизируемыми параметрами транспортной системы являются количество ступеней регулирования скорости конвейера N, значения скоростей ступеней V_i, значения уровней заполнения бункера ψ_i. Примем, что количество фиксированных значений уровня заполнения бункера равно количеству ступеней регулирования скорости N.

Критериями оптимальности являются емкость бункера $E_б$, номинальная производительность конвейера Q_n, среднее значение скорости $V_{ср}$.

Количество переключений скорости $N_п$ за время моделирования будем рассматривать как ограничение. С учетом времени разгона и торможения конвейера, необходимого для изменения его скорости, экспертная оценка ограничения имеет вид: $N_п < 3$ мин$^{-1}$ при $N = 1$; $N_п < 4$ мин$^{-1}$ при $N = 2$ и $N_п < 6$ мин$^{-1}$ при $N = 3$.

Имитационное моделирование регулирования скорости конвейера. Целью имитационного моделирования процесса регулирования скорости конвейера является определение значений критериев оптимальности при заданных параметрах способа регулирования и данных замеров грузопотока $Q_с$.

На каждом шаге моделирования проведем повторяющиеся вычисления текущих значений уровня заполнения бункера ψ, скорости конвейера V:

$$\psi_k = \psi_{k-1} + Q_k - \gamma V_{k-1} t_Q,$$

где Q_k – масса груза, поступившего в бункер за время t_Q на k-м шаге, кг; ψ_k и ψ_{k-1} – текущий уровень заполнения бункера на k-м и (k–1)-м шагах, кг; V_{k-1} – скорость конвейера на (k–1)-м шаге, м/с; γ – номинальная погонная нагрузка конвейера, кг/м.

Величина номинальной погонной нагрузки γ является конструктивной характеристикой конвейера и обеспечивает его нормальную работу без просыпания груза ($\gamma = Q_n/V_n$). Величину текущей скорости V_k зададим согласно способу регулирования.

В результате моделирования получим массивы значений уровня заполнения бункера ψ и скорости конвейера V таких же размеров, что и $Q_с$. После обработки массивов определим среднее значение скорости $V_{ср}$ и количество переключений скорости $N_п$.

Процедура выбора оптимальных параметров транспортной системы. Сформированная задача оптимизации является многокритериальной. Для определения значений трех частных критериев необходимо многократное имитацион-

ное моделирование процесса регулирования скорости конвейера при допустимых значениях параметров.

Для поиска оптимальных параметров транспортной системы применим следующую вычислительную процедуру:

– сформируем реализацию грузопотока в виде массива значений массы груза, поступающего в загрузочный бункер;

– определим область допустимых значений оптимизируемых параметров;

– проведем моделирование работы транспортной системы и вычислим значения частных критериев в области допустимых значений параметров с заданным шагом;

– выберем Парето-доминирующие решения;

– сформируем обобщенный критерий эффективности транспортной системы;

– выберем оптимальное решение из Парето-доминирующих по обобщенному критерию.

В обобщенном критерии приходится совмещать частные критерии, характеризующие объект с разных сторон. Частные критерии имеют различную природу и оцениваются по разным шкалам. Построение обобщенного критерия возможно приведением частных критериев к единой единице измерения.

Таблица 1. Параметры ленточных конвейеров
Table 1. Belt conveyors parameters

Тип	$Q_п$, т/ч	$V_п$, м/с	γ, кг/м	W, кВт
1Л100	470	1,6	81,6	55
1Л80	420	2,0	58,3	55
1Л80	330	1,6	57,3	40

Пример оптимизации конвейера с загрузочным бункером. Рассмотрим пример оптимизации ступенчатого регулирования скорости подземного участкового конвейера с загрузочным бункером. В качестве исходных данных использованы 130 значений реализации случайного грузопотока угольного комбайна $Q_с$ с математическим ожиданием 73 кг/с и средним квадратичным отклонением 41,5 кг/с. Максимальные значения $Q_с$ достигают 130,5 кг/с, что соответствует теоретической производительности 470 т/ч.

Определим оптимальные значения параметров транспортной системы N, V_i, Ψ_i ($i = 1 \ldots N$) для заданной реализации случайного грузопотока с использованием критериев оптимальности $E_б$, $Q_п$, $V_{ср}$ и ограничения $N_п$.

Для поиска оптимальных значений параметров транспортной системы реализуем *этапы вычислительной процедуры*.

1. Определим область допустимых значений оптимизируемых параметров.

Для безбункерной работы транспортной системы необходим конвейер с приемной способностью не менее 130,5 кг/с (470 т/ч). При установке бункера приемная способность может быть уменьшена до 73 кг/с (263 т/ч).

Рассмотрим три типовых ленточных конвейера с шириной ленты 0,8 м и 1 м, мощностью привода W, равной 40 и 55 кВт, номинальная производительность $Q_п$ которых превышает 263 т/ч (табл. 1).

Рассмотрим одно-, двух- и трехступенчатые режимы регулирования скорости конвейера со следующими параметрами: $N = 1 \ldots 3$; $\Psi_i \in [0, 1000]$ кг; $V_i \in [0, V_п]$ м/с ($i = 1 \ldots N$).

2. Проведем имитационное моделирование процесса регулирования скорости конвейера с использованием программы Mathcad и вычислим значения частных критериев.

На рис. 1 приведены графики поступающего в бункер грузопотока Q_c, кг/с, текущего уровня заполнения бункера ψ, кг, и скорости V, м/с, конвейера 1Л80 при трехступенчатом регулировании скорости и $t_Q = 6$.

3. Выберем Парето-доминирующие решения из результатов имитационного моделирования (табл. 2).

В табл. 2 принято $E_б = 1{,}1\max\psi_k$, $k = 1 \ldots n$ (n – количество значений в массиве Q_c).

4. Сформируем обобщенный критерий экономической эффективности транспортной системы.

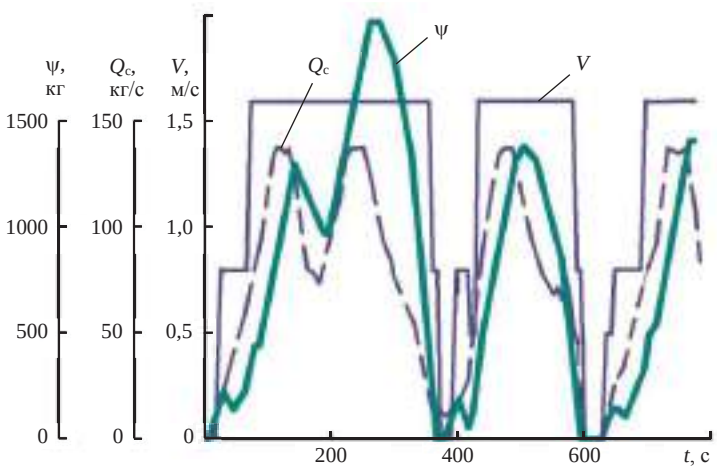

Рис. 1. Графики изменения поступающего грузопотока Q_c, текущего уровня заполнения бункера ψ и скорости конвейера V конвейера во времени (решение № 11 табл. 2)

Fig. 1. Graphs of Q_c incoming freight flow alteration, current filling level of a bunker ψ, and conveyor speed V in time (solution no. 11, table 2)

Большинство результатов имитационного моделирования являются Парето-доминирующими решениями. В табл. 2 приведены только 11 альтернатив – Парето-доминирующих решений с разными значениями параметров транспортной системы и регулирования. Для выбора оптимального решения, обеспечивающего наибольшую экономическую эффективность транспортной системы, сформируем обобщенный критерий Q. Для этого сформулируем частные критерии по-новому и приведем их к единой единице измерения (тыс. р.). Тогда оценку i-й альтернативы выразим суммой значений новых частных критериев K_{ij}

$$Q_i = \sum_{i=1}^{3} K_{ij},$$

где K_{1j} и K_{2j} – амортизационные отчисления от капитальных затрат на приобретение и монтаж конвейера и загрузочного бункера j-го решения; K_{3j} – годовые расходы на электроэнергию конвейера j-го решения.

Экономические потери от увеличения количества переключений скорости конвейера учесть сложно, поскольку отсутствуют соответствующие теоретические или эмпирические зависимости. Поэтому количество переключений скорости $N_п$ будем по-прежнему использовать как ограничение.

Амортизационные отчисления выразим через капитальные затраты на приобретение и монтаж конвейера и загрузочного бункера, сроки их амортизации.

Годовые расходы на электроэнергию вычислим через номинальную мощность и среднюю скорость конвейера:

$$K_3 = C_E W T_1 V_{ср} / V_n,$$

где C_E – тариф на электроэнергию для промышленных предприятий, тыс. р./(кВт · ч), T_1 – годовая продолжительность работы конвейера, ч.

Таблица 2. Парето-доминирующие решения
Table 2. Pareto-dominant solutions

Номер решения	V_0; V_1; V_2, м/с	Ψ_i, кг	$Q_п$, т/ч	$E_б$, кг	$V_{ср}$, м/с	$N_п$
		N = 1				
1	0; 1,6	1000	470	2060	0,89	17
2	0; 2	1000	420	2385	1,21	13
3	0; 1,6	300	330	2171	1,25	11
		N = 2				
4	0,2; 1,1; 1,6	–	470	0	1,25	11
5	0; 0,8; 1,6	100; 400	470	817	0,93	24
6	0; 0,8; 2,0	50; 400	420	1010	1,28	18
7	0; 0,8; 1,6	100; 300	330	2171	1,25	12
		N = 3				
8	0,2; 0,5; 1,1; 1,6	–	470	0	1,15	16
9	0; 0,5; 1,3; 1,6	100; 400; 1000	470	1321	0,89	23
10	0; 0,5; 1,0; 2	30; 100; 300	420	927	1,27	27
11	0; 0,5; 0,8; 1,6	50; 100; 300	330	2171	1,25	12

В табл. 3 приведены значения частных и обобщенного критериев для пяти лучших решений из табл. 2. (K_2 = 25 тыс. р./м^2 поверхности бункера; C_E = 4,69 р./(кВт · ч); T_1 = 4000 ч).

Для сравнения отметим, что конвейер 1Л100 без бункера и регулирования скорости имеет значение обобщенного критерия Q = 4157 тыс. р.

5. Выберем оптимальное решение из Парето-доминирующих.

Поскольку обобщенный критерий имеет негативный смысл, то оптимальным является решение № 11 с минимальным значением Q = 3376,3 тыс. р.

Анализ и обсуждение результатов. Вычислительная процедура оптимизации параметров конвейера с загрузочным бункером и регулирования скорости может быть реализована с использованием программ Mathcad, Matlab и др. Отличительной особенностью процедуры оптимизации является учет алгоритма регулирования скорости конвейера и реальной реализации грузопотока, а не его вероятностных характеристик.

Рассмотренный пример оптимизации при нерегулярном грузопотоке показал, что большинство результатов имитационного моделирования являются Парето-доминирующими решениями. Оптимальные параметры транспортной системы выбраны из Парето-доминирующих решений с учетом амортизационных отчислений от капитальных затрат и затрат на электроэнергию.

Для использованных в примере исходных данных пяти лучших Парето-доминирующих решений (табл. 3) включают конвейер с минимальной шириной ленты (0,8 м). Имитационное моделирование показало, что применение конвейера

с большей производительностью позволяет снизить объем загрузочного бункера, однако оптимальным оказалось решение с наименьшей среди рассмотренных производительностью конвейера.

Установка загрузочного бункера позволяет снизить номинальную производительность конвейера на 10–30 %. С увеличением емкости загрузочного бункера величина средней скорости конвейера снижается. Количество ступеней регулирования скорости в данном примере оказалось малозначимым параметром, поскольку большую часть времени работы конвейера его скорость равна номинальной (рис. 1).

Таблица 3. Значения частных и обобщенного критериев, тыс. р.
Table 3. Values of specific and general criteria, thousands of rubles

Номер решения	K_1	K_2	K_3	Q
3	2500,0	291,9	586,3	3378,2
6	2562,5	175,2	660,4	3398,1
7	2500,0	291,9	587,7	3379,6
10	2562,5	165,5	655,2	3383,2
11	2500,0	291,9	584,4	**3376,3**

Область применения результатов. Разработанная процедура применима для любого конвейера, участкового или магистрального, при известных реализациях поступающего в бункер грузопотока. Процедура имитационного моделирования может быть использована для оптимизации параметров и других транспортных систем с нерегулярными грузопотоками, например карьерного и подземного автотранспорта, а также рельсового транспорта.

Выводы. Разработанная вычислительная процедура многокритериальной оптимизации параметров конвейера с загрузочным бункером при ступенчатом регулировании скорости конвейера применима для любого конвейера, в том числе участкового или магистрального, при известных реализациях поступающего в бункер грузопотока. Для вычисления частных критериев оптимальности используется имитационное моделирование работы транспортной системы с реальным грузопотоком.

Большинство результатов имитационного моделирования являются Парето-доминирующими решениями, поэтому для выбора оптимального решения необходимо использовать обобщенный критерий.

Рассмотренный пример показал, что установка загрузочного бункера позволяет снизить номинальную производительность и среднюю скорость конвейера.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пономаренко В. А., Креймер Е. Л. Исследование внутриминутных характеристик забойных грузопотоков // Шахтный и карьерный транспорт. Вып. 4. М.: Недра, 1978. С. 27–33.

2. Мерцалов Р. В. Обобщение статистики о неравномерности забойных грузопотоков на угольных шахтах // Шахтный и карьерный транспорт. Вып. 9. М.: Недра, 1984. С. 5–13.

3. Шахмейстер Л. Г., Солод Г. И. Подземные конвейерные установки. М.: Недра, 1976. С. 27–29.

4. Semenchenko A., Stadnik M, Belitsky P., Semenchenko D., Stepanenko O. The impact of an uneven loading of a belt conveyor on the loading of drive motors and energy consumption in transportation // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Issue 4/1 (82). P. 42–51.

5. Кондрахин В. П., Стадник Н. И., Белицкий П. В. Статистический анализ эксплуатационных параметров шахтного ленточного конвейера // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер.: Гірничо-електромеханічна. 2013. № 2 (26). С. 140–150.

6. Zhang J., Che Y., Zhao L. Power plant coal conveyer coal link PLC control system // 4th Int. Conf. on Power Electronics Systems and Applications, PESA 2011, Article number 5982927.

7. Ma X .M., Gao X. X. Coal belt conveyor PID controller parameter regulation with neural network // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 319. P. 583–589.

8. Pang Y., Lodewijks G., Schott D. L. Fuzzy controlled energy saving solution for large-scale belt conveying systems // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 261–262. P. 59–64.
9. Ставицкий В. Н., Оголобченко А. С. Математическое моделирование транспортной системы добычного участка // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер.: Обчислювальна техніка та автоматизація. 2013. № 1 (24). С. 53–63.
10. Реутов А. А. Имитационное моделирование процесса ступенчатого регулирования скорости конвейера // Проблемы недропользования. 2017. № 2. С. 26–32.
11. Реутов А. А. Обеспечение загрузки конвейеров с регулируемой скоростью ленты // Вестник Брянского государственного технического университета. 2005. № 3 (7). С. 4–6.
12. Реутов А. А. Монтаж, эксплуатация и ремонт ленточных конвейеров. Брянск: БГТУ, 2008. 15 с.
13. Способ регулирования скорости конвейера с загрузочным бункером: пат. 2628830 Рос. Федерация. № 2016143662; заявл. 07.11.16; опубл. 22.08.17. Бюл. № 24.

Поступила в редакцию 21 февраля 2018 года

Реутов А. А. Оптимизация конвейера с загрузочным бункером при ступенчатом регулировании скорости // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 6. С. 109–117.

Сведения об авторах:

Реутов Александр Алексеевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры подъемно-транспортных машин и оборудования Брянского государственного технического университета. E-mail: bgtu2012@yandex.ru

OPTIMIZATION OF A CONVEYOR WITH A LOADING BUNKER UNDER DISCONTINUOUS SPEED VARIATION

Reutov A. A.[1]
[1] Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia.

Introduction. Peculiarities of conveyors operation are considered under irregular freight flows. Conveyor speed variation capabilities are analyzed. It has been revealed that in order to increase the accuracy of conveyor systems calculation it is necessary to simulate their work with real values of freight flows.
Research aim is a conveyor with a loading bunker parameters optimization procedure development under discontinuous speed variation.
Research methodology. The problem of a conveyor with a loading bunker parameters optimization is formulated under conveyor discontinuous speed variation. Conveyor nominal output, bunker capacity, and velocity average value are taken as particular criteria of optimality. The quantity of speed shifts in a time of simulation is considered as a limitation. In order to determine the values of particular criteria of optimality, simulation modeling of a conveyor discontinuous speed variation process was fulfilled on Mathcad program. Transport system optimal parameters are chosen among Pareto-dominant solutions with the use of a generalized criterion – an amount of deprecation from capital expenditures and energy cost.
Results analysis and discussion. A distinctive feature of an optimization procedure consists in taking into account the algorithm of conveyor speed variation and actual realization of a freight flow instead of its probabilistic characteristics. The examined example of optimization with the use of 130 discrete values of a freight flow and Mathcad program has shown that loading bunker installation makes it possible to reduce nominal capacity of a conveyor by 10–30%. Five best Pareto-dominant solutions of an example include a conveyor with minimum belt width. The worked out simulation modeling procedure can be used to optimize parameters of other transport systems with irregular freight flows.
Key words: belt conveyor; loading bunker; speed variation; optimality criteria; simulation modeling; deprecation.

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-109-117

REFERENCES

1. Ponomarenko V. A., Kreimer E. L. [Investigation of bottom hole freight flows characteristics within one minute]. *Shakhtnyi i kar'ernyi transport. Vyp. 4* [Shaft and open pit transport. Issue 4]. Moscow, Nedra Publ., 1978, pp. 27–33.
2. Mertsalov R. V. [Generalization of statistics on bottom hole freight flows irregularity in coal mines]. *Shakhtnyi i kar'ernyi transport. Vyp. 9* [Shaft and open pit transport. Issue 9]. Moscow, Nedra Publ., 1984, pp. 5–13.
3. Shakhmeister L. G., Solod G. I. *Podzemnye konveiernye ustanovki* [Underground conveyor units]. Moscow, Nedra Publ., 1976, pp. 27–29.
4. Semenchenko A., Stadnik M, Belitsky P., Semenchenko D., Stepanenko O. The impact of an uneven loading of a belt conveyor on the loading of drive motors and energy consumption in transportation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, issue 4/1 (82), pp. 42–51.
5. Kondrakhin V. P., Stadnik N. I., Belitskii P. V. [Statistic analysis of a shaft belt conveyor operating parameters]. *Naukovi pratsi Donets'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universitetu. Girnicho-elektromekhanichna – Scientific Papers of Donetsk National Technical University. Mining Electromechanics*, 2013, no. 2 (26), pp. 140–150.

6. Zhang J., Che Y., Zhao L. Power plant coal conveyer coal link PLC control system. *4th Int. Conf. on Power Electronics Systems and Applications*, PESA 2011, Article number 5982927.
7. Ma X .M., Gao X. X. Coal belt conveyor PID controller parameter regulation with neural network. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 319, pp. 583–589.
8. Pang Y., Lodewijks G., Schott D. L. Fuzzy controlled energy saving solution for large-scale belt conveying systems. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 261–262, pp. 59–64.
9. Stavitskii V. N., Ogolobchenko A. S. [Mathematical modeling of production site transport system]. *Naukovi pratsi Donets'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universitetu. Obchisliuval'na tekhnika ta avtomatizatsiia – Scientific Papers of Donetsk National Technical University. Computer Engineering and Automatics*, 2013, no. 1 (24), pp. 53–63.
10. Reutov A. A. [Simulation of the conveyor speed step control]. *Problemy nedropol'zovaniia – The Problems of Subsoil Use*, 2017, no. 2, pp. 26–32. (In Russ.)
11. Reutov A. A. [Providing load of conveyors with controlled belt speed] *Vestnik Brianskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Bryansk State Technical University*, 2005, no. 3 (7), pp. 4–6. (In Russ.)
12. Reutov A. A. *Montazh, ekspluatatsiia i remont lentochnykh konveierov* [Installation, operation, and maintenance of belt conveyors]. Bryansk, BSTU Publ., 2008. 15 p.
13. *Sposob regulirovaniia skorosti konveiera s zagruzochnym bunkerom* [A method of controlling the speed of a conveyor with a loading bunker]. Patent RF, no. 2628830, 2007.

Information about authors

Reutov Alexander Alexeevich – Doctor of Engineering sciences, professor of the Department of Mechanical-Handling Machines and Equipment, Bryansk State Technical University. E-mail: bgtu2012@yandex.ru

УДК 622.271.3.06.012.32:622.68 DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-118-126

ФОРМИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ КАРЬЕРОВ С УЧЕТОМ АДАПТАЦИИ К ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ УСЛОВИЯМ РАЗРАБОТКИ ГЛУБОКОЗАЛЕГАЮЩИХ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

ЯКОВЛЕВ В. Л.[1], ЯКОВЛЕВ В. А.[1]
[1] Институт горного дела УрО РАН
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58)

Целью статьи *является обоснование необходимости адаптации транспортной системы к изменяющимся условиям разработки месторождения с ростом глубины карьера.*
Методология*. Предложено два варианта методологического подхода к обоснованию стратегии формирования транспортной системы карьера: на действующих предприятиях и при освоении запасов новых месторождений. Составными частями теории формирования транспортных систем глубоких карьеров являются: исследование закономерностей формирования грузопотоков при поэтапной разработке месторождений; обоснование оптимальной продолжительности отработки отдельных этапов, сроков долговременной консервации и расконсервации временно нерабочих бортов карьеров под транспортными коммуникациями.*
Результаты исследования. *На основе изучения опыта проектирования и эксплуатации карьеров большой глубины и производительности, а также многолетних научных исследований установлено, что к моменту освоения проектной мощности по полезному ископаемому и горной массе невозможно создать транспортную систему, которая могла бы обеспечить эффективную разработку месторождения в течение всего срока службы карьера.*
Выводы. *Показано, что в условиях непрерывного роста глубины рабочей зоны карьера, нарастания геологической, горнотехнической и технико-экономической информации требуется выделение этапов формирования карьерного пространства, изменение параметров систем разработки, развитие транспортной системы карьера путем одновременного, последовательного и комбинированного применения нескольких видов и технических средств транспорта с учетом достоинств и недостатков отдельных видов транспорта, выделены зоны их эффективного применения по глубине карьера.*

Ключевые слова: *транспортная система; карьерный транспорт; глубокие карьеры; переходные процессы; поэтапное развитие; сложноструктурные месторождения.*

Опыт эксплуатации карьеров, практика проектирования новых и реконструкции действующих горнодобывающих предприятий, результаты многолетних научных исследований свидетельствуют о том, что для карьера глубиной более 200–300 м к моменту освоения проектной мощности невозможно создать транспортную систему, которая могла бы обеспечить эффективную разработку месторождения в течение всего срока службы карьера [1, 2].

Специфика освоения глубокозалегающих сложноструктурных месторождений твердых полезных ископаемых состоит в том, что их разработка продолжается десятки лет. Начинаясь с открытой геотехнологии, в условиях непрерывного роста глубины рабочей зоны карьера характеризуется нарастанием геологической, горнотехнической и технологической информации и требует безусловного выделения

Статья подготовлена по материалам исследований по проекту 18-5-5-10 Программы фундаментальных исследований УрО РАН.

этапов формирования карьерного пространства, изменения параметров систем разработки, формирования транспортной системы карьера путем применения новых видов транспорта и т. д., т. е. практически пересмотра большинства принятых проектных решений, в том числе уточнения глубины карьера и необходимости перехода к подземной или комбинированной разработке месторождения.

Главной причиной исследования переходных процессов в технике и технологии горно-обогатительного производства минерального сырья является высочайшая степень зависимости от природной изменчивости геологических параметров глубокозалегающих сложноструктурных месторождений, информация о которых нарастает по мере развития горных работ [3–5], что требует, наряду с изменением горнотехнических условий, периодического перехода на новые параметры техники и технологии с целью адаптации горнотехнической системы к изменяющимся условиям функционирования горно-обогатительного производства [6].

Разработка глубоких крутопадающих месторождений осуществляется поэтапно, с выделением промежуточных контуров, временной консервацией части рабочих бортов карьера, в связи с чем при переходе от одного этапа к другому перестройка транспортной системы карьера становится неизбежной [7].

В процессе развития карьера, смены условий разработки и транспортирования горной массы эффективность различных видов транспорта изменяется неодинаково, поэтому для обеспечения оптимальных параметров транспортной системы карьера необходимо ее периодическое обновление с введением новых видов транспорта.

Технический прогресс в развитии действующих и создании новых видов транспорта за длительный период эксплуатации карьера позволяет неоднократно менять оценку эффективности применения тех или иных видов транспорта и пересматривать решение о целесообразности их применения в конкретных горнотехнических условиях.

В научно-методическом плане решение транспортной проблемы глубоких карьеров имеет следующую специфику: вместо решения задачи о выборе вида транспорта, как она обычно формулировалась многие годы, стоит вопрос о разработке научно обоснованной теории последовательного формирования транспортных систем глубоких карьеров в течение всего срока службы до конца отработки месторождения.

Составными частями теории формирования транспортных систем глубоких карьеров являются:

– исследование закономерностей формирования грузопотоков при поэтапной разработке месторождений;

– обоснование оптимальной продолжительности отработки отдельных этапов, сроков долговременной консервации и расконсервации временно нерабочих бортов карьеров под транспортными коммуникациями;

– техническая и технологическая оценки основных видов карьерного транспорта и обоснованно рациональных параметров и условий их применения в общей транспортной системе глубоких карьеров в различные периоды их эксплуатации;

– разработка критерия оптимальности стратегии формирования транспортной системы до конца отработки месторождения;

– разработка методики определения моментов перехода на новые виды и схемы транспорта и установления пространственных границ рациональной эксплуатации различных видов транспорта в предельных контурах карьера;

– оптимизация параметров погрузочного и транспортного оборудования и элементов транспортной системы карьера с учетом динамики горнотехнических ус-

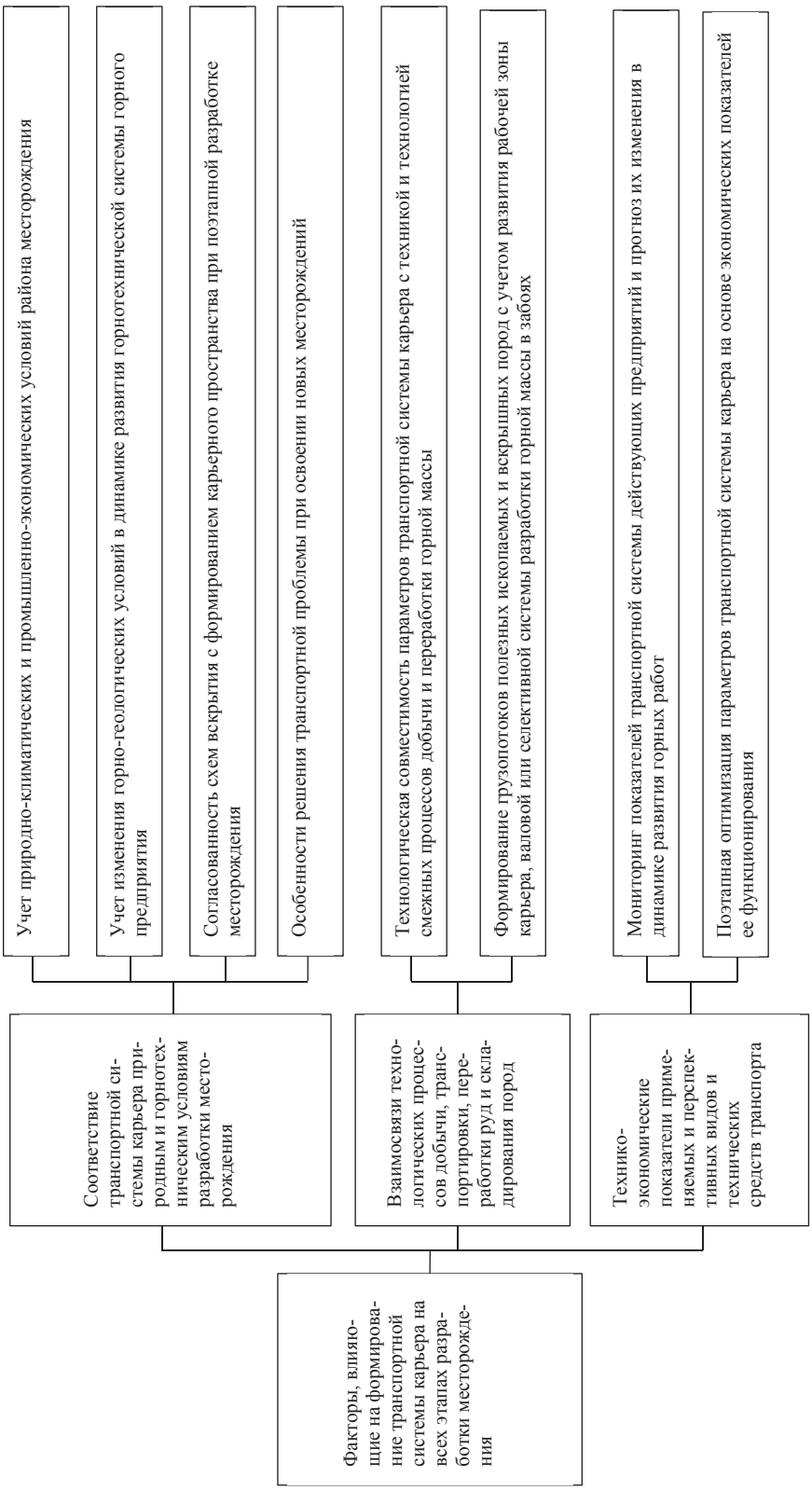

Рис. 1. Систематизация факторов, влияющих на формирование транспортной системы карьера при разработке глубокозалегающих сложноструктурных месторождений

Fig. 1. Systematization of the factors which influence the formation of open pit transport system when developing deep-lying complex structured deposits

ловий и соответствующих им технико-экономических показателей используемых видов и технических средств транспорта;

– типизация схем формирования транспортных систем глубоких карьеров.

Обобщающим принципом, которым следует руководствоваться при решении всех вопросов, связанных с транспортом, является оптимизация параметров транспортной системы карьера на всех этапах разработки месторождения. Этот принцип может быть сформулирован в виде целевой функции и учитывает непосредственное или опосредованное воздействие всех основных групп влияющих факторов: природных, технических, технологических и социально-экономических. Реализуется принцип при формировании алгоритмов выбора оптимальных параметров как отдельных подсистем, так и горно-обогатительного комбината в целом.

На современном этапе технологического развития в горнодобывающих отраслях экономики следует выделить два существенно различных варианта методологического подхода к обоснованию стратегии формирования и развития транспортных систем карьеров при разработке глубокозалегающих сложноструктурных месторождений твердых полезных ископаемых:

– на действующих горнодобывающих предприятиях, входящих в состав горно-обогатительных комбинатов;

– при освоении запасов новых месторождений.

Большинство предприятий было запроектировано, построено, введено в эксплуатацию в период плановой экономики на основе отраслевых норм технологического проектирования, и дальнейшее их развитие, в том числе формирование транспортных систем карьеров, должно осуществляться с учетом сложившегося состояния горнотехнических систем и изменяющихся условий их дальнейшего функционирования.

Важнейшей особенностью освоения запасов глубокозалегающих сложноструктурных месторождений является уникальность геологических параметров каждого из них и их высокая природная изменчивость в пределах месторождений, которая проявляется по мере развития горных работ в результате нарастания геологической информации о формах и размерах рудных тел, качественном составе полезных ископаемых, что требует не только изменения параметров систем разработки и методов управления качеством поставляемой на переработку рудной массы, но и формирования грузопотоков транспортной системы карьера (рис. 1).

Главными факторами, определяющими технико-экономические показатели процесса транспортирования горной массы, являются расстояние и высота подъема, величина которых по мере развития горных работ зависит не только от роста глубины карьера, но и от принятого режима горных работ, поэтапности формирования карьерного пространства и параметров транспортной системы карьера.

Условия разработки глубокозалегающих сложноструктурных месторождений зависят от этапа освоения запасов месторождения.

На этапе строительства карьера производятся горно-капитальные работы для вскрытия месторождения в объеме, предусмотренном проектом к моменту сдачи карьера в эксплуатацию в соответствии с проектом организации строительства, которым предусмотрено сооружение пунктов размещения вскрышных пород, приема полезного ископаемого для переработки с получением товарной продукции и подлежащих складированию отходов обогащения, строительство транспортных коммуникаций и подготовка фронта добычных работ для эффективной и безопасной эксплуатации заложенного в проекте выемочно-погрузочного и транспортного оборудования, зданий и сооружений для их обслуживания и ремонта.

Технологические достоинства и недостатки различных видов транспорта
Technological advantages and disadvantages of various transport types

Достоинства	Недостатки	Рекомендуемые области применения
	Автомобильный транспорт	
Высокая маневренность Возможность селективной разработки полезных ископаемых Быстрый ввод в действие в начальный период строительства карьера Возможность большой концентрации работ на ограниченном фронте Независимость движения отдельных транспортных единиц Простота устройства заездов в карьер, в том числе на нижние горизонты, с использованием спецмашин для уклонов до 30 %	Высокая себестоимость перевозок Зависимость от климатических условий Засорение атмосферы карьера выхлопными газами Большой штат водителей и ремонтных рабочих	Транспортировка вскрышных пород в начальный период строительства карьера Отработка верхних уступов вблизи предельного контура Вскрытие и подготовка новых горизонтов Работа в качестве сборочного звена при комбинированных видах транспорта Доработка запасов до дна карьера с применением углубочных комплексов
	Железнодорожный транспорт	
Высокая экономическая эффективность при больших объемах и дальности перевозок Надежность работы в любых климатических условиях Высокая производительность труда поездных бригад Возможность разработки горных пород с любыми физико-механическими свойствами	Большой объем путевых работ и их трудоемкость Сложность организации заездов на нижние горизонты карьера Взаимозависимость движения составов по общим транспортным коммуникациям Низкие эксплуатационные показатели при малых объемах перевозок Большой объем подготовительных работ при вводе в эксплуатацию	Верхняя и центральная части рабочей зоны карьера с погрузкой непосредственно в забое экскаватора Вывоз горной массы с перегрузочных пунктов при комбинированном транспорте Транспортировка горной массы по поверхности при значительном удалении от фабрик и отвалов
	Конвейерный транспорт	
Равномерность и непрерывность Минимальная протяженность транспортных коммуникаций Высокая производительность труда Независимость от рельефа местности	Необходимость предварительного дробления крупнокускового материала Взаимозависимость всех звеньев конвейерной линии Большой износ ленты и сложность ее замены Зависимость от климатических условий	Выдача горной массы от дробильно-грохотильных перегрузочных пунктов в карьере до приемных устройств на поверхности Передача горной массы с автомобильного транспорта на железнодорожный при комбинированном автомобильно-конвейерно-железнодорожном транспорте

Одним из инновационных способов решения транспортной проблемы глубокозалегающих месторождений является применение циклично-поточной технологии с момента ввода карьера в эксплуатацию [8, 9].

При этом не исключен вариант, когда в период строительства применяется горная и транспортная техника, отличная от предусмотренной проектом для работы после сдачи карьера в эксплуатацию. Особенно это характерно для разработки месторождений в новых, не освоенных регионах при отсутствии развитой инфраструктуры, транспортных коммуникаций, источников электроэнергии.

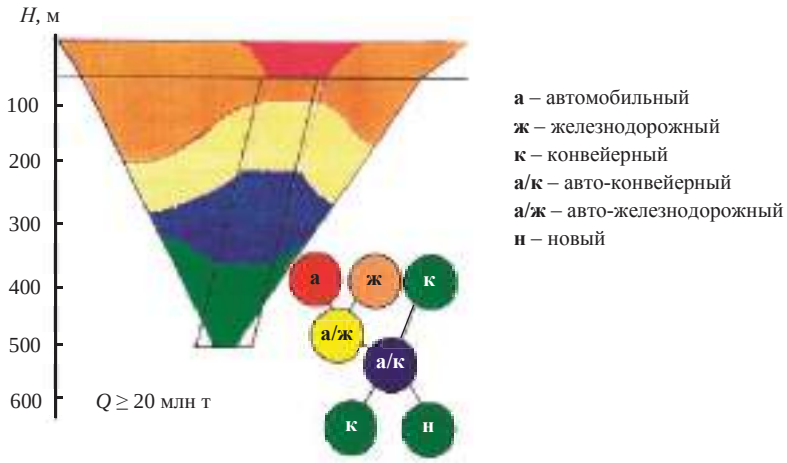

Рис. 2. Зоны эффективного применения видов транспорта по глубине карьера
Fig. 2. Zones of transport types effective use according to the depth of an open pit

На этапе разработки месторождения от момента ввода карьера в эксплуатацию до достижения проектной мощности по горной массе и полезному ископаемому накапливается опыт эксплуатации горной и транспортной техники, уточняются параметры залежей и содержание в них полезного ископаемого и попутных полезных компонентов, физико-механические свойства горных пород, вносятся коррективы в планы горных работ на перспективу, в том числе в параметры системы разработки, развитие транспортной системы карьера, приведение ее в соответствие с темпами понижения горных работ и вскрытия новых горизонтов.

В процессе дальнейшей разработки месторождения формирование транспортной системы карьера осуществляется во взаимосвязи с поэтапным развитием горных работ, формированием временно нерабочих бортов с учетом развития рабочей зоны, обеспечения поставки на последующую переработку необходимого количества и качества добываемого минерального сырья.

Поэтапность формирования карьерного пространства позволяет регулировать режим горных работ, снижать текущий коэффициент вскрыши путем временной консервации части рабочих бортов карьера за счет уменьшения ширины рабочих площадок и расположения на них транспортных коммуникаций (съездов).

Многолетними исследованиями практической работы горных предприятий при разработке месторождений полезных ископаемых карьерами большой глубины и производительности установлены технологические достоинства и недостатки различных видов транспорта (таблица) и доказано, что в течение всего срока существования карьера одновременное, последовательное, самостоятельное или комбинированное применение нескольких (как правило, двух или трех) видов транспорта является неизбежным, а зоны их технологически и экономически эффективного применения (рис. 2) определяются при проектировании и уточняют-

ся в процессе развития горных работ и нарастания геологической и технико-экономической информации о показателях функционирования горнотехнической системы карьера.

К необходимости периодической корректировки проектных решений по развитию транспортной системы карьера может привести нарастание информации о технико-экономических показателях действующей горнотехнической системы, количестве и качестве запасов основного и попутных полезных компонентов, изменившихся условиях внешней среды (экология, потребность в сырье и др.).

Решение транспортной проблемы глубоких карьеров существенно зависит от установленных проектом границ и способов вскрытия глубоких горизонтов, в том числе с применением роботизированных комплексов [10, 11].

Завершающим этапом развития горных работ и формирования транспортной системы карьера является вскрытие и извлечение запасов до установленной проектом предельной глубины карьера, при этом возможны два варианта:

– горные работы прекращаются и предстоит осуществление комплекса мер по предотвращению негативного экологического воздействия на окружающую среду;

– осуществляется переход на подземную или комбинированную разработки запасов месторождения с возможным использованием транспортной системы карьера во взаимосвязи с подземной геотехнологией [12].

Таким образом, заложенные в проекте по данным геологического отчета о месторождении технические и технологические решения, способ разработки, производственная мощность, запасы основного и попутных полезных компонентов и другие показатели могут не подтвердиться, заказчики потребуют уменьшить или увеличить объемы добываемого сырья, инвесторы могут не обеспечить покрытие дополнительных затрат на приобретение нового оборудования и т. п., что потребует принятия решений по переходу предприятия в новое состояние: развития, «затухания» или консервации, потребуются новые технологии, оборудование, организация производства и т. п. Все это приведет к необходимости принятия решений по поэтапной адаптации параметров горнотехнической системы предприятия, в том числе его транспортной системы, к изменяющимся условиям функционирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васильев М. В. Научные основы проектирования карьерного транспорта. М.: Наука, 1972. 202 с.

2. Яковлев В. Л. Теория и практика выбора транспорта глубоких карьеров. Новосибирск: Наука, 1989. 240 с.

3. Батугин С. А., Яковлев В. Л. Закономерности развития горного дела. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1992. 116 с.

4. Яковлев В. Л. Особенности методологического подхода к обоснованию стратегии освоения сложноструктурных месторождений на основе исследования переходных процессов // ГИАБ. 2015. Спец. вып. № 30. С. 22–34.

5. Корнилков С. В., Яковлев В. Л. О методологическом подходе к исследованиям в области освоения недр на основе системности, комплексности, междисциплинарности и инновационной направленности // Горный журнал. 2015. № 1. С. 4–9.

6. Трубецкой К. Н., Корнилков С. В., Яковлев В. Л. О новых подходах к обеспечению устойчивого развития горного производства // Горный журнал. 2012. № 1. С. 15–19.

7. Ческидов В. И., Саканцев Г. Г., Саканцев М. Г. Комплексное обоснование границ карьеров и способов вскрытия глубоких горизонтов при разработке крутопадающих пластообразных залежей // Известия вузов. Горный журнал. 2015. № 2. С. 17–23.

8. Яковлев В. Л., Кармаев Г. Д., Берсенев В. А., Сумина И. Г. О моменте ввода циклично-поточной технологии на карьерах // Известия вузов. Горный журнал. 2015. № 3. С. 4–11.

9. Глебов А. В., Семенкин А. В., Кармаев Г. Д., Берсенев В. А. Эффективность применения циклично-поточной технологии при разработке Актогайского месторождения меди // Горное оборудование и электромеханика. 2017. № 3. С. 12–16.

10. Трубецкой К. Н., Рыльникова М. В., Владимиров Д. Я., Пыталев И. А. Условия и перспективы внедрения роботизированных геотехнологий при открытой разработке месторождений // Горный журнал. 2017. № 11. С. 60–65.

11. Журавлев А. Г. Обоснование рациональных технических параметров горнотранспортных машин // ГИАБ. 2016. Спец. вып. № 21. С. 75–87.

12. Яковлев В. Л., Соколов И. В., Саканцев Г. Г., Кравчук И. Л. Исследование переходных процессов при комбинированной разработке рудных месторождений // Горный журнал. 2017. № 7. С. 46–50.

Поступила в редакцию 10 апреля 2018 года

Яковлев В. Л., Яковлев В. А. Формирование транспортных систем карьеров с учетом адаптации к изменяющимся условиям разработки глубокозалегающих сложноструктурных месторождений // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 6. С. 118–126.

Сведения об авторах:

Яковлев Виктор Леонтьевич – доктор технических наук, член-корр. РАН, главный научный сотрудник Института горного дела УрО РАН. E-mail: yakovlev@igduran.ru
Яковлев Василий Алексеевич – младший научный сотрудник лаборатории транспортных систем карьеров и геотехники Института горного дела УрО РАН. E-mail: r5544@yandex.ru

OPEN PIT TRANSPORT SYSTEMS FORMATION WITH THE ACCOUNT Of ADAPTATION TO DEEP-LYING COMPLEX-STRUCTURED DEPOSITS DEVELOPMENT CHANGING CONDITIONS

Iakovlev V. L.[1], Iakovlev V. A.[1]
[1] Institute of Mining, Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia.

The aim of the article is to substantiate the need for transport system adaptation to changing conditions of deposits development with increasing depth of an open pit.
Methodology. Two variants of methodological approach to open pit transport system formation strategy substantiation: at operating enterprises and under new deposits reserves exploitation. Deep open pits transport systems formation theory component parts are the following: investigation into the traffic formation regularities under deposits staged development, optimum duration substantiation of separate stages development, periods of long-term conservation and reactivation of temporarily non-mining open pit edges under transportation lines.
Research results. On the basis of high production and deep open pits design and exploitation experience and multi-year scientific researches it has been established that by the moment of developing design capacity of a mineral and rock mass it is impossible to create transport system which could provide effective deposit development within all service life of an open pit.
Conclusions. The article shows that in the conditions of open pit working zone increasing depth and increasing geological, mining engineering, and technical and economic information it is required to distinguish the stages of open pit space formation, development systems parameters modification, open pit transport system development by means of simultaneous, sequential, and combined application of several transport types and facilities taking into account advantages and disadvantages of certain types of transport; areas of their effective application according to open pit depth are identified.
Key words: transport system; open pit transport; deep open pits; transient processes; staged development; complex structured deposits.

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-118-126

REFERENCES

1. Vasil'ev M. V. *Nauchnye osnovy proektirovaniia kar'ernogo transporta* [Scientific fundamentals of open pit transport design]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 202 p.
2. Iakovlev V. L. *Teoriia i praktika vybora transporta glubokikh kar'erov* [Theory and practice of deep open pits transport selection]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989. 240 p.
3. Batugin S. A., Iakovlev V. L. *Zakonomernosti razvitiia gornogo dela* [Mining engineering development regularities]. Yakutsk, YakSC SB RAS Publ., 1992. 116 p.
4. Iakovlev V. L. [Features of methodological approach to the substantiation of a strategy of complex structured deposits exploitation on the basis of transient processes investigation]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2015, special edition no. 30, pp. 22–34. (In Russ.)
5. Kornilkov S. V., Iakovlev V. L. [Regarding the methodological approach to the investigations in the field of mineral resources exploitation on the basis of systematicity, integrity, interdisciplinarity, and innovative orientation]. *Gornyi zhurnal – Mining Journal*, 2015, no. 1, pp. 4–9. (In Russ.)
6. Trubetskoi K. N., Kornilkov S. V., Iakovlev V. L. [Regarding new approaches to ensuring sustainable development of mining industry]. G*ornyi zhurnal – Mining Journal*, 2012, no. 1, pp. 15–19. (In Russ.)
7. Cheskidov V. I., Sakantsev G. G., Sakantsev M. G. [Complex justification of the open pit borders and the method of deep workings in development of steeply dipping sheet-like deposits]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2015, no. 2, pp. 17–23. (In Russ.)

8. Iakovlev V. L., Karmaev G. D., Bersenev V. A., Sumina I. G. [On the introduction of the cyclic-flow technology in open pit]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2015, no. 3, pp. 4–11. (In Russ.)
9. Glebov A. V., Semenkin A. V., Karmaev G. D., Bersenev V. A. [Effectiveness of use of the cyclic-flow-line technologies in the development of Aktogay copper mine]. *Gornoe oborudovanie i electromehanika – Mining Equipment and Electromechanics*, 2017, no. 3, pp. 12–16. (In Russ.)
10. Trubetskoi K. N., Ryl'nikova M. V., Vladimirov D. Ia., Pytalev I. A. [Conditions and prospects of introducing robotized geotechnologies under opencast mining]. *Gornyi zhurnal – Mining Journal*, 2017, no. 11, pp. 60–65. (In Russ.)
11. Zhuravlev A. G. [Substantiation of rational engineering parameters of mining automobile machines]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2016, special edition no. 21, pp. 75–87. (In Russ.)
12. Iakovlev V. L., Sokolov I. V., Sakantsev G. G., Kravchuk I. L. [Investigation of transient processes under integrated development of ore deposits]. *Gornyi zhurnal – Mining Journal*, 2017, no. 7, pp. 46–50. (In Russ.)

Information about authors

Iakovlev Viktor Leont'evich – Doctor of Engineering sciences, Corresponding member of RAS, professor, Institute of Mining, UB RAS. E-mail: yakovlev@igduran.ru
Iakovlev Vasilii Alekseevich – junior researcher of the Laboratory of Open Pit Transport Systems, Institute of Mining, UB RAS. E-mail: r5544@yandex.ru

УДК 62-83:621.3.07 DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-127-134

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПЕСКОВЫМ НАСОСОМ

УГОЛЬНИКОВ А. В.[1], ЩЕКЛЕИНА И. Л.[1]
[1]Уральский государственный горный университет
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30)

Введение. *На обогатительных фабриках с мокрым обогащением руд заключительным этапом процесса обогащения является процесс обезвоживания. Данный процесс состоит из двух стадий – сгущения и фильтрации. Технологическая схема процесса обезвоживания содержит цепи сгустителя и цепи вакуум-фильтров. Существующие технологические схемы обезвоживания на обогатительных фабриках при традиционных способах обезвоживания не обеспечивают требуемую влажность железорудного концентрата. Для эффективного осуществления процессов обезвоживания, таких как сгущение и фильтрация, необходимо стабилизировать плотность пульпы (песков) на выходе сгустителя в диапазоне 55–60 % содержания твердого компонента.*
Методы исследования. *Данная задача решается путем использования частотно-регулируемого электропривода пескового насоса, а именно путем изменения скорости вращения ротора электрического двигателя насоса, при этом изменяется производительность пескового насоса, т. е. регулируется расход пульпы, а значит и содержание твердого компонента в пульпе.*
Результаты. *В данной статье осуществлен выбор насосов, электрических двигателей и преобразователей частоты с векторным управлением. Для реализации данной схемы управления производительностью пескового насоса рассчитаны параметры канала регулирования скорости и передаточные функции.*
Вывод. *Экспериментальные исследования подтвердили, что с помощью автоматической схемы можно эффективно управлять плотностью песков сгустителя путем регулирования частоты вращения двигателя пескового насоса.*

Ключевые слова: *обезвоживание; стабилизация; содержание твердого; пульпа; концентрат; насос; двигатель; частотно-регулируемый привод; функциональная схема; векторное управление; микроконтроллер.*

Введение. На фабриках с мокрым обогащением магнетитовых руд заключительным является процесс обезвоживания, состоящий из стадий сгущения и фильтрации. Технологическая схема секции обезвоживания содержит последовательное соединение в цепь сгустителя и группы вакуум-фильтров.

В результате сгущения на сгустителях получают осветленную воду (чистый или замутненный слив) и сгущенный (плотный) продукт – пески. Сгущенный продукт подвергается дальнейшей переработке – фильтрации на вакуум-фильтрах. Влажность полученного железорудного концентрата не должна превышать 9,8 %. Достижению данного результата способствует стабилизация содержания твердого в песках в диапазоне 55–60 % [1]. Это позволяет улучшить выходные показатели процесса фильтрации: обеспечить требуемую влажность концентрата и повысить удельную производительность фильтров.

Для стабилизации содержания твердого в песках сгустителя можно использовать систему автоматического управления электроприводом (СУЭП) пескового

насоса, предназначенного для перекачивания песков по трубопроводу на вакуум-фильтры.

Постановка задачи. Учитывая производительность секции обезвоживания Качканарского горно-обогатительного комбината «Ванадий», к установке предлагаются два насоса типа ГрАТ 350/40/II-1.6, которые поставляются с электродвигателями АМН 315 МА4 и преобразователями частоты VLT Automation Drive FC 300 с векторным управлением (производство фирмы Danfoss, Дания) [2]. Реализация законов векторного управления обеспечивает наилучшие динамические и статические показатели системы управления [3, 4].

Если под скалярным управлением скорости в асинхронном двигателе понимается такое управление, при котором в качестве переменных в системе используются эффективные значения напряжений, токов и потокосцеплений, а сами эти величины считаются величинами скалярными, то в основе векторного управления лежит представление об этих величинах как о пространственных векторах. Можно также отметить, что скалярное управление базируется на зависимостях, лежащих в основе схемы замещения асинхронного двигателя (АД), а векторное управление – на соответствующих структурных схемах.

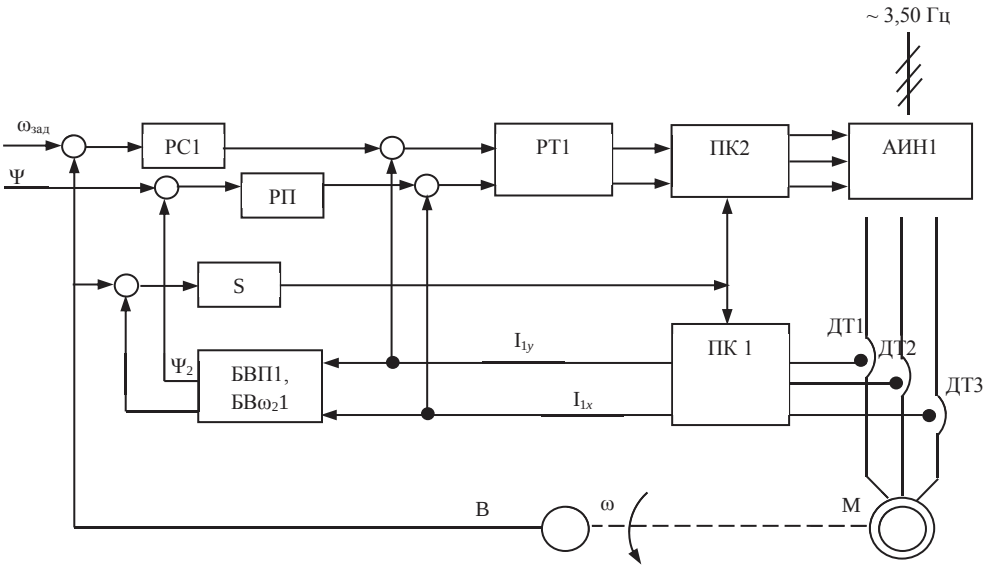

Рис. 1. Функциональная схема системы векторного управления частотным электроприводом по закону Ψ_2 = const с измерением и синхронизацией скоростей электродвигателей
Fig. 1. Functional scheme of a frequency-controlled electric drive vector control system according the law Ψ_2 = const with electric drives velocities measurement and synchronization

Система имеет два канала управления: модулем вектора потокосцепления ротора и угловой скоростью ротора. Двухканальная система управления дает возможность осуществить независимое регулирование модуля вектора потокосцепления ротора и скорости ротора при сохранении прямой пропорциональности между моментом на валу двигателя и составной силы статора, которая находится в квадратуре с волной потокосцепления ротора [5].

Системы векторного управления по закону Ψ_2 = const, где Ψ – вектор потокосцепления ротора, строятся аналогично системам подчиненного управления электродвигателями постоянного тока, что увеличивает быстродействие и значительно повышает надежность электроприводов. В современных частотных

электроприводах с векторным управлением потокосцепление и скорость вычисляют с достаточной точностью при помощи контроллеров по алгоритмам, основанным на различных косвенных методах.

Методика решения поставленной задачи. В данном конкретном случае необходимо обеспечить синхронизацию двух двигателей насосов, каждый из которых питается от собственного преобразователя. Для этого необходимо предусмотреть в схеме измерение скорости двигателей, а также блок синхронизации,

Результаты расчета параметров
Parameters calculation results

Параметр	Формула для расчета, значение
Электромеханическая постоянная времени привода	$T_m = \frac{J_\Sigma \omega_0}{M_п} = 0,2$ с
Электромагнитная постоянная времени двигателя	$T_m = \frac{1}{2\pi f} = 0,0032$ с
Номинальная частота АИН	$f_н = 50$ Гц
Минимальная частота АИН	$f_{\min} = \frac{f_н}{D_1} = 0,25$ Гц
Максимальное значение сигнала задания напряжения	$U_{з\,\max} = 10$ В
Максимальное значение сигнала на выходе регулятора частоты	$U_{р.ч.ном} = 10$ В
Минимальное значение сигнала задания напряжения	$U_{з.н\,\min} = \frac{U_{з.н\,\max}}{D_1} = 0,05$ В
Минимальное значение сигнала на выходе регулятора частоты	$U_{р.ч\,\min} = \frac{U_{р.ч.ном}}{D_1} = 0,05$ В
Статический коэффициент передачи АИН по напряжению	$\frac{U_н}{U_{з\,\max}} = 38$
Постоянная времени АИН	$T_и = 0,0033$ с
Активное сопротивление сетевого фильтра	$R_ф = 30 \cdot 10^{-2}$ Ом
Емкость фильтра	$C_ф = 200 \cdot 10^{-6}$ Ф
Максимальное значение сигнала на выходе датчика скорости	$U_{с\,\max} = 10$ В
Максимальное значение сигнала задания скорости	$U_{з.с\,\max} = 10$ В
Номинальное значение сигнала задания скорости	$U_{з.с.ном} = 10$ В
Минимальное значение сигнала задания скорости	$U_{з.с\,\min} = \frac{U_{з.с\,ном}}{D_1} = 0,05$ В

при помощи которого осуществляется определение рассогласования скоростей вращения приводных двигателей. Блок синхронизации формирует корректирующий сигнал, который складывается с сигналами на входах регуляторов скорости систем управления преобразователей каждого двигателя с разными знаками, чем достигается торможение обгоняющего и разгон отстающего двигателя до исчезновения рассогласования в скоростях пары приводных двигателей.

Функциональная схема системы векторного управления частотным электроприводом приведена на рис. 1.

На функциональной схеме обозначено: АИН1 – автономный инвертор напряжения с ШИМ-преобразователем (широтно-импульсной модуляции); М – двигатели; ДТ1 … ДТ3 – датчики тока статора двигателя; РС1 – регулятор скорости; РП – регулятор потокосцепления; РТ1 – регулятор токов; ПК1 – преобразователь трехфазной системы координат в ортогональную двухфазную *x–y*; ПК2 – преобразователь ортогональной системы координат *x–y* в трехфазную; БВП1 – блок вычисления потокосцепления; БВ$\omega_2$1 – блок вычисления скольжения; В – датчики скорости; ω – скорость вращения ротора; $\omega_{зад}$ – заданная скорость вращения ротора; *S* – скольжение.

Токи статора в трех фазах измеряются датчиками тока ДТ1 … ДТ3 и в координатном преобразователе ПК1 преобразуются в двухфазные, при этом определяются проекции тока статора на оси *x* и *y*.

Система управления скоростью построена по двухканальному подчиненному принципу регулирования. Подчиненными контурами управления являются контур регулирования тока I_{1y} и контур регулирования тока I_{1x}, при этом система управления обеспечивает стабилизацию заданного значения потокосцепления Ψ_2 и регулирование момента.

Расчет параметров аналоговой системы управления производится с целью последующей параметризации цифровой системы управления.

Благодаря высокой разрешающей способности импульсных средств измерения технологических параметров электропривода, высокой разрядности и частоте генераторов синхроимпульсов современных микропроцессоров погрешность параметризации управляющих контроллеров приводов не превышает 1 %. Эта погрешность легко устраняется в процессе отладки системы управления [6–8].

Исходными данными для расчета передаточных функций элементов схемы системы управления являются технические и механические характеристики двигателя.

Результаты расчета параметров канала регулирования приведены в таблице.

Передаточная функция электрической части асинхронного двигателя

$$W_э^{(s)} = \frac{k_{d1}}{T_э p + 1} = \frac{7,9}{0,02p + 1},$$

где $T_э$ – электромагнитная постоянная двигателя, $T_э = (2\pi f_k)^{-1} = 0,02$; k_{d1} – статический коэффициент передачи электрической части двигателя, $k_{d1} = M_н/(\omega_0 - \omega_н) = 7,9$.

Передаточная функция механической части асинхронного двигателя

$$W_m^{(s)} = \frac{1}{J_\Sigma p} = \frac{1}{1,6s},$$

где – J_Σ суммарный момент инерции.

Передаточная функция регулятора скорости

$$W_{р.с}^{(s)} = k_{р.с},$$

где $k_{р.с}$ – статический коэффициент передачи регулятора скорости, $k_{р.с} = 0,04$.

Передаточная функция инвертора по каналу регулирования частоты

$$W_m^{(s)} = \frac{k_и}{T_и p + 1} = \frac{38}{0,0033p + 1},$$

где $k_и$ – статический коэффициент передачи инвертора по каналу управления частоты;

$$k_и = \frac{f_и}{U_{расч.ном}} = 20;$$

$$U_{расч.ном} = \frac{U_{з\,max}}{f_{max}} = 2,5 \text{ В};$$

$T_и$ – некомпенсированная постоянная времени инвертора, $T_и = 0,0033$ с.

Передаточная функция сглаживающего фильтра

$$W_ф^{(s)} = \frac{1}{T_ф + 1} = \frac{1}{6 \cdot 10^{-5} s + 1},$$

где $T_ф$ – постоянная времени сглаживающего фильтра; $T_ф = R_ф C_ф = 6 \cdot 10^{-5}$ с.

Передаточная функция ПИ-регулятора скорости

$$W_{р.с}^{(s)} = k_{р.с} = 3,3.$$

Передаточная функция датчика скорости

$$W_{DC}^{(s)} = k_с = 0,0956,$$

где $k_с$ – коэффициент обратной связи по скорости.

В статическом режиме замкнутая система контура регулирования скорости (частоты) при номинальном сигнале задания скорости системой автоматического регулирования (САР) должна обеспечить номинальную скорость.

Коэффициент обратной связи по скорости

$$k_с = \frac{U_{с\,max}}{\omega_{max}} = 0,008,$$

где $\omega_{max} = 314$ об/мин.

Передаточная функция П-регулятора напряжения

$$W_{р.н} = \frac{1 + T_М^{(s)}}{T_и s} = 0,182.$$

Передаточная функция асинхронного электродвигателя АМН по каналу регулирования напряжения

$$W_{ТП}^{(s)} = \frac{k_и}{\tau s + 1} = \frac{0,131}{0,0033s + 1},$$

где $k_и$ – статический коэффициент АИН по каналу управления напряжением, $k_и = f/U_{ном} = 0,131$.

Передаточная функция задатчика интенсивности

$$W_{\text{з.и}}^{(s)} = \frac{1}{T_{\text{з.и}} s} = \frac{1}{1,05s},$$

где $T_{\text{з.и}}$ – постоянная времени интегрирования задатчика интенсивности, с.

Параметризация цифровой системы управления производится с клавиатуры монитора после предварительного определения параметров передаточных функций структурной схемы системы управления электроприводом [9–12].

Выводы. При реализации микропроцессорной системы стабилизации плотности песков плотномер, встроенный в трубопровод отвода пульпы со сгустителя, подает сигнал на микроконтроллер. В свою очередь, работу микроконтроллера регламентирует задатчик (поддержание заданной плотности). Микроконтроллер обрабатывает сигнал с датчика плотности и дает команду преобразователю изменить частоту вращения электродвигателя пескового насоса, что позволяет поддерживать плотность пульпы в заданном значении.

Экспериментальные исследования подтвердили возможность с помощью автоматической системы эффективно управлять плотностью песков сгустителя путем регулирования частоты вращения двигателя пескового насоса. Установлено, что при увеличении скорости вращения приводного двигателя пескового насоса от 0 до 985 об/мин расход сгущенного продукта изменялся от 0 до максимальной величины – 350 м^3/ч.

При этом увеличение расхода сгущенного продукта ведет к снижению содержания твердого в песках и, соответственно, в питании вакуум-фильтров. При изменении скорости вращения от 560 до 915 об/мин плотность песков сгустителя изменялась от 63,4 % до 47,8 % содержания твердого, плотность питания вакуум-фильтров изменялась при этом от 64,5 до 51 %, а влажность концентрата – от 8,98 до 10,4 %. Удельная нагрузка достигала максимального значения при содержании твердого 62–64 %.

Таким образом, использование системы автоматического управления электроприводом пескового насоса позволяет решить технологическую задачу стабилизации плотности песков сгустителя на таком уровне, чтобы влажность концентрата не выходила за максимально допустимые пределы, а удельная нагрузка была максимальной в каждый момент времени.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Щеклеина И. Л. Исследование и разработка системы автоматического управления процессами обезвоживания железорудного концентрата: дис. … канд. техн. наук. Свердловск, 1986. 254 с.

2. Лезнов Б. С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. М.: Машиностроение, 2013. 176 с.

3. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для вузов. М.: Академия, 2012. 272 с.

4. Панкратов В. В. Векторное управление асинхронными электроприводами: учеб. пособие. Новосибирск: НГТУ, 1999. 66 с.

5. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: ИГЭУ, 2008. 98 с.

6. Шрейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.

7. Фираго Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока. Минск: Техноперспектива, 2006. 363 с.

8. Фролов Ю. М., Шемякин В. П. Регулируемый асинхронный электропривод. М.: Лань, 2016. 464 с.

9. Glauce De Souza, Darci Odloak, Antonio C. Zanin. Real time optimization (RTO) with model predictive control (MPC) // Computer Aided Chemical Engineering. 2009. Vol. 27. P. 1365–1370.

10. Danielle Dougherty, Doug Cooper. A practical multiple model adaptive strategy for single-loop MPC original research // Control Engineering Practice. 2003. Vol. 11. Issue 2. P. 141–159.

11. Feuiillete D., Amet J. P. Introduction du SPC (Statistical process control) sur le train a bandes de Sollac Florange // Rev. Met. 1988, 85. Vol. 4. P. 325–330.
12. Bolognani S., Peretti L., Zigliotto M., Bertotto E. Commissioning of electromecanical confession models for high-dynamic PMSM drives. IEEE Trans. Ind. Electron. Vol. 57. No. 3. 2010. P. 1925–1936.

Поступила в редакцию 28 марта 2018 года

Угольников А. В., Щеклеина И. Л. Автоматическая система управления песковым насосом // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 6. С. 127–134.

Сведения об авторах:

Угольников Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники Уральского государственного горного университета. E-mail: gmf.et@m.ursmu.ru
Щеклеина Ирина Леонтьевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электротехники Уральского государственного горного университета. E-mail: gmf.et@m.ursmu.ru

SAND PUMP AUTOMATIC CONTROL SYSTEM

Ugol'nikov A. V.[1], Shchekleina I. L.[1]
[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Introduction. In wet ore processing plants, the final step in the enrichment process is the dewatering process. This process consists of two stages: thickening and filtration. The technological scheme of the dehydration process contains the chains of the thickener and the chains of the vacuum filters. The existing technological schemes of dehydration in the processing plants, with traditional methods of dehydration do not provide the required moisture content of iron ore concentrate. For effective dehydration processes, such as thickening and filtration, it is necessary to stabilize the density of the pulp (sand) at the output of the thickener in the range of 55–60 % of the solid content.
Research methodology. This problem is solved by using a frequency-controlled electric drive of the sand pump, to be more exact, by changing pump electric motor rotor speed, the performance of the sand pump changes, i.e. the pulp flow rate is regulated and, thereby, the content of the solid component in the pulp.
Results. In this article the choice of pumps, electric motors and frequency converters with vector control is carried out. For the implementation of this sand pump performance control system, the speed control channel parameters and transfer functions are calculated.
Conclusion. Experimental studies have confirmed that with the help of an automatic system it is possible to effectively control the sand thickener density by adjusting the sand pump engine speed.
Key words: dehydration; stabilization; solids content; pulp; concentrate; pump; motor; variable frequency drive; functional diagram; vector control; microcontroller.

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-127-134

REFERENCES

1. Shchekleina I. L. *Issledovanie i razrabotka sistemy avtomaticheskogo upravleniia protsessami obezvozhivaniia zhelezorudnogo kontsentrata: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Research and development of iron ore concentrate dewatering processes automated control system. Cand. Eng. sci. diss.]. Sverdlovsk, 1986. 254 p.
2. Leznov B. S. *Chastotno-reguliruemyi elektroprivod nasosnykh ustanovok* [Pump installations variable frequency drive]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2013. 176 p.
3. Sokolovskii G. G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem: uchebnik dlia vuzov* [School book for the institutions of higher education “AC drives with frequency regulation”]. Moscow, Akademiia Publ., 2012. 272 p.
4. Pankratov V. V. *Vektornoe upravlenie asinkhronnymi elektroprivodami: ucheb. posobie* [School book “Vector control of asynchronous electric drives”]. Novosibirsk, NSTU Publ., 1999. 66p.
5. Vinogradov A. B. *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka* [AC drives vector control]. Ivanovo, IGEU Publ., 2008. 98 p.
6. Shreiner R. T. *Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovateliami chastoty* [Mathematical modeling of AC electric drives with semiconductor frequency converters]. Ekaterinburg, UB RAS Publ., 2000. 654 p.
7. Firago B. I. *Reguliruemye elektroprivody peremennogo toka* [Regulated electric drives of alternating current]. Minsk, Tekhnoperspektiva Publ., 2006. 363 p.
8. Frolov Iu. M., Shemiakin V. P. *Reguliruemyi asinkhronnyi elektroprivod* [Adjustable asynchronous electric drive]. Moscow, Lan' Publ., 2016. 464 p.
9. Glauce De Souza, Darci Odloak, Antonio C. Zanin. Real time optimization (RTO) with model predictive control (MPC). *Computer Aided Chemical Engineering*, 2009, vol. 27, pp. 1365–1370.
10. Danielle Dougherty, Doug Cooper. A practical multiple model adaptive strategy for single-loop MPC original research. *Control Engineering Practice*, 2003, vol. 11, issue 2, pp. 141–159.
11. Feuiillete D., Amet J. P. Introduction du SPC (Statistical process control) sur le train a bandes de Sollac Florange. *Rev. Met.*, 1988, 85, vol. 4, pp. 325–330.

12. Bolognani S., Peretti L., Zigliotto M., Bertotto E. Commissioning of electromecanical confession models for high-dynamic PMSM drives. *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 57, no. 3, 2010, pp. 1925–1936.

Information about authors

Ugol'nikov Aleksandr Vladimirovich – Candidate of Engineering sciences, Associate professor, Head of the Department of Electric Engineering, Ural State Mining University. E-mail: gmf.et@m.ursmu.ru
Shchekleina Irina Leont'evna – Candidate of Engineering sciences, Associate professor, associate professor of the Department of Electric Engineering, Ural State Mining University. E-mail: gmf.et@m.ursmu.ru

УДК 622.67.621.547 DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-135-141

ВКЛАД АКАДЕМИКА НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН А. С. САГИНОВА В СОЗДАНИЕ НОВОГО ВИДА ТРАНСПОРТА ДЛЯ ШАХТ И КАРЬЕРОВ

НИКОЛАЕВ Ю. А.[1], МЕХТИЕВ А. Д.[1]
[1] Карагандинский государственный технический университет
(Республика Казахстан, г. Караганда, бульв. Мира, 56)

Необходимость освоения глубоких месторождений со сложными условиями залегания при высоком коэффициенте вскрышных пород требует разработки нового вида транспорта для выдачи горной массы на поверхность. Предложенная в статье технология обеспечивает минимальные затраты на транспортировку и наиболее экономичный режим отработки месторождений на протяжении всего срока эксплуатации. Статья посвящается памяти академика Национальной академии наук Республики Казахстан А. С. Сагинова.

Ключевые слова: *пневмотическая подъемная установка; пневмотранспорт; скиповой пневмоподъем; транспортная цепочка карьера; открытые разработки; транспортирование горной массы; внутрикарьерный транспорт.*

Применяемые в настоящее время технологии добычи на базе технически устаревшего малоэффективного и ресурсорасточительного оборудования привели к увеличению себестоимости добываемых руд черных и цветных металлов, угля и других полезных ископаемых в десятки раз. Анализ себестоимости одной тонны горной массы, добываемой в таких условиях, показывает, что наибольший удельный вес приходится именно на транспортные расходы. Так, доля расходов на внутрикарьерный транспорт в общей себестоимости одной тонны полезного ископаемого составляет 40–50 %, достигая на глубоких карьерах 60–70 % [1]. На шахтах эта доля растет пропорционально высоте подъема.

Отсюда следует, что проблема снижения себестоимости транспортирования горной массы с растущих глубин разработки месторождений и, соответственно, уменьшение себестоимости полезных ископаемых приобретают важнейшее значение.

Поэтому проблема транспортирования горной массы из углубляющихся шахт и карьеров выдвигается в разряд важнейших в горном деле и требует особого внимания со стороны научной общественности, а также деловых кругов, заинтересованных в дальнейшем развитии горного производства.

Очевидной становится необходимость решения этой проблемы, имеющей государственное значение, за счет создания новых эффективных транспортных средств, позволяющих снизить затраты на транспортирование горной массы из углубляющихся шахт и карьеров.

Практика ведения горных работ и результаты научных исследований показали, что снижение транспортных расходов возможно только в случае наикратчайшего транспортирования горной массы с места разработки на дневную поверхность единицами большой грузоподъемности.

На основании этих исследований разработан комплексный критерий оценки возможностей различных видов шахтного и карьерного транспорта – наикратчайший путь транспортирования горной массы по прямой транспортными единицами значительной грузоподъемности (50–150 и более т) без ограничений по высоте подъема из шахт (карьеров) или углу откоса борта карьера.

Оценка по этому критерию различных видов существующих шахтных подъемных установок и карьерного транспорта (автомобильного, железнодорожного, конвейерного) показала, что по ряду технических причин они не смогут обеспечить требуемые условия транспортирования горной массы с больших глубин и, следовательно, снизить себестоимость полезных ископаемых по транспортным расходам, что, в свою очередь, приведет к дальнейшему росту их себестоимости при углублении горных работ.

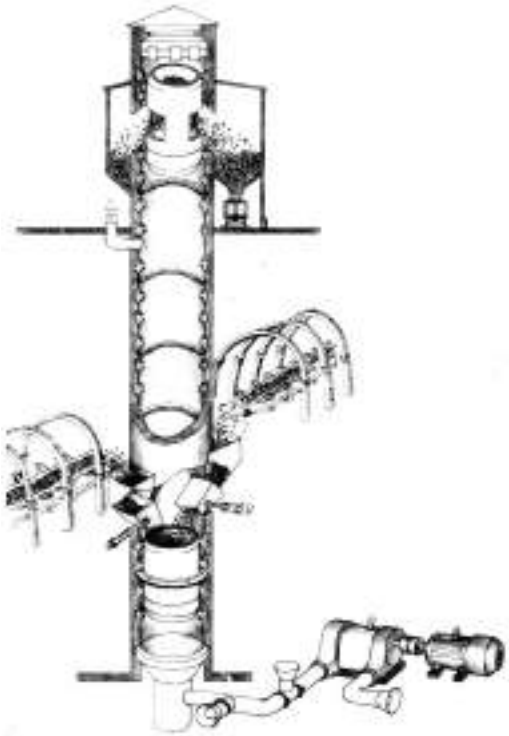

Рис. 1. Общий вид и принципиальная схема шахтной пневмоподъемной установки
Fig. 1. General view and circuit diagram of a shaft pneumatic lifting installation

Изложенные обстоятельства потребовали поиска решения этой проблемы, что привело к разработке нового вида транспорта – скиповых пневмоподъемных установок для глубоких шахт и карьеров [2–8]. Установки отвечают всем требованиям указанного ранее комплексного критерия при наличии важнейших отличительных особенностей: неограниченная высота подъема или угол откоса борта карьера; значительная грузоподъемность сосуда (скипа) (50–150 т) и производительность (3–5 млн т/год из шахт и 6–10 млн т/год из карьеров), причем масса груза не зависит от высоты подъема; кратчайший путь транспортирования горной массы без ее дробления; простота конструкции и небольшое давление сжатого воздуха в системе (0,05–0,15 МПа) позволяют обеспечить высокую работоспособность и безопасность эксплуатации установок, экологическую чистоту; работа

установок не зависит от погодных условий; возможность неоднократного использования сжатого воздуха для подъема скипов, что позволяет снизить энергозатраты. Совокупность указанных достоинств позволяет снизить капитальные затраты на создание этих установок, уменьшить эксплуатационные расходы и за счет этого получать значительный годовой экономический эффект при снижении транспортных расходов на 1 т поднимаемой горной массы.

Общий вид и принципиальные схемы шахтной и карьерной скиповых пневмоподъемных установок приведены на рис. 1, 2 и 3. Схемы поясняют принципиальную основу нового вида транспорта.

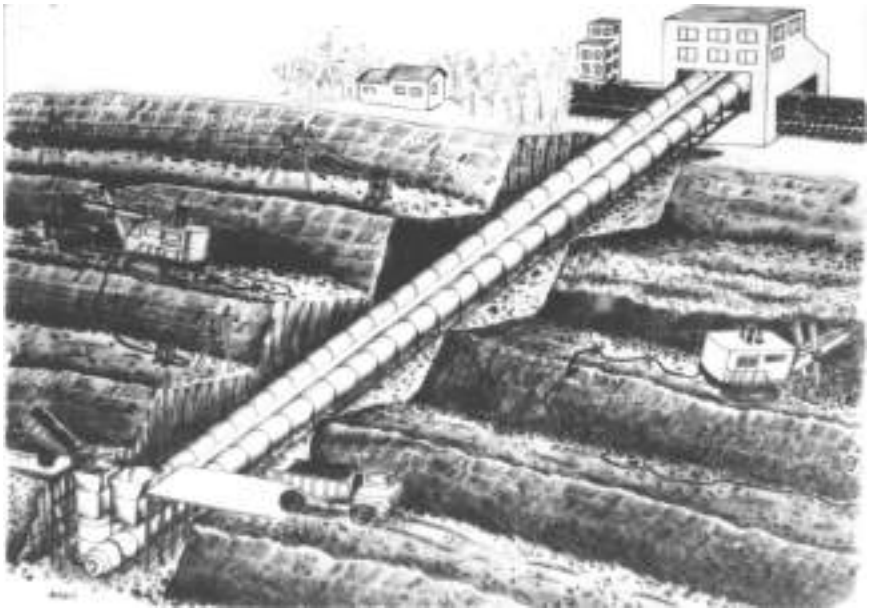

Рис. 2. Общий вид скиповой пневмоподъемной установки в карьере
Fig. 2. General view of a skip pneumatic lifting installation in an open pit

По воспоминаниям Ю. А. Николаева, в 1969 году он был переведен в Карагандинский политехнический институт (КПТИ) с целью дальнейшей разработки нового вида транспорта для шахт и карьеров – скиповых пневмоподъемных установок, где и состоялась его встреча и первое знакомство с ректором института Абылкасом Сагиновичем Сагиновым. Встреча оставила неизгладимое впечатление о Сагинове А. С. как о специалисте в области горного дела, компетентном в вопросах перспектив развития горного дела, осознающем необходимость решения важнейшей проблемы горных предприятий – транспортировки горной массы с места разработки на дневную поверхность.

Во время беседы ректор был ознакомлен с основными идеями и конструктивными решениями, позволяющими создать новый вид транспорта, способный экономически эффективно решать проблему подъема значительных объемов горной массы практически с любых глубин. А. С. Сагинов оценил предлагаемые решения, после чего было подготовлено предложение в Государственный Комитет по науке и технике СССР.

ГКНТ СССР рекомендовал рассмотреть на технических советах Минугля СССР, Минцветмета СССР, а также в Московском горном институте и ИГД АН КазССР новый вид транспорта, не имеющий аналогов в СССР и за рубежом и дать свои рекомендации. Сообщения, сделанные в этих организациях, были одобрены и получили положительную оценку.

Одновременно А. С. Сагинов предложил организовать при институте лабораторию по разработке нового направления в области шахтного и карьерного транспорта. Для этого было выделено левое крыло 3-го этажа в 4-м корпусе, где разместились лаборатория, конструкторское бюро и прочие отделы. Финансирование работ лаборатории осуществлялось за счет Минцветмета СССР и КазССР, Минугля СССР, ряда ГОКов и горных предприятий.

Ректор проявил интерес к работе лаборатории, проводил семинары, на которых рассматривались научные и организационные вопросы.

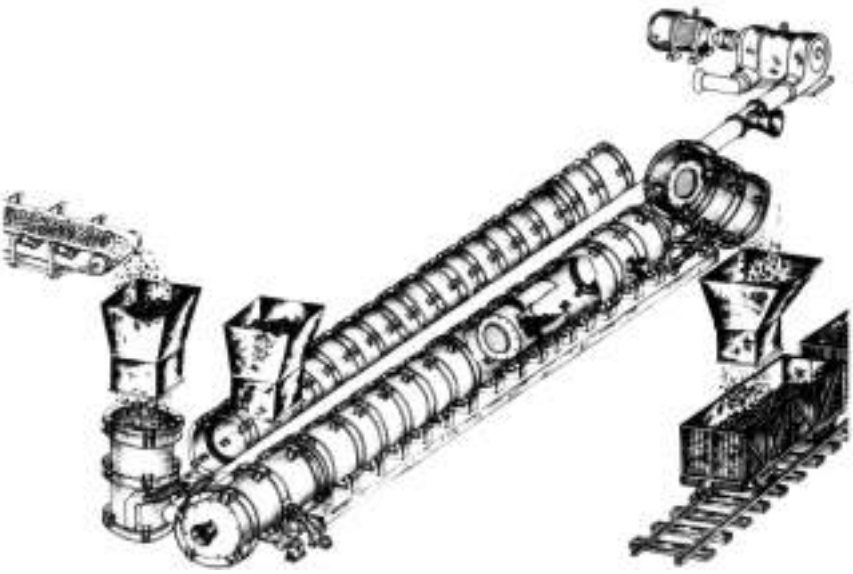

Рис. 3. Принципиальная конструктивная схема карьерной скиповой пневмоподъемной установки
Fig. 3. Circuit construction diagram of an open pit skip pneumatic lifting installation

В то же время на территории бывшей шахты № 38 ПО «Карагандауголь» был создан экспериментальный центр исследования параметров и узлов скиповых пневмоподъемных установок и установлена экспериментальная пневмоподъемная установка (рис. 4), доказавшая возможность создания скиповых пневмоподъемных установок, их работоспособность и надежность.

В 1995 году организовано специализированное предприятие «Пневмоподъем», предназначенное для разработки технических проектов скиповых пневмоподъемных установок для конкретных горных предприятий, их технико-экономической оценки, возможностей применения, особенно на глубоких шахтах и карьерах, исследования параметров и узлов этих машин.

С целью повышения достоверности и надежности результатов работы проекты выполнялись совместно с проектными институтами, в числе которых «Карагандагипрошахт», «Казгипроцветмет», «Промстройпроект», КНИУИ и другие, подтвердившие экономическую эффективность нового вида транспорта и возможность его применения на горнодобывающих предприятиях. Были разработаны шахтные пневмоподъемные установки для шахты № 22 ПО «Карагандауголь», рудника «Космурун» ВКО, экспериментальная установка для шахты «Молодежная» ПО «Карагандауголь», Малеевского рудника ВКО; карьерные скиповые пневмоподъемные установки для КУУ-Чекинского угольного разреза ПО «Карагандауголь», Соколовско-Сарбайского горно-обогатительного комбината, Николаевского карьера Восточно-Казахстанской области.

Выполненный значительный объем научно-исследовательских, конструкторских и экспериментальных работ доказал возможность создания данных машин, их надежность и долговечность в эксплуатации.

Экономические исследования подтвердили эффективность нового вида транспорта.

Таким образом, к началу XXI века был подготовлен солидный научно-технический задел к внедрению в горнодобывающие отрасли страны нового экономичного вида транспорта, позволяющего решать проблему подъема горной массы из глубоких шахт и карьеров. К этому следует добавить, что предложенный вид транспорта не имеет аналогов в мире, что подтверждено пакетом авторских свидетельств СССР и патентов Республики Казахстан.

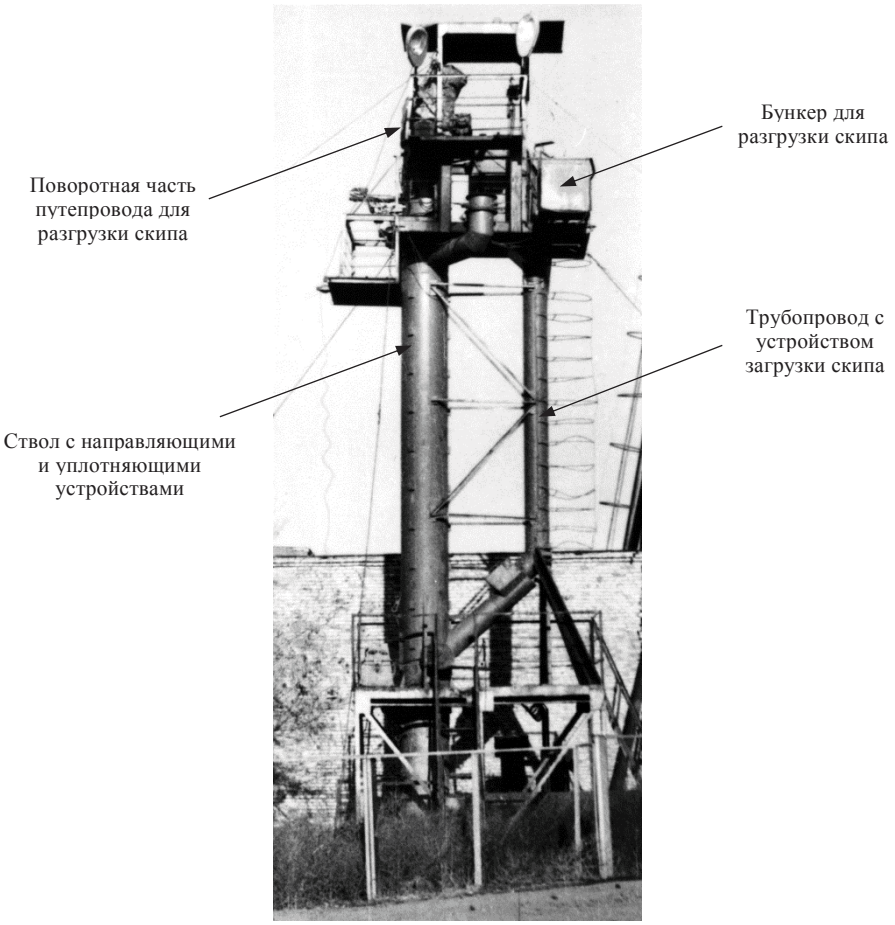

Рис. 4. Экспериментальная скиповая пневмоподъемная установка
Fig. 4. Test skip pneumatic lifting installation

К сожалению, развал СССР привел к остановке работ в этом направлении, хотя затраты на транспортирование горной массы с растущих глубин разработки месторождений уже привели к росту затрат на транспортирование до 60–70 % в себестоимости полезных ископаемых с тенденцией роста. Накопленный научный, экспериментальный и конструктивный материал был обобщен и представлен в виде докторских и кандидатских диссертаций, закрепив приоритет Казахстана по этому направлению в науке и технике.

Сагинов А. С. был руководителем и консультантом направления, помогал решать множество вопросов научного и организационного характера.

Вспоминая годы напряженной работы по созданию скиповых пневмоподъемных установок, нельзя не отметить большую роль академика А. С. Сагинова в развитии наиболее экономичной технологии транспортирования, его мудрые советы по горным вопросам и проблемам внешнего общения с руководством министерств, ведомств, институтов, помощь в решении самых трудных задач. Результаты проделанной работы опубликованы в ряде ведущих журналов по горному делу, что позволило сохранить приоритет нашей страны и имя академика А. С. Сагинова для продолжателей этого дела [5–8]. Сагинов А. С. вложил много сил и времени в создание пневмотранспортных систем для горнодобывающей отрасли экономики; разработанные с его участием скиповые пневмоподъемные установки оказались в 7 раз дешевле канатных.

В начале 90-х годов прошлого века на предприятиях Карагандинского угольного бассейна были начаты работы по строительству пневматических подъемных установок, но внедрить их не успели, так как предприятия перестали существовать вместе с бывшим СССР. Сегодня дело А. С. Сагинова воплощено в экспериментальном производстве грузовых пневматических лифтов грузоподъемностью 110 и 250 кг на Карагандинском машиностроительном заводе № 1. Произведенные экспериментальные лифты с успехом используются на многих предприятиях Казахстана [9].

Анализ и оценка нового вида транспорта с технической, экономической, производственной, энергетической и экологической точек зрения доказали техническую возможность и экономическую целесообразность его промышленного внедрения в горнодобывающие отрасли, что позволит эффективно решить проблему транспортировки горной массы с глубоких горизонтов месторождений и нейтрализовать отрицательные последствия, связанные с углублением горных работ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов К. К., Ястребов А. И., Третьяков К. М. Выбор внутрикарьерного транспорта. М.: Недра, 1975. 152 с.

2. Николаев Ю. А. Теория и методы расчета скиповых пневмоподъемных установок для шахт и карьеров: автореф. дис. … докт. техн. наук. Свердловск, 1991. 45 с.

3. Николаев Ю. А. Новый вид транспорта для шахт и карьеров // Горный журнал. 1988. № 12. С. 44–47.

4. Николаев Ю. А. Перспектива применения различных видов транспортных средств на глубоких карьерах // Тяжелое машиностроение. 2003. № 8. С. 23–26.

5. Сагинов А. С., Николаев Ю. А. О создании шахтных пневматических подъемных установок // Горный журнал. 1977. № 1. С. 60–61.

6. Сагинов А. С., Николаев Ю. А. Проблема транспортирования горной массы с глубоких горизонтов месторождений и пути ее решения. Караганда: КарПТИ, 1987. 9 с.

7. Сагинов А. С., Николаев Ю. А. Экспериментальная пневматическая подъемная установка // Горный журнал. 1978. № 2. С. 49–50.

8. Сагинов А. С., Болгожин Н. А-Г., Алтаев Ш. А., Николаев Ю. А. К проблеме создания нового вида транспорта для шахт и карьеров // Вестник АН КазССР. 1979. № 10. С. 3–7.

9. Лифт на воздушной подушке. URL: http://expert.ru/kazakhstan/2006/30/pnevmolift/ (дата обращения 10.02.2017 г.)

Поступила в редакцию 11 мая 2017 года

Николаев Ю. А., Мехтиев А. Д. Вклад академика Национальной академии наук Республики Казахстан А. С. Сагинова в создание нового вида транспорта для шахт и карьеров // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 6. С. 135–141.

Сведения об авторах:

Николаев Юрий Александрович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры энергетических систем Карагандинского государственного технического университета. E-mail: s.nikolaev24@mail.ru

Мехтиев Али Джаванширович – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, заведующий кафедрой энергетических систем Карагандинского государственного технического университета, E-mail: barton.kz@mail.ru

THE CONTRIBUTION OF KAZAKHSTAN NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES ACADEMICIAN A. S. SAGINOV IN THE CREATION OF A NEW TYPE OF TRANSPORT FOR MINES AND OPEN PITS

Nikolaev Iu. A.[1], Mekhtiev A. D.[1]
[1] Karaganda State Technical University, Karaganda, the Republic of Kazakhstan.

The need for the exploitation of complex deep deposits under high stripping ratio requires the development of a new type of transport for the rock mass output to the surface. The proposed technology ensures minimal transportation costs and the most economical mode of field processing during the entire period of operation. The article is a tribute to Kazakhstan National Academy of Sciences Academician A. S. Saginov
Key words: pneumatic lifting installation; pneumatic transport; skip pneumatic lift; open pit transport chain; opencast mining; rock mass transportation; open pit transport.

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-135-141

REFERENCES

1. Kuznetsov K. K., Iastrebov A. I., Tret'iakov K. M. *Vybor vnutrikar'ernogo transporta* [Selection of open pit transport]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 152 p.
2. Nikolaev Iu. A. *Teoriia i metody rascheta skipovykh pnevmopod"emnykh ustanovok dlia shakht i kar'erov: avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk* [Theory and calculation method for skip pneumatic lifting installations for mines and open pits. Dr. eng. sci. abs. diss.]. Sverdlovsk, 1991. 45 p.
3. Nikolaev Iu. A. [A new type of transport for mines and open pits]. *Gornyi zhurnal – Mining Journal*, 1988, no. 12, pp. 44–47. (In Russ.)
4. Nikolaev Iu. A. [The outlook for the application of various types of transport at deep open pits]. *Tiazheloe mashinostroenie – Heavy Mechanical Engineering*, 2003, no. 8, pp. 23–26. (In Russ.)
5. Saginov A. S., Nikolaev Iu. A. [Regarding the creation the shaft pneumatic lifting installations]. *Gornyi zhurnal – Mining Journal*, 1977, no. 1, pp. 60–61. (In Russ.)
6. Saginov A. S., Nikolaev Iu. A. *Problema transportirovaniia gornoi massy s glubokikh gorizontov mestorozhdenii i puti ee resheniia* [Problem of rock mass transportation from the deep horizons of deposits and the ways of the problem's solution]. Karaganda, KarPTI Publ., 1987. 9 p.
7. Saginov A. S., Nikolaev Iu. A. [Test pneumatic lifting installation]. *Gornyi zhurnal – Mining Journal*, 1978, no. 2, pp. 49–50. (In Russ.)
8. Saginov A. S., Bolgozhin N. A-G., Altaev Sh. A., Nikolaev Iu. A. [To the problem of creating a new type of transport for mines and open pits]. *Vestnik Natsional'noi akademii nauk Respubliki Kazakhstan – Bulletin of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*, 1979, no. 10, pp. 3–7. (In Russ.)
9. *Lift na vozdushnoi podushke* [Pneumolift]. Available at: http://expert.ru/kazakhstan/2006/30/pnevmolift/ (Access date 10.02.2017) (In Russ.)

Information about authors

Nikolaev Iurii Aleksandrovich – Doctor of Engineering sciences, Professor, professor of the Department of Energy Systems, Karaganda State Technical University. E-mail: s.nikolaev24@mail.ru
Mekhtiev Ali Dzhavanshirovich – Candidate of Engineering sciences, Associate professor, head of the Department of Energy Systems, Karaganda State Technical University. E-mail: barton.kz@mail.ru

УДК 622.25(049.32) DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-142-144

ЭЛЕКТРОННЫЙ УЧЕБНИК «ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ШАХТНОГО И ПОДЗЕМНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА»

САШУРИН А. Д.[1]

[1] Институт горного дела Уральского отделения РАН
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58)

Издательством Уральского государственного горного университета выпущен электронный учебник «Геомеханическое обеспечение шахтного и подземного строительства»: авторы – проф. Б. Д. Половов и проф. М. В. Корнилков (объем с приложениями – 140,3 усл. печ. л., размер ПО – 38,8 МБ, размер прилагаемого диска – 98,5 МБ).

В учебнике последовательно излагаются:

– общие сведения и понятия, необходимые для современного геомеханического анализа горнотехнических объектов на стадии их строительства;

– статистическая оценка свойств образцов и массивов горных пород с сопоставлением традиционных и непараметрических методик;

– напряженно-деформированное состояние массивов горных пород с тензорным анализом и полным набором проверок (инвариантов напряжений и деформаций, направляющих косинусов осей эллипсоида, сходимости решений прямой и обратной задач);

– инженерно-аналитические методы геомеханического анализа вертикальных и горизонтальных выработок;

– оценка устойчивости и крепления стен подземных сооружений и откосов глубоких котлованов;

– вероятностные и численные методы анализа геомеханического состояния горнотехнических объектов;

– элементы управления состоянием вмещающих массивов.

Текстовый материал завершается обоснованием семи перспективных направлений – точек роста геомеханики, включающих в том числе внедрение сверхгенераторов случайных чисел, переход к моделям PHP в среде Cloud Computing.

Содержание электронного учебника базируется на актуализированных нормативах, анализируемых и дополняемых с привлечением прогрессивных геомеханических решений.

Особенности учебника:

– изложение дисциплины с активным использованием исполняемых программ, каждая из которых сопровождается формированием текстовых файлов. Пакет из 137 прикладных программ составлен на стандартизированном языке QBasic, легко осваиваемом пользователями. QBasic транслируется в среде Visual Basic и на язык интернета PHP;

– ориентация на решение практических задач геомеханического обеспечения шахтного и подземного строительства, поясняемых 257 демонстрационно-контрольными текстовыми файлами;

– реализация прогрессивного комплекса методов прикладной (непараметрической) статистики малых выборок. Должную достоверность статистической оценки состояния вмещающих массивов и свойств горных пород и сопоставимость непараметрических оценок с параметрическими обеспечивает программный комплекс, включающий: проверку выборочного распределения на случай-

ность по критерию серий; определение статистик выборочных испытаний; непараметрическую отбраковку грубых погрешностей; непараметрическую проверку нормальности распределения; сопоставительные оценки минимальных объемов выборки для нормального и произвольного распределений; тиражирование малой выборки по методам «складной нож» и «бутстреп»; сопоставление методов выделения РГЭ по ГОСТ 20522-96 с непараметрическим критерием Лемана–Розенблатта типа Омега-квадрат;

– изложение действующей нормативной документации в свете Закона от 27.12.2002 № 184-ФЗ «О техническом регулировании» с последующими изменениями;

– полная автоматизация методов геомеханического анализа вертикальных, горизонтальных выработок, тоннелей, стен подземных сооружений и откосов глубоких котлованов. Доработка положений и указаний нормативных документов, не имеющих цифровой реализации, расчет вертикальных стволов для четвертой категории устойчивости вмещающих пород, оценка состояния системы *крепь–порода* в неравнокомпонентом поле напряжений, расчет устьев на вертикальные нагрузки; для горизонтальных выработок – прогноз устойчивости обнажений на годы, месяцы, сутки;

– дополнение традиционных детерминированных решений вероятностным анализом рассматриваемых геомеханических ситуаций, включающим совершенствование существующих вероятностных подходов и имитационное моделирование (метод Монте-Карло). Комплексирование детерминированного и вероятностного методов дает пользователю важную взаимодополняющую информацию: детерминированный метод выполняет страхующие функции и определяет непротиворечие результатов анализа требованиям нормативной документации; вероятностный – обеспечивает получение однозначного решения по факторам экономической и социальной безопасности, исключает или существенно снижает вероятность внесения излишних затрат;

– совершенствование методов геомеханического анализа на основе имитационного моделирования, позволяющее заменить понятия «запас», «безопасность по грунту», «безопасность по нагрузке», «безопасность по материалу» и т. п. на объективные количественные оценки «надежность» и «риск»;

– решение проблем имитационного моделирования, вызванных громоздкостью и трудоемкостью многократных вычислений; необходимостью проведения однотипных расчетов для серийного моделирования; сомнениями в правомерности принимаемых законов распределения случайных параметров геомеханической модели и др.;

– технология последовательной генерации случайных чисел в цикле, обеспечиваемая на рядовой 32-разрядной персональной ЭВМ;

– разработка специализированного методического руководства по численному моделированию сложных геомеханических ситуаций, адаптированного для пользователей-студентов. Продуктивность руководства подтверждается результатами дипломных работ, воспроизведенных в настоящем учебнике;

– технико-экономическое обоснование проектных и управленческих решений в условиях геомеханического риска по критериям «чистый дисконтированный доход», «суммарные дисконтированные затраты», «внутренняя норма доходности», «договорная цена» для горно-строительной организации.

Учебник полностью покрывает потребности геомеханического анализа горнотехнических объектов по всем направлениям, предусмотренным программой дисциплины «Геомеханика». Принятый авторами стиль изложения позволяет пользователю-студенту свободно осваивать материал электронного учебника, включая высокие компьютерные технологии: тензорный анализ напряженно-

деформированного состояния вмещающих массивов, имитационное и численное моделирование.

Следует особо отметить доступность и оперативность выполнения разработанного программного обеспечения для рядовых компьютеров.

Материалы электронного учебника в целом вносят существенный вклад в обеспечение качества геомеханического анализа строящихся горнотехнических объектов. Геомеханический анализ в автоматизированном режиме, доступном пользователю-студенту, резко повышает оперативность, обеспечивает многовариантность расчетов, гарантирует получение обоснованных результатов. Таким образом, авторам удалось создать цельный, полезный электронный учебник, который, несомненно, будет востребован студентами горных вузов.

Сашурин А. Д. Электронный учебник «Геомеханическое обеспечение шахтного и подземного строительства» // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 6. С. 142–144.

Сведения об авторах:

Сашурин Анатолий Дмитриевич – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом геомеханики Института горного дела Уральского отделения РАН. E-mail: sashour@igd.uran.ru

Р е д а к ц и я
Главный редактор Е. Ф. Цыпин
Зам. главного редактора О. Г. Латышев, М. Г. Бабенко
Ответственный секретарь Л. А. Решеткина
Редакторы Л. Г. Соколова, Л. Ю. Парамонова

Перевод И. В. Шайхутдиновой

Компьютерная верстка Ю. Б. Швецовой

Подп. в печать 13.09.2018. Дата выхода в свет 27.09.2018
Формат 70 x 108 1/16. Печать офсетная
12,0 усл. печ. л., 11,0 уч.-изд. л. Тираж 500 экз. Заказ № 6464
Цена свободная

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-57227 от 12.03.2014

Редакция «Изв. вузов. Горный журнал»
620144, Екатеринбург, ГСП, ул. Куйбышева, 30, тел.(факс) (343) 257-65-59
E-mail: gornij_journal@ursmu.ru
http://mj.ursmu.ru

Типография ООО «Издательство УМЦ УПИ»
620078, г. Екатеринбург, ул. Гагарина, 35а, оф. 2

Индекс 70367

ISSN 0536-1028. Известия высших учебных заведений. Горный журнал, № 6, 2018.