

РУДНЫЙ ЖУРНАЛ

187 лет

Издается с 1825 года
(№ 2296)

3.2022

БУРОВОЙ ИНСТРУМЕНТ

ДЛЯ ОТКРЫТЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ РАБОТ



ПНЕВМОУДАРНЫЙ БУРОВОЙ ИНСТРУМЕНТ:

- погружные пневмударники
- буровые коронки
- буровые трубы, адаптеры

БУРОВОЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ РС БУРЕНИЯ:

- РС пневмударники
- РС долота
- элементы бурового става

ГИДРОПЕРФОРАТОРНЫЙ ИНСТРУМЕНТ R25, R32, R38, T38, T45, T51, GT60:

- буровые коронки
- буровые штанги
- хвостовики

КОНУСНЫЙ БУРОВОЙ ИНСТРУМЕНТ:

- буровые коронки
- буровые штанги

БУРОВОЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ СТАНКОВ ВРАЩАТЕЛЬНОГО БУРЕНИЯ:

- шарошечные долота
- буровые трубы
- адаптеры и переходники



ООО «Атриум»

www.mining-tools.info

+7 (423) 257-67-01 // info@mining-tools.info



«ПОЛИМЕТАЛЛ ИНЖИНИРИНГ»
ПРЕДСТАВЛЯЕТ МИРОВЫЕ БЕСТСЕЛЛЕРЫ
ПО ГЕОЛОГИИ, ГОРНОМУ ДЕЛУ,
ЭКОНОМИКЕ И ГЕОМЕХАНИКЕ на русском
языке



ОЦЕНКА МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ И РУДНЫХ ЗАПАСОВ

Справочник по передовым практическим
методам австралоазиатского института
металлургии и горного дела

(Mineral resources and ore reserve
estimation. The AusIMM guide to good
practice)

Второе издание этой монографии объемом почти в тысячу страниц посвящена описанию и обобщению передового мирового опыта в области оценки минеральных ресурсов и рудных запасов. Первое издание вышло в свет в 2001 году. Настоящее переиздание состоит из 9 глав и 79 статей, написанных известными в мире учеными и практиками, в которых рассматривается полный спектр вопросов оценки ресурсов и запасов на основе блочного моделирования.

Данная монография является своеобразным руководством по динамично развивающимся передовым практическим методам в геологии и горном деле.

Рассматриваемые в монографии многочисленные проблемы повышения их эффективности являются жизненно важными для горной индустрии в современной сложной экономической ситуации.

Рекомендуемая российским специалистам книга очень информативна и любой читатель, работающий в геологической и горнодобывающей отраслях, сможет найти в ней много полезных сведений о новациях, иногда коренным образом отличающихся от «суровой» российской зарегламентированной действительности в этой сфере.

Издание доступно на сайте Эксмо
<https://eksmo.ru/>

Прямая ссылка на серию:





Основан в 1825 году
при Горном кадетском корпусе

ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ

Ежемесячный научно-технический
и производственный журнал
Электронное периодическое издание

№ 3 (2296)
МАРТ 2022

**Базовый печатный орган Межправительственного совета стран СНГ
по разведке, использованию и охране недр**

**Официальный информационный орган Федерального УМО
«Прикладная геология, горное дело, нефтегазовое дело и геодезия»**

Журнал выпускается при участии: АК «АЛРОСА» (ПАО), АО «Апатит»,
ПАО «ГМК «Норильский никель», НПК «Механобр-техника» (АО)

При содействии: ФГБУН ИГКОН РАН, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный
университет», Государственного предприятия «Навоийский ГМК», НП «Горнопромышленники
России», Государственного Эрмитажа

Информационный координатор тематики технологического обеспечения добычи
минерального сырья – АО «ВНИПИПромтехнологии» – инжиниринговый центр
горнорудного дивизиона Госкорпорации «Росатом»

УЧРЕДИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОННОГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО ИЗДАНИЯ:

Акционерное общество «Издательский дом «Руда и Металлы»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

В. В. Адушкин, Азим Иброхим, В. Ж. Аренс, С. С. Арзуманян, А. А. Барях,
О. С. Брюховецкий, Н. Г. Валиев, В. А. Винников (руководитель секции «Физика
горных пород и процессов»), Ю. И. Волков, А. Г. Воробьев (председатель
правления «Горного журнала»), Л. Д. Гагут (руководитель секции «Экономика,
управление, недропользование»), Ж. К. Галиев, И. И. Головатый, В. А. Ерёмченко,
Б. Н. Заровняев, В. Н. Захаров, В. П. Зубов, И. В. Зырянов, П. А. Игнатов,
О. И. Казанин, Н. О. Каледина (руководитель секции «Охрана труда и окружающей
среды»), Д. Р. Каплунов (руководитель секции «Разработка месторождений
и горно-строительные работы»), В. Ю. Керимов, С. В. Кривовичев,
В. С. Литвиненко, А. Б. Макаров, Ю. Н. Малышев, О. Н. Мальгин, О. С. Мисников,
Д. В. Пастихин, В. Л. Петров (руководитель секции «Образование и кадровое
обеспечение горной промышленности»), Г. Г. Пивняк, И. Ю. Рассказов,
У. Д. Рыскулов, К. С. Санакулов, В. С. Святецкий, А. Г. Твалчрелидзе, И. О. Темкин
(руководитель секции «Автоматизация»), Е. М. Титиевский, С. М. Ткач,
К. Н. Трубецкой, А. Ф. Цеховой, В. А. Чантурия (руководитель секции
«Переработка и комплексное использование полезных ископаемых»),
А. Н. Шабаров, Е. Е. Шешко (руководитель секции «Горное оборудование,
электроснабжение»), З. Дж. Эфендиева, Т. И. Юшина, В. Л. Яковлев,
А. Б. Яновский

ИНОСТРАННЫЕ ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

С. Вуйич (Сербия), И. Б. Табакман (Канада), Л. И. Тотев (Болгария),
Ф. Уолл (Великобритания), М. Эрикссон (Швеция)

**Журнал по решению ВАК Министерства образования и науки РФ включен
в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых
должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций
на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук» по разработке
месторождений твердых полезных ископаемых, экономике, энергетике**

**Журнал входит в Международные реферативные базы данных
SCOPUS и CHEMICAL ABSTRACTS SERVICE**

РЕДАКЦИЯ:

временно исполняющий обязанности
главного редактора А. Г. Воробьев,
ведущий редактор Л. Е. Костина,
редактор В. А. Елистратова,
младший редактор М. Д. Матвеева,
менеджер по рекламе Н. И. Колыхалова,
специалист по допечатной
подготовке Д. И. Воробьева

Издатель – АО «Издательский дом «Руда и Металлы»

Адрес издателя: 119049, Москва, Ленинский просп., д. 6,
строение 2, НИТУ «МИСиС», оф. 622

Адрес редакции: 119049, Москва, Ленинский просп., д. 6, стр. 2
НИТУ «МИСиС», оф. 619

Тел.: +7 (499) 236-10-62

Эл. почта: gornjournal@rudmet.ru

Почтовый адрес: 119049, Москва, а/я № 71

Отдел рекламы:

Тел/факс: +7 (499) 236-11-86

Эл. почта: reklama@rudmet.ru

www.rudmet.ru

**Ежемесячный научно-технический
и производственный журнал «Горный журнал»
Электронное периодическое издание**

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
(Свидетельство Эл № ФС77–43411 от 30.12.2010 г.)

Товарный знак и название «Горный журнал» являются исключительной
собственностью Издательского дома «Руда и Металлы»

Дата выхода в свет: 14.04.2022

Формат 60×90/8. Печ. л. 12,5

Цена свободная

- За достоверность рекламной информации ответственность несет рекламодатель
- За достоверность научно-технической информации ответственность несет автор
- Все материалы, поступающие в редакцию, строго рецензируются и рассматриваются на заседаниях соответствующих секций и редакционной коллегии
- Мнение редакции может не совпадать с позицией авторов статей, опубликованных в журнале
- Использование материалов возможно только с письменного разрешения редакции с обязательным указанием ссылки на «Горный журнал»
- За сроки размещения метаданных опубликованных статей в базе данных Scopus редакция ответственности не несет

ISSN 2413-9793



9 772413 979006 >

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА ГОРНЫХ ПОРОД И ПРОЦЕССОВ

Козырева Е. Н., Шинкевич М. В. Практические аспекты техногенной структуризации массива горных пород 4

Николенко П. В., Зайцев М. Г., Чепур М. Д. Метод и оборудование для экспресс-контроля трещиноватости приконтурного массива пород на основе оптических измерений в скважинах 8

ЭКОНОМИКА, ОРГАНИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

Ярушкина Н. А., Матюгина Э. Г., Керб О. М. Выбор поставщика ресурсов для компании угольной промышленности 13

Усманова Т. Х., Исаков Д. А. Энергетические затраты как основной компонент в развитии инноваций в добывающей промышленности 18

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ГОРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ

Утили С., Агости А., Моралес Н., Вальдеррама К., Пелл Р., Альборноз Г. Оптимизация конфигурации борта карьеров в целях повышения финансовой эффективности и сокращения углеродного следа при добыче полезных ископаемых открытым способом 22

ПЕРЕРАБОТКА И КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Нямдорж Д., Лайхансурен Б., Даваахуу Н., Потравный И. М. Утилизация отходов при организации взрывных работ на горнодобывающих предприятиях Монголии 38

ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Замолодчиков Г. И., Фурашов А. С., Тумашев Р. З. Метод определения оптимального способа регулирования работы шахтного вентилятора и его геометрических параметров 43

Мартюченко И. Г., Зенин М. И., Колесников А. Ю., Иванов С. В. Буровой инструмент для бурения скважин в мерзлых грунтах 49

Грабский А. А., Плеханов Ф. И., Грабская Е. П., Вычужанина Е. Ф. Обоснование стратегии совершенствования конструкции и параметров многосателлитной планетарной передачи горной машины . . . 54

ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ОХРАНА ТРУДА

Забурдяев В. С., Харченко А. В. Метановая опасность высокопроизводительных угольных шахт 58

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Солодов И. Н. Защищенность подземных вод от глубинного источника загрязнения при отработке уранового месторождения Добровольное сернокислотным скважинным подземным выщелачиванием 64

Скороходов В. Ф., Бирюков В. В., Артемьев А. В., Никитин Р. М. Использование компьютерного моделирования для обоснования технологии очистки сточных вод горнорудных предприятий 70

Строкова Л. А., Дмитриева С. А. Устойчивость территории к техногенному загрязнению при строительстве гидротехнических сооружений Эльгинского каменноугольного месторождения 77

К 200-летию «ГОРНОГО ЖУРНАЛА»

Неклюдов Е. Г. «Горный журнал» в 1825 г.: начало истории издания 82

Хисамутдинова Н. В., Хисамутдинов А. А. Деятельность русских геологов и горных инженеров в странах Азиатско-Тихоокеанского региона после 1917 г. . . 89

ВЫДАЮЩИЕСЯ ДЕЯТЕЛИ ГОРНОЙ НАУКИ И ПРОИЗВОДСТВА

Мельничук Г. А., Степанова Н. В., Белянкина О. В., Алтухова И. Д. Ученый-горняк А. С. Попов и его наследие . . 95

ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ

О присвоении члену редакционной коллегии «Горного журнала» З. Дж. Эфендиевой ученой степени доктора технических наук Азербайджана 63

РЕКЛАМА

На обложке:

ООО «Атриум»

«Полиметалл инжиниринг» представляет мировые бестселлеры по геологии, горному делу, экономике и геомеханике

MONTHLY SCIENTIFIC-TECHNICAL AND INDUSTRIAL JOURNAL

The basic edition of the Intergovernmental council of CIS countries in exploration, usage and protection of the earth bowels

With participation of “ALROSA” PJSC, “Apatit” JSC, PJSC “MMC “NORILSK NICKEL”, “Mekhanobr-Technica” JSC
With assistance of IPKON RAN, Ural State Mining University, State enterprise Navoi mining and metallurgical works, “Gornopromyshlenniki Rossii” non-commercial partnership, State Hermitage Museum

Information coordinator in the area of mineral mining technologies – VNIIPromtekhologii (National Research and Design Institute for Industrial Technology) – Engineering Center of Rosatom State Atomic Energy Corporations’ Mining Division

Founders: “Ore & Metals” Publishing house, National University of Science and Technology “MISIS”, Autonomous Noncommercial Organization “TV News Channel “Khibiny TV”

Chairman of the managing board, Acting Chief Editor: **Alexander Vorobiev**

Actual address: Moscow, Leninsky prospekt 6 bld. 2, office 619
Mailing address: Russia, 119049, Moscow, P.O. Box # 71
Phone/fax: +7 (499) 236-10-62, +7 (499) 236-11-86
E-mail: gornjournal@rudmet.com
Internet: www.rudmet.com

The journal has been published since 1825 at Mining military school

Publisher: “Ore & Metals” publishing house
Phone/fax: +7 (495) 638-45-18
E-mail: rim@rudmet.com

Leading editor: **Lyudmila Kostina**
Editor: **Vera Elistratova**
Junior editor: **Margarita Matveeva**
Advertising manager: **Natalia Kolykhalova**
Responsible for pre-printing work: **Daria Vorobyeva**

Printed in “Kancler” printing house

CONTENTS

PHYSICS OF ROCKS AND PROCESSES

Kozyreva E. N., Shinkevich M. V. Practical aspects of induced structurization of rock mass 4

Nikolenko P. V., Zaitsev M. G., Chepur M. D. Method and equipment for the express-control of fracturing in adjacent rock mass by optical borehole logging 8

ECONOMY, ORGANIZATION AND MANAGEMENT

Yarushkina N. A., Matyugina E. G., Kerb O. M. Selecting assets supplier for coal mining company 13

Usmanova T. Kh., Isakov D. A. Energy input as the key element of innovations in the mining industry 18

PROCESSING AND COMPLEX USAGE OF MINERAL RAW MATERIALS

Nyamdorj D., Laikhansuren B., Davaakhuu N., Potravny I. M. Blasting waste recycling at mines in Mongolia 38

EQUIPMENT AND MATERIALS

Zamolodchikov G. I., Furashov A. S., Tumashev R. Z. Optimal adjustment of mine fan geometry and operation 43

Martyuchenko I. G., Zenin M. I., Kolesnikov A. Yu., Ivanov S. V. Drilling tool for frozen ground 49

Grabsky A. A., Plekhanov F. I., Grabskaya E. P., Vychuzhanina E. F. Strategy of structural and parametric improvement of multisatellite planetary gears in mining machines 54

INDUSTRY SAFETY AND LABOUR PROTECTION

Zaburdyayev V. S., Kharchenko A. V. Methane hazard in high-productive coal mine 58

ENVIRONMENTAL PROTECTION

Solodov I. N. Protection of groundwater from deep pollution source in in situ sulfuric acid uranium leach at Dobrovolnoe deposit 64

Skorokhodov V. F., Biryukov V. V., Artemiev A. V., Nikitin R. M. Computer simulation application for substantiation of industrial wastewater treatment technology 70

Stroková L. A., Dmitrieva S. A. Induced pollution resistance of areas during hydrotechnical construction at Elga coal project . . 77

TO THE 200th ANNIVERSARY OF GORNYYI ZHURNAL

Neklyudov E. G. Gornyy Zhurnal in 1825: A start in history of the publication 82

Khisamutdinova N. V., Khisamutdinov A. A. Russian geologists and mining engineers in Asia and Pacific Rim Countries after 1917 89

EMINENT PERSONS IN MINING SCIENCE AND INDUSTRY

Melnichuk G. A., Stepanova N. V., Belyankina O. V., Altukhova I. D. Mining scientist A. S. Popov and his heritage . . 95

УДК 622.831.2

ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТЕХНОГЕННОЙ СТРУКТУРИЗАЦИИ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

Е. Н. КОЗЫРЕВА, зав. лабораторией, канд. техн. наук
М. В. ШИНКЕВИЧ, старший научный сотрудник, канд. техн. наук,
 max-valerich@rambler.ru

Институт угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии
 СО РАН, Кемерово, Россия

Введение

Управление горным давлением связано с контролем деформаций вмещающего массива при ведении горных работ для обеспечения устойчивости подземных выработок [1–4]. Одним из негативных последствий перераспределения горного давления при отработке выемочного столба является пучение пород почвы. Эти особенности широко известны, но их актуальность не снижается. Продолжается совершенствование способов управления горным давлением при ведении горных работ [1–17]. Так, в работе [7] подробно рассмотрено влияние способа крепления выработок на пучение почвы. В статье [13] показана взаимосвязь технологических операций в длинном очистном забое с процессами сдвижений в горном массиве. В статье [16] приведены результаты внедрения технологии разрушения массивов с применением рассредоточенных зарядов. Для повышения устойчивости пород почвы проводят следующие мероприятия: разгрузка почвы с помощью вертикальных щелей в центральной части выработок; гидроразрыв пород; анкерное крепление почвы, ее полимерное упрочнение и т. д. Исследуют условия нагружения массива в окрестности выработок и факторы, влияющие на прочностные свойства почвы выработок и угольных пластов [18–20]. Уточнение закономерностей изменения горного давления и напряженного состояния пород в окрестностях выработок является одной из научно-технических задач по обоснованию мероприятий, направленных на предотвращение пучения почвы.

Объект исследования

Представленные в настоящей статье результаты получены при анализе предоставленных специалистами шахты «Ерунаковская VIII» данных по пучению почвы горных выработок, что имело место при последовательной отработке сближенных выемочных участков № 48-2 и 48-3 пласта 48 (см. таблицу). Ширина межлавого целика составила 53 м. Пучения происходили в газодренажном штреке 48-3, находящемся на расстоянии 23 м от конвейерного штрека 48-2 и 25 м от вентиляционного штрека 48-3.

Отрабатываемый пласт 48 выдержанный мощностью от 1,84 до 2,65 м. Основная кровля пласта среднеобрушаемая, сложена

Установлены особенности формирования и развития нелинейной структуризации массива при движении очистного забоя. Разработана параметрическая модель геомеханических процессов в массиве горных пород при отработке длинных столбов по простиранию с полным обрушением кровли. Показана возможность определения участков повышенного горного давления на приконтурную часть и крепь выработок. Описан принципиально новый подход к пониманию происходящих геомеханических процессов в массиве при выемке угольного пласта, что позволяет прогнозировать опасные проявления горного давления и повышенное метановыделение при высокоинтенсивной работе выемочного участка.

Ключевые слова: массив горных пород, угольный пласт, геомеханические процессы, выемочный столб, метановыделение, структуризация массива, горное давление, очистной забой

DOI: 10.17580/gzh.2022.03.01

мелкозернистым и крупнозернистым алевролитом. Непосредственно кровля представлена преимущественно мелкозернистым алевролитом, местами – крупнозернистым. На контакте с почвой пласта 48 залегает ложная почва в виде слоя слабого мелкозернистого алевролита либо углистого со скоплениями обуглившихся остатков флоры мощностью от 0,05 до 0,7 м, крепостью по шкале проф. М. М. Протодьяконова – до $f = 2,5$. Непосредственно почва мощностью от 1 до 3,1 м сложена мелкозернистыми алевролитами с $f = 3-4$, в основном не склонными к пучению. В юго-восточной части выемочного столба № 48-3 непосредственно почва представлена углем пласта 45 мощностью до 2,44 м с $f = 1$.

Моделирование геомеханических процессов в массиве

При рассмотрении условий отработки выемочных участков № 48-2 и 48-3 использованы ранее установленные в Институте угля ФИЦ УУХ СО РАН особенности формирования и развития нелинейной структуризации массива при движении очистного забоя и подготовительных выработок [21, 22]. Расчетной

Параметры выемочных участков № 48-2 и 48-3

Параметр	Выемочный участок	
	№ 48-2	№ 48-3
Длина выемочного участка по простиранию, м	1400	3000
Длина лавы, м	243	320
Средняя глубина залегания пласта, м	410	350
Средняя мощность пласта, м	2,6	2,4

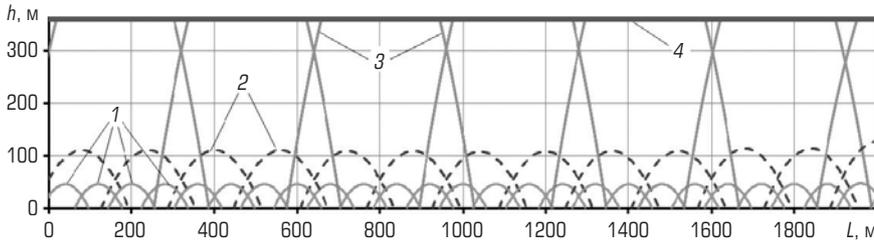


Рис. 1. Вертикальная схема структуризации подрабатываемого массива горных пород по длине L выработанного пространства выемочного участка № 48-3:

1, 2, 3 – своды сдвижений уровней 1, 2, 3 соответственно; 4 – земная поверхность

основой параметров структуризации является параметрическая модель геомеханических процессов в массиве горных пород при отработке угольных пластов длинными столбами по простиранию с полным обрушением кровли [22]. На данный момент массив рассматривается в первом приближении в виде однородной изотропной среды без учета механических свойств горных пород.

Согласно модели при отработке выемочных участков в массиве горных пород происходит формирование «геомеханических слоев» различных уровней структурной иерархии. Процесс структуризации массива начинается от обрабатываемого пласта и развивается в кровлю и в почву. При этом энергетический потенциал массива (упругая энергия) снижается, результатом чего является формирование объемных поверхностей – сводов и сдвижений соответствующих масс массива. Тела «сводов сдвижений» имеют формы, стремящиеся к формам параболоидов. Именно образование такой формы тел соответствует принципу затрат минимума энергии на создание новой поверхности при вертикальной разгрузке массива. В каждом «геомеханическом слое» сначала идет образование сводов с минимальными размерами: с диаметром основания свода-параболоида, близкого к шагу вторичного обрушения и кратного длине очистного забоя, и с высотой свода, равной половине этого диаметра. Далее по мере движения очистного забоя и вовлечения в дезинтеграцию больших объемов подрабатываемого и надрабатываемого массивов происходит процесс образования сводов более высоких уровней иерархии.

Для рассматриваемых горно-геологических условий схематично (в вертикальной плоскости) структуризацию подрабатываемого массива горных пород можно представить, как показано на **рис. 1**, в виде совокупности техногенных сводов сдвижений n -х уровней структурной иерархии массива (n – целое число, изменяется в пределах: $n = 1, 2, 3, \dots, N$). Число уровней N определяется длиной очистного забоя $l_{оч}$ и глубиной ведения горных работ.

Порядок формирования сводов сдвижений следующий. После образования сводов с минимальными размерами (на **рис. 1** не показаны) формируются своды сдвижений уровня $n = 1$, далее с увеличением протяженности выработанного пространства формируются своды сдвижений уровня $n = 2$ (показаны на **рис. 1** пунктирными линиями), процесс заканчивается сводами уровня 3 , достигающими земной поверхности 4 . Высота h сводов-параболоидов равна мощности геомеханического слоя, в котором они сформированы.

Согласно параметрической модели периодичность формирования сводов сдвижений в подрабатываемом массиве в условиях

равных геостатических напряжений соответствует принципу суперпозиции и определяется правилом удвоения мощности «геомеханических слоев». Однако с учетом энергетической составляющей массива проявляется нелинейная закономерность изменений высот сводов при условии, что распределение удельной (на 1 м подвигания забоя) упругой энергии массива в зависимости от глубины залегания «геомеханических слоев» возрастает нелинейно. Подобные процессы характерны и для надрабатываемого массива, но особенности нелинейного изменения упругой энергии пород здесь приводят к уменьшению высот сводов (мощностей «геомеханических слоев»).

Доминирующим в развитии описанных процессов в приконтурной области массива является слой мощностью $l_{оч}/2$. Этому слою соответствует доминирующий свод (свод лавы) с диаметром основания свода в горизонтальной плоскости пласта, равным $l_{оч}\sqrt{2}$.

На **рис. 2** представлена горизонтальная схема (в плоскости обрабатываемого пласта) геомеханической структуризации массива для рассматриваемых горно-геологических условий. Формирование сводов сдвижений $1, 2, 3$ (в соответствии с их нумерацией на **рис. 1** и **2**) происходит при отработке выемочного участка № 48-2 (поз. 4 на **рис. 2**) и выемочного участка № 48-3 (поз. 5 на **рис. 2**). Между конвейерным штреком 6 и вентиляционным штреком 7 расположен газодренажный штрек 8 .

Практические аспекты моделирования геомеханических процессов в массиве

Первым обрабатывали выемочный участок № 48-2, затем № 48-3. После отхода лавы № 48-3 от монтажной камеры на расстоянии $l_{оч}/4$ зафиксированы пучение пород почвы и выдавливание бортов газодренажного штрека, а на расстоянии 600 м отмечено полное перекрытие сечения выработки.

Применение описанной выше параметрической модели геомеханических процессов в массиве горных пород для условий отработки сближенных выемочных участков дает возможность оценить состояние массива в приконтурной зоне и определить участки обрабатываемого пласта, где возможно повышенное горное давление, и можно ожидать возникновения динамических явлений в близлежащих горных выработках.

Для этого сначала рассчитывают геометрические размеры сводов сдвижений, затем на плане в плоскости пласта наносят окружности – проекции их оснований. Контуры оснований сводов указывают на местоположения границ зон опорного давления. Места пересечения контуров соответствуют местам

объединения формирующихся сводов сдвижений и участкам повышенного горного давления на приконтурную часть массива и крепь выработок.

При указанных на рис. 2 местоположениях сближенных выемочных участков 4 и 5 установлены места пересечений окружностей – оснований сводов сдвижений 2 и 3 на газодренажном штреке 8, отмеченные черным цветом и указывающие на участки 9 повышенного горного давления. На небольшом расстоянии от монтажной камеры, когда только формируется свод лавы, участки 9 образованы пересечениями оснований сводов сдвижений уровня иерархии $n = 2$, где зафиксированы динамические явления в виде пучения пород почвы газодренажного штрека 48-3. Однако при отходе от монтажной камеры выемочного участка № 48-3 на расстояние, когда полностью сформировался свод лавы, в интеграцию были включены своды сдвижений уровня иерархии $n = 3$, в результате чего на участках 9 произошли динамические явления большей силы – пучения пород почвы и выдавливание бортов с полным перекрытием сечения выработки. Интеграция сводов сдвижения сближенных лав привела к тому, что напряжения в горных породах, окружающих выработку, достигли величины, которая превысила их механические характеристики, в результате чего при неизменной несущей способности целика породы почвы и бортов газодренажного штрека 48-3 подверглись наибольшей деформациям с выдавливанием их в выработку. Подобные динамические явления являются признаком повышенного горного давления, а места, где они произошли, полностью совпадают с участками, установленными при моделировании геомеханических процессов.

Таким образом, моделирование особенностей взаимодействия сводов сдвижений сближенных лав при отработке угольных пластов длинными столбами по простиранию с полным обрушением кровли дает возможность для заблаговременного (на стадии проектирования) принятия мер по снижению динамической опасности.

Следует отметить еще один важный момент, связанный с газовой составляющей массива. Интеграция сводов сдвижений соседних лав № 48-3 и 48-2 привела к объединению их выработанных пространств и перетоку газа из пространства ранее отработанного выемочного участка в действующий очистной забой. Это обусловило дополнительные сложности при разработке пласта угля, такие как превышение допустимой концентрации метана в исходящей струе воздуха из очистного забоя, дополнительная нагрузка на систему вентиляции, что требует реализации мер по снижению газовой опасности.

Выводы

Разработанная параметрическая модель геомеханических процессов в массиве горных пород при отработке угольных пластов длинными столбами по простиранию с полным обрушением кровли позволяет определить по всей площади выемочного столба участки, потенциально опасные в плане повышенного горного давления.

При планировании горных работ, исходя из местоположения сближенных выемочных столбов и геометрических размеров

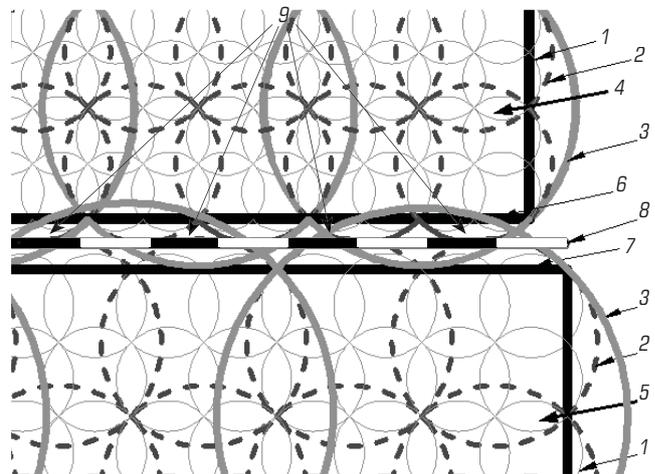


Рис. 2. Фрагмент горизонтальной схемы геомеханической структуризации массива горных пород при отработке сближенных выемочных участков № 48-2 и 48-3:

1, 2, 3 – основания сводов сдвижений уровней $n = 1, 2, 3$ соответственно; 4 – выемочный участок № 48-2; 5 – выемочный участок № 48-3; 6, 7, 8 – конвейерный, вентиляционный, газодренажный штреки соответственно; 9 – участки повышенного горного давления на газодренажный штрек

сводов сдвижений, зависящих, в свою очередь, от длины лавы и глубины ее отработки, необходимо исключить интеграцию сводов сдвижений или свести ее к минимуму. Это достигается корректировкой длин очистных забоев и местами заложения монтажных и демонтажных камер.

В случае невозможности корректировки геометрических размеров сближенных выемочных столбов следует руководствоваться правилами интеграции их сводов, избегая проведения оконтуривающих выработок в местах пересечений контуров оснований сводов.

Размер межлавных целиков необходимо определять с учетом формирования сводов сдвижений при отработке соседних выемочных столбов, используя нормативный документ [23] с уточнением, согласно схеме геомеханической структуризации, величин воздействующего на них горного давления.

Таким образом, предлагаемый способ управления горным давлением при отработке пластов угля длинными столбами позволит осуществлять прогноз участков повышенного горного давления и определять следующие показатели:

- места, где необходимо применять способы сохранения сечения выработок с целью снижения негативного влияния пучения пород и выдавливания бортов выработок;
- зависание кровли в случае задержки ее обрушения из-за несоблюдения кратности величин оснований сводов длине очистного забоя;
- параметры выемочных участков для безопасной, эффективной и безаварийной разработки угольного пласта без проведения трудоемких геофизических исследований.

Библиографический список

- Jinglin Wen, Husheng Li, Fuxing Jiang, Zhengxing Yu, Haitao Ma et al. Rock burst risk evaluation based on equivalent surrounding rock strength // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019. Vol. 29. Iss. 4. P. 571–576.
- Weizhang Liang, Guoyan Zhao, Xi Wang, Jie Zhao, Chunde Ma. Assessing the rockburst risk for deep shafts via distance-based multi-criteria decision making approaches with hesitant fuzzy information // *Engineering Geology*. 2019. Vol. 260. 105211. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105211
- Simsen B. P. Rockburst management in Canadian hard rock mines // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019. Vol. 11. Iss. 5. P. 1036–1043.
- Chambers D. J. A., Boltz M. S., Richardson J. R., Finley S. A. Application of subspace detection on a surface seismic network monitoring a deep silver mine // *Deep Mining 2017: Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining*. – Perth : Australian Centre for Geomechanics, 2017. P. 141–154.
- Hellan K. *Introduction to Fracture Mechanics*. – New York : McGraw Hill, 1985. – 302 p.
- Джевецки Я. Новые методы предотвращения опасности горных ударов // *Глюкауф*. 2002. № 2(3). С. 18–21.
- Jacobi O. *Praxis der Gebirgsbeherrschung*. 2, neu bearbeitete und mit neuen Ergebnissen erweiterte Auflage. – Essen : Verlag Glückauf GmbH, 1981.
- Артемов В. Б., Коршунов Г. И., Логинов А. К., Шик В. М. Динамические формы проявлений горного давления. – СПб.: Наука, 2009. – 347 с.
- Hui Zhou, Haitao Liu, Dawei Hu, Fan Zhang, Fanjie Yang et al. Estimation of the effective thermal properties of cracked rocks // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2016. Vol. 20. No. 8. P. 954–970.
- Xu J. L., Ni J. M., Xuan D. Y., Wang X. Z. Coal mining technology without village relocation by isolated grout injection into overburden // *Coal Science and Technology*. 2015. Vol. 43(12). P. 8–11.
- Lei Nie, Hongfei Wang, Yan Xu, Zechuang Li. A new prediction model for mine subsidence deformation: the arc tangent function model // *Natural Hazards*. 2015. Vol. 75. Iss. 3. P. 2185–2198.
- Dayang Xuan, Binglong Wang, Jialin Xu. A shared borehole approach for coal-bed methane drainage and ground stabilization with grouting // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2016. Vol. 86. P. 235–244.
- Антипов И. В., Стаднюк Е. Д., Козыр С. В. Взаимосвязь технологических операций в лаве с геомеханическими процессами в горном массиве // *Научные труды УкрНДМИ НАН Украины*. – Донецк : УкрНДМИ НАН Украины, 2015. № 15. С. 9–20.
- Лобков Н. И., Козыр С. В., Крижановская Л. Н., Арутюнян Р. М. Механизм сдвижения породных слоев над выработанным пространством // *Научные труды УкрНДМИ НАН Украины*. – Донецк : УкрНДМИ НАН Украины, 2015. № 15. С. 21–30.
- Литвинский Г. Г. Напряженно-деформированное состояние массива горных пород вокруг лавы // *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета*. – Алчевск, 2016. № 3(46). С. 16–24.
- Котляшев А. А., Шемелев В. Г. Апробация технологии разрушения массивов скальных пород с применением рассредоточенных зарядов // *Горный журнал Казахстана*. 2015. № 7. С. 30–34.
- Касьяненко А. Л. Новый способ обеспечения устойчивости пород почвы выемочных выработок // *Проблемы горного давления : сб. ст.* – Донецк, 2016. № 2(29). С. 17–27.
- Черданцев Н. В., Шадрин А. В. Расчет траектории движения одиночной трещины, расположенной в массиве горных пород, нагруженной давлением жидкости // *Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2017. № 4. С. 18–26.
- Шадрин А. В., Клишин В. И. Совершенствование методов автоматизированного прогноза опасности проявления динамических явлений в процессе разупрочнения кровли и профилактической гидрообработки угольных пластов // *Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности*. 2017. № 3. С. 31–35.
- Тайлаков О. В., Уткаев Е. А., Смыслов А. И., Кормин А. Н. Физическое моделирование изменения фильтрационных свойств угольных пластов // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2014. № 6(106). С. 13–16.
- Козырева Е. Н., Шинкевич М. В. Особенности газогемеханических процессов на выемочном участке шахты // *Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2010. № 2. С. 28–35.
- Полевичиков Г. Я., Козырева Е. Н., Шинкевич М. В., Леонтьева Е. В. Техногенная структуризация массива горных пород при выемке пласта угля // *Горный журнал*. 2017. № 4. С. 19–23. DOI: 10.17580/gzh.2017.04.03
- Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений»: Приказ Ростехнадзора от 10.12.2020 № 515. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573264171> (дата обращения: 15.06.2021). **PK**

«GORNYI ZHURNAL», 2022, № 3, pp. 4–8
DOI: 10.17580/gzh.2022.03.01

Practical aspects of induced structurization of rock mass

Information about authors

E. N. Kozyreva¹, Head of Laboratory, Candidate of Engineering Sciences

M. V. Shinkevich¹, Senior Researcher, Candidate of Engineering Sciences, max-valerich@rambler.ru

¹Institute of Coal, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russia

Abstract

Ground control is connected with monitoring of deformations of enclosing rock mass in the course of mining for ensuring stability of underground openings. One of the negative consequences of redistribution of rock pressure in an extraction panel during mining operations is swelling of floor rocks. The present article considers mining conditions of coal seams using the features of formation and development of nonlinear structurization of rock mass during longwall advance, earlier revealed at the Institute of Coal. The calculation basis is the developed parametrical model of geomechanical processes in rock mass during mining using the longwall top coal caving method. The rock mass is considered at the first approximation as a uniform isotropic medium without regard to mechanical properties of rocks. The model rock mass is presented as a set of manmade geomechanical layers. Their formation begins from a coal seam being mined and develops with the longwall advance with regard to elastic energy of rock mass. In the manmade change of external conditions, the rock mass rebates its energy potential via arching and movement. The bodies of “arches of movement” tend to paraboloids in shape. Formation of such shapes corresponds to the concept of minimum energy spend for the creation of a new surface under uniaxial unloading. The height of the arches-paraboloids is equal to the thickness of geomechanical layers at different scales of the structural hierarchy of rock mass. The horizontal dimension of the arches-paraboloids is divisible by a longwall length. It is possible to detect sites of increased rock pressure applied to the boundaries and roof support of underground openings by means of geometrical overlapping of circles having diameters equal to the basal parts of displacement arches with load-bearing edges. Integration of the displacement arches of the adjacent extraction panels leads to connection of their mined-out areas and to gas cross-flow between them. The cardinaly new approach to understanding geomechanical processes in rock mass can allow predicting adverse phenomena of rock pressure and the increased methane emission during high-rate longwalling.

Keywords: rock mass, coal seam, geomechanical processes, extraction panel, methane emission, rock mass structurization, rock pressure, longwall.

References

- Jinglin Wen, Husheng Li, Fuxing Jiang, Zhengxing Yu, Haitao Ma et al. Rock burst risk evaluation based on equivalent surrounding rock strength. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019. Vol. 29, Iss. 4. pp. 571–576.
- Weizhang Liang, Guoyan Zhao, Xi Wang, Jie Zhao, Chunde Ma. Assessing the rockburst risk for deep shafts via distance-based multi-criteria decision making approaches with hesitant fuzzy information. *Engineering Geology*. 2019. Vol. 260. 105211. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105211
- Simsen B. P. Rockburst management in Canadian hard rock mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019. Vol. 11, Iss. 5. pp. 1036–1043.
- Chambers D.J. A., Boltz M. S., Richardson J. R., Finley S. A. Application of subspace detection on a surface seismic network monitoring a deep silver mine. *Deep Mining 2017: Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining*. Perth : Australian Centre for Geomechanics, 2017. pp. 141–154.
- Hellan K. *Introduction to Fracture Mechanics*. New York : McGraw Hill, 1985. 302 p.
- Drzewiecki J. Neue Verfahren zur Bekämpfung der Gerbergsschlaggefahr. *Glückauf*. 2002. No. 2(3). pp. 18–21.
- Jacobi O. *Praxis der Gebirgsbeherrschung*. 2, neu bearbeitete und mit neuen Ergebnissen erweiterte Auflage. Essen : Verlag Glückauf GmbH, 1981.
- Artemev V. B., Korshunov G. I., Loginov A. K., Shik V. M. Dynamic phenomena of rock pressure. Saint-Petersburg : Nauka, 2009. 347 p.
- Hui Zhou, Haitao Liu, Dawei Hu, Fan Zhang, Fanjie Yang et al. Estimation of the effective thermal properties of cracked rocks. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2016. Vol. 20, No. 8. pp. 954–970.
- Xu J. L., Ni J. M., Xuan D. Y., Wang X. Z. Coal mining technology without village relocation by isolated grout injection into overburden. *Coal Science and Technology*. 2015. Vol. 43(12). pp. 8–11.
- Lei Nie, Hongfei Wang, Yan Xu, Zechuang Li. A new prediction model for mine subsidence deformation: the arc tangent function model. *Natural Hazards*. 2015. Vol. 75, Iss. 3. pp. 2185–2198.
- Dayang Xuan, Binglong Wang, Jialin Xu. A shared borehole approach for coal-bed methane drainage and ground stabilization with grouting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2016. Vol. 86. pp. 235–244.
- Antipov I. V., Stadnyuk E. D., Kozyr S. V. Interconnection of technological operations in longwall with geomechanical processes in rock mass. *UkrNIMI's Transactions*. Donetsk : UkrNIMI NAN Ukraine, 2015. No. 15. pp. 9–20.
- Lobkov N. I., Kosyr S. V., Krizhanovskaya L. N., Arutyunyan R. M. Mechanism of rock layer movement over the waste area. *UkrNIMI's Transactions*. Donetsk : UkrNIMI NAN Ukraine, 2015. No. 15. pp. 21–30.

15. Litvinskiy G. G. Stress-strain state of rock mass around a longwall. *Transactions of the Donetsk State Technical University*. Alchevsk, 2016. No. 3(46). pp. 16–24.
16. Kotyashov A. A., Shemenov V. G. Testing hard rock fracture technology using decoupled charges. *Gornyi zhurnal Kazakhstana*. 2015. No. 7. pp. 30–34.
17. Kasyanenko A. L. A new method to ensure stability of floor rocks in extraction panels. *Rock Pressure: Collected Works*. Donetsk, 2016. No. 2(29). pp. 17–27.
18. Cherdantsev N. V., Shadrin A. V. A fluid pressure-loaded single crack located in a rock massif propagation trajectory calculation. *Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti*. 2017. No. 4. pp. 18–26.
19. Shadrin A. V., Klishin V. I. The improvement of automated dynamic phenomena forecast methods during roof weakening and preventive hydrotreating. *Vestnik Nauchnogo tsentra VostNII po promyshlennoy i ekologicheskoy bezopasnosti*. 2017. No. 3. pp. 31–35.
20. Taylakov O. V., Utkaev E. A., Smyslov A. I., Kormin A. N. Physical modelling of coal seams filtration properties fluctuation. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2014. No. 6(106). pp. 13–16.
21. Kozyreva E. N., Shinkevich M. V. Peculiar features of gas-geomechanical processes at a mine coal extraction section. *Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti*. 2010. No. 2. pp. 28–35.
22. Polevshchikov G. Ya., Kozyreva E. N., Shinkevich M. V., Leontyeva E. V. Induced structuring of rock mass under coal mining. *Gornyi Zhurnal*. 2017. No. 4. pp. 19–23. DOI: 10.17580/gzh.2017.04.03
23. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/573264171> (accessed: 15.06.2021).

УДК 622.83:550.832

МЕТОД И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ ПРИКОНТУРНОГО МАССИВА ПОРОД НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В СКВАЖИНАХ*

П. В. НИКОЛЕНКО, доцент, канд. техн. наук, p.nikolenko@misis.ru
М. Г. ЗАЙЦЕВ, аспирант
М. Д. ЧЕПУР, аспирант

НИТУ «МИСиС», Москва, Россия

Введение

Подземная добыча полезных ископаемых является производством, сопряженным с высокими рисками. Основным источником рисков является опасность частичного или полного разрушения конструктивных элементов систем разработки (кровли выработки [1], целиков [2]) под действием горного давления или в результате проявления геодинамических явлений [3]. В значительной степени снизить уровень риска возможно на основе получения наиболее полной, надежной и оперативной информации о строении и состоянии приконтурного массива.

Для анализа структурных неоднородностей в приконтурной области (например, трещин и расслоений в кровле) используют активные акустические измерения в ультразвуковом (УЗ) диапазоне частот по схемам межскважинного прозвучивания или каротажа [4–6]. Подобные методы позволяют получать информацию о внутреннем строении массива на относительно небольших базах измерения (десятки сантиметров). Суть методов заключается в излучении и приеме ультразвуковых колебаний в локальной области массива. В работах [7, 8] приводятся результаты выполнения каротажных ультразвуковых измерений на модельных скважинах с заранее заложёнными дефектами. Результаты подобных исследований позволяют грубо оценивать размеры дефектов и их форму. Однако следует принять во внимание, что измерения осуществляют в водонаполненных скважинах, излучение сигналов происходит с помощью цилиндрических преобразователей через прослойку воды. При исследовании свойств приконтурного массива часто приходится иметь дело с вертикальными или наклонными скважинами, полное

Предложен новый метод экспресс-контроля трещиноватости приконтурного массива пород, основанный на оптическом сканировании стенок скважины дискретными фоточувствительными элементами. Метод позволяет оперативно выявлять трещины, пересекающие скважину, а также определять их углы падения и простираения. Показано, что при использовании взвешенного метода наименьших квадратов по алгоритму Левенберга – Марквардта и аппроксимации данных с восьми фоточувствительных элементов каротажного зонда можно обеспечить достаточную точность определения геометрических параметров трещин и с высокой надежностью выявлять трещины с раскрытием от 0,5 мм.

Ключевые слова: трещиноватость, контроль, скважины, массивы горных пород, оптические измерения, безопасность, каротаж
DOI: 10.17580/gzh.2022.03.02

заполнение водой которых невозможно. В этом случае обычно применяют пневмоприжим преобразователей к стенкам скважин с помощью специальных устройств. В работах [9, 10] описывается опыт применения сухого контакта при скважинных ультразвуковых измерениях. Однако невозможность учета степени нарушенности прискважинного массива приводит к тому, что авторы предлагают использовать ультразвуковые измерения лишь в качестве источников информации о локальных упругих свойствах массива при реализации традиционных методов разгрузки. В работах [11, 12] описывается опыт применения ультразвукового каротажа в вертикальных скважинах, пробуренных в кровле горных выработок. Однако трудоемкость подобных методов крайне велика, измерения в одной скважине могут занимать несколько часов.

Кроме УЗ каротажных измерений распространение получили акустические телеметрические методы контроля, позволяющие осуществлять дистанционное высокочастотное УЗ-сканирование стенок скважины [13–15]. Однако реальный практический опыт показывает, что подобные измерения позволяют выявлять трещины

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-77-00046).

© Николенко П. В., Зайцев М. Г., Чепур М. Д., 2022

только с раскрытием более 3 мм и каверны более 1см [16].

Значительно повысить эффективность и надежность акустических измерений в необводненных скважинах возможно на основе комплексирования УЗ и оптических измерений. На сегодняшний день оптические измерения подразумевают получение изображений с помощью камер высокого разрешения в диапазоне длин волн видимого света [17–20]. Наряду с видимым светом предпринимались попытки использования инфракрасного [21] и ультрафиолетового [22] диапазонов длин волн (впрочем, для последних было необходимо закачивать в окоскважинный массив специализированный эпоксидный компаунд). Описанные оптические измерения отличаются высокой стоимостью используемого оборудования и сложностью обработки получаемых фотоизображений. В значительной степени интерпретация результатов измерений носит субъективный характер и зависит от квалификации и опыта оператора.

Снизить влияние описанных факторов возможно при замене фотофиксации стенок скважины дискретными измерениями в локальных областях с помощью фоточувствительных элементов. Подобный подход предполагает получение результатов измерений в виде коротажных кривых зависимости интенсивности отраженного света I от координаты вдоль оси скважины z . В таком виде данные о наличии и ориентации трещин в породном массиве могут быть легко интерпретированы как отдельно, так и совместно с УЗ и другими коротажными измерениями.

Для реализации предложенного подхода необходимо экспериментально установить степень помехового влияния типа породы, а также шероховатости ее поверхности на параметры отраженного сигнала. Кроме того, следует оценить границы применимости метода в зависимости от ширины раскрытия трещины.

Постановка и результаты лабораторных экспериментов

Принцип оптического определения наличия трещин основан на измерении интенсивности отраженного от поверхности скважины света и проиллюстрирован на **рис. 1, а, б**. Очевидно, что в этом случае на величину I также будут влиять отражающие свойства поверхности, такие как степень ее шероховатости, а также цвет породы, определяемый ее генотипом. Первый этап экспериментальных исследований заключался в оценке помехового влияния указанных свойств породы на интенсивность отраженного светового потока. Для этого использовали образцы в виде параллелепипедов

размером 40×40×80 мм, изготовленные из следующих горных пород: кальцитового оникса (группа «О»), серпентинита Лабинского месторождения (группа «С»), гипса Новомосковского месторождения (группа «Г»), доломита Мелеховского месторождения (группа «Д1»), гранита Токковского месторождения (группа «Гр1»), долерита Хребтового месторождения (группа «Дт»), железистого кварцита КМА (группа «ЖК»), гранита Мансуровского месторождения (группа «Гр2»), а также гранита месторождения Возрождение (группа «Гр3»). На каждую из боковых граней образца была нанесена фактурная поверхность, эмитирующая различные типы обработки стенки скважины. Шероховатость поверхности определяли через параметр R_a , который представляет собой среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины [23]. Для четырех граней образцов значения шероховатости составляли $R_a = 10, 50, 100$ и 200 мкм.

Измерения выполняли специально сконструированным электронным модулем, подключаемым к персональному компьютеру. В качестве излучателя света использовали светодиод GNL-5053UWC видимого света (5500К–7000К). В качестве фоточувствительного элемента выступал фоторезистор PGM5516, подключенный как делитель напряжений к АЦП ADS1115 разрядностью 16 бит. Угол между осью светодиода и поверхностью сканирования составлял 45° . Для каждого образца и типа поверхности были определены значения интенсивности отраженного света I на основе статистического анализа 30 измерений на каждой грани. Результаты приведены на **рис. 1, в**. Также для сравнения на **рис. 1, в** показано значение I для случая прохождения фоточувствительного датчика над трещиной с раскрытием 1 мм.

Из диаграммы (см. **рис. 1, в**) видно, что наименьшие значения I соответствуют поверхностям образцов с наибольшей шероховатостью, что, очевидно, связано с высокой степенью рассеяния света на неровностях. Генотип породы, определяющий цвет ее поверхности, также оказывает влияние на значения I , которые изменяются в пределах 30 %. При этом прохождение фоточувствительного элемента над трещиной приводит к значительно большему изменению значений I (падение составляет более 70 %). Таким образом, цвет и шероховатость поверхности скважины можно считать помеховыми факторами, однако их влияние на значения интенсивности отраженного света оказывается незначительным на фоне изменений I при обнаружении трещины.

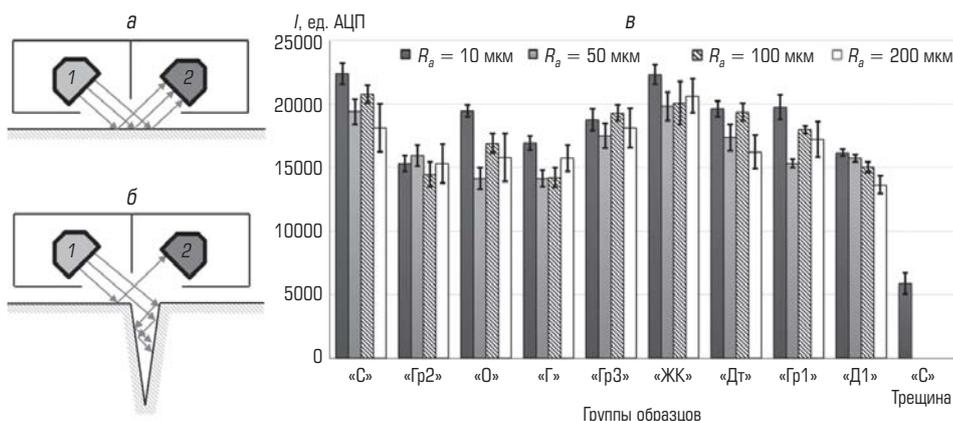


Рис. 1. Схема оптического сканирования ровной поверхности (а), поверхности с трещиной (б) и результаты экспериментального определения зависимости $I(R_a)$ на различных образцах горных пород (в):

1 – источник света; 2 – фоточувствительный элемент; планками на гистограмме показано среднее квадратическое отклонение

Для проверки работоспособности предлагаемого метода была изготовлена модель скважины из песчано-цементной смеси диаметром $d_{ск} = 76$ мм и шероховатостью внутренней поверхности $R_a = 200$ мкм. В скважине была оборудована щель под углом 30° с изменяемой шириной раскрытия, имитирующая трещину. Оптическое сканирование стенок скважины осуществляли с помощью изготовленного 8-канального зонда, подключаемого к персональному компьютеру. В указанном зонде фоточувствительные элементы были расположены равномерно по окружности с шагом 45° . Сканирование выполняли вдоль вертикальной оси z с шагом 1 мм.

Общий вид экспериментального стенда представлен на **рис. 2, а**, а пример результатов сканирования скважины для трещины с раскрытием 1 мм в виде нормированных зависимостей $I(z)$ – на **рис. 2, б**.

В задачу исследования входило установление ориентации трещины при разных величинах ее раскрытия. Ориентация трещин определяется двумя углами: углом падения (наклона) α и углом простираения β , что проиллюстрировано на **рис. 3, а**.

На **рис. 3, б** представлена развертка участка скважины, пересеченной трещиной. При этом на плоскости z/w трещина представляет собой синус, амплитуда A которого обусловлена углом падения α , а фаза φ – углом простираения β .

Первым этапом обработки являлось нахождение координат минимальных значений I_i^{min} , соответствующих прохождению i -го фоточувствительного элемента над трещиной. Исходя из известного расстояния между датчиками, а также диаметра скважины, указанные точки наносили на развертку скважины, как это показано на **рис. 3, б**. Задача определения углов α и β в этом случае сводится к аппроксимации указанных точек функцией

$$z = a_0 + a_1 \cos(a_2 w + a_3) \quad (1)$$

и последующим нахождением α и β из выражений

$$\alpha = \frac{180 \arctg \frac{2a_1}{d_{ск}}}{\pi}; \quad (2)$$

$$\beta = \frac{a_3 180}{\pi} - 90, \quad (3)$$

где a_0, a_1, a_2 и a_3 – коэффициенты регрессии (в данном случае $a_1 = A, a_3 = \varphi$); w – горизонтальная координата на развертке скважины (в соответствие с **рис. 3, б**).

Однако из **рис. 2, б** видно, что для первого канала изменение I вблизи минимума не носит резкого характера, пик оказывается

растянутым вдоль оси скважины. Это обусловлено наличием сколов на границе трещины (характерных и для реальных трещин в массиве). Очевидно, что результаты измерений в таких областях будут в значительной степени искажены и должны вносить меньший вклад в процесс аппроксимации, чем точки с ярко выраженными пиками вблизи I_i^{min} . Для реализации подобного подхода аппроксимацию выполняли методом взвешенных наименьших квадратов, основной смысл которого можно проиллюстрировать выражением

$$\sum_{i=1}^n W_i (z_i - z_i^*)^2 = \min, \quad (4)$$

где W_i – матрица весовых коэффициентов; z_i и z_i^* – измеренная и предсказанная аппроксимацией z координата точки i -м фоточувствительным элементом. Минимальную сумму квадратов остатков находим по алгоритму Левенберга – Марквардта [24], наиболее эффективному при малом числе измерений.

На сегодняшний день существует множество подходов к формированию весов для экспериментальных точек. Одним из распространенных подходов является использование величин, обратно пропорциональных дисперсии значений в окрестности точки. Однако в данной работе предлагается использовать прямое назначение весов (так называемый direct weighting). В этом случае значения W_i получают путем анализа ширины пика графиков $I_i(z)$ из выражения

$$W_i = 1/\Delta I_i, \quad (5)$$

где ΔI_i – число соседних точек нормированной зависимости $I_i(z)$, имеющих значение 0.

Таким образом, увеличение ширины пика $I_i(z)$ снижает вес W_i , что повышает точность аппроксимации и, как следствие, надежность определения углов α и β . Это особенно актуально при малом раскрытии трещин. На **рис. 4, а** показана аппроксимация точек функцией (1), а на **рис. 4, б** представлены результаты определения относительных погрешностей оценок углов падения и простираения трещины $\Delta\alpha$ и $\Delta\beta$ при использовании для аппроксимации метода наименьших квадратов (МНК) и предложенного в настоящей работе взвешенного метода наименьших квадратов (ВМНК). Также на **рис. 4, б** представлено вычисленное на основе анализа зависимостей $I(z)$ соотношение сигнал:шум, которое косвенно может указывать на эффективность применения оптического метода для поиска трещин с различным раскрытием.

Из **рис. 4, б** следует, что применение предложенного ВМНК существенно повышает точность определения углов α и β . Также

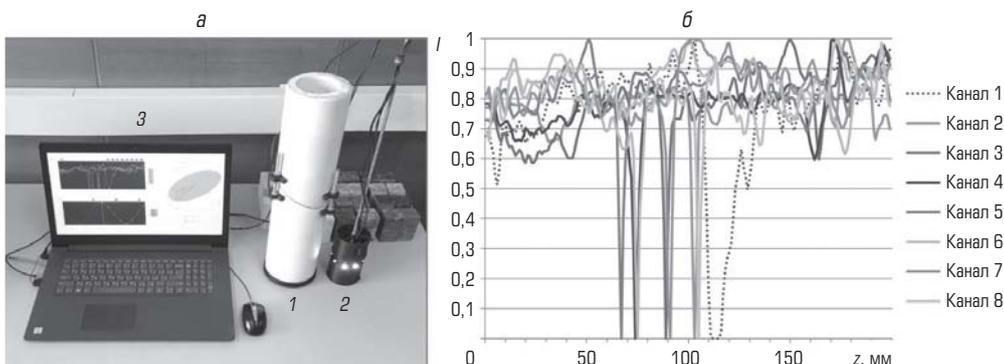


Рис. 2. Лабораторный стенд (а) и результаты оптического сканирования (б):
 1 – модель скважины;
 2 – оптический зонд,
 3 – персональный компьютер

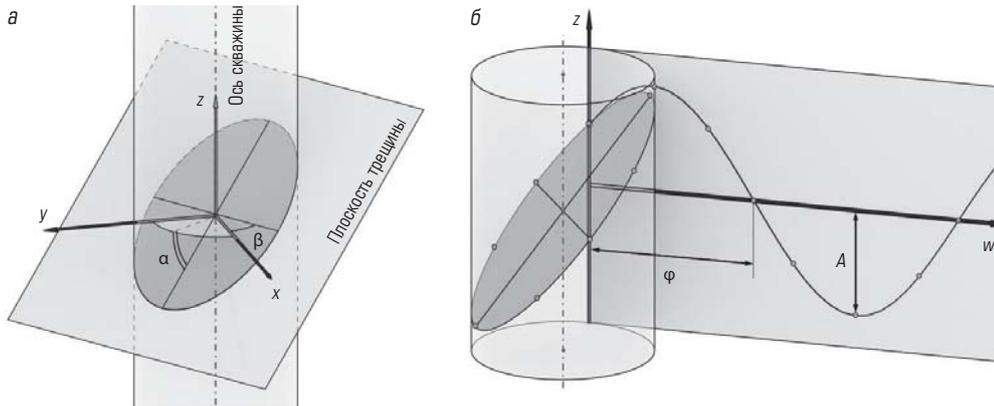


Рис. 3. Схема ориентации трещины, пересекающей измерительную скважину (а), и развертка участка скважины (б)

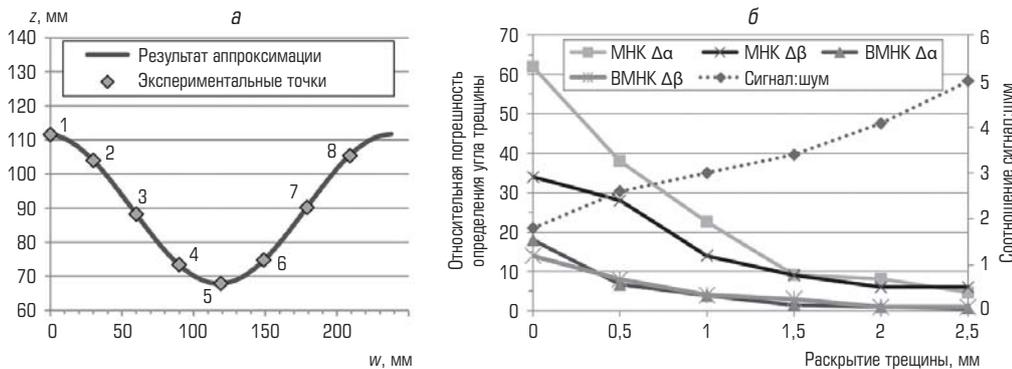


Рис. 4. Результат аппроксимации с использованием ВМК (а) и относительные погрешности определения углов α и β (б) в зависимости от величины раскрытия трещины: z – координата вдоль оси скважины

очевидно, что для сомкнутых трещин эффективность метода снижается на фоне низкого соотношения сигнал:шум. Уже при раскрытии трещины 0,5 мм погрешности определения углов падения и простираения составляют менее 8 %, а при раскрытии 1 мм – менее 5 %.

Выводы

В работе экспериментально обосновывается метод оптического сканирования скважин, оборудованных в приконтурной области массива, позволяющий в автоматизированном режиме выявлять пересекающие скважину трещины, а также определять углы их падения и простираения. Показано, что шероховатость и цвет поверхности скважины могут выступать помеховыми факторами

при реализации сканирования, однако не оказывают существенного влияния на его результаты. Наибольшую точность метод демонстрирует при использовании взвешенного метода наименьших квадратов при аппроксимации показаний восьми фоточувствительных датчиков каротажного зонда. Основными достоинствами предлагаемого метода и оборудования являются возможность быстрого и непрерывного бесконтактного сканирования стенок скважины, а также вывод результатов сканирования сразу по завершении сканирования. Также к достоинствам метода можно отнести получение измерительной информации в виде каротажных кривых, которые можно обрабатывать совместно с результатами измерений другими каротажными методами, например ультразвуковыми.

Библиографический список

- Шокин Ю. П. О нарушениях сплошности подработанной водозащитной толщи на калийных рудниках // Горный журнал. 2019. № 1. С. 70–75. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.15
- Асанов В. А., Евсеев А. В., Паньков И. Л., Токсаров В. Н. Исследование процессов деформирования горных пород и элементов камерной системы разработки // Горный журнал. 2018. № 6. С. 13–16. DOI: 10.17580/gzh.2018.06.02
- Трофимов А. В., Киркин А. П., Румянцев А. Е., Яваров А. В. Применение численного моделирования для определения оптимальных параметров метода полной разгрузки керна при оценке напряженно-деформированного состояния массива горных пород // Цветные металлы. 2020. № 12. С. 22–27. DOI: 10.17580/tsm.2020.12.03
- Kobayashi R. Studies on Crack Distribution and Sonic Velocity Change in Rocks // Journal of the Mining and Metallurgical Institute of Japan. 1974. Vol. 90. Iss. 1031. P. 21–26.
- Шкуратник В. Л., Бочкарева Т. Н. Теория электроакустического тракта при межскважинном прозвучивании горных пород околоразрабаточного пространства // ФТПРПИ. 1996. № 6. С. 44–51.
- Rasolofosaon P. N. J., Rabbel W., Siegesmund S., Vollbrecht A. Characterization of crack distribution: fabric analysis versus ultrasonic inversion // Geophysical Journal International. 2000. Vol. 141. Iss. 2. P. 413–424.
- Tianyang Li, Zizhen Wang, Yu Jeffrey Gu, Ruihe Wang, Yuzhong Wang. Experimental study of fracture structure effects on acoustic logging data using a synthetic borehole model // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2019. Vol. 183. 106433. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106433
- Tianyang Li, Zizhen Wang, Nian Yu, Ruihe Wang, Yuzhong Wang. Numerical study of pore structure effects on acoustic logging data in the borehole environment // Fractals. 2020. Vol. 28. No. 3. 2050049. DOI: 10.1142/S0218348X20500498
- Liu Yang, Li Yuan, Qiao Lan, Fan Dawei. Dry coupled ultrasonic testing technology and its application in testing rock dynamic and static parameters // Journal of China Coal Society. 2019. Vol. 44. No. 5. P. 1465–1472.
- Yang Liu, Lan Qiao, Yuan Li, Guodong Ma, Golosov A. M. Ultrasonic Spectrum Analysis of Granite Damage Evolution Based on Dry-Coupled Ultrasonic Monitoring Technology // Advances in Civil Engineering. 2020. Vol. 2020. 8881800. DOI: 10.1155/2020/8881800

11. Кормнов А. А., Николенко П. В. Структурная диагностика пород кровли горной выработки с использованием ультразвукового шумового корреляционного каротажа // ГИАБ. 2016. № 8. С. 265–271.
12. Шкуратник В. Л., Николенко П. В., Кормнов А. А. Изменение корреляционных характеристик шумового акустического сигнала при прозвучивании горных пород в условиях одноосного механического нагружения // Горный журнал. 2016. № 6. С. 60–63. DOI: 10.17580/gzh.2016.06.03
13. Winkler K. W., D'Angelo R. Ultrasonic borehole velocity imaging // *Geophysics*. 2006. Vol. 71. Iss. 3. P. 25–30.
14. Rui Yuan, Denglin Han, Yangang Tang, Hongxing Wei, Tao Mo et al. Fracture characterization in oil-based mud boreholes using image logs: example from tight sandstones of Lower Cretaceous Bashijiqike Formation of KSS well area, Kuqa Depression, Tarim Basin, China // *Arabian Journal of Geosciences*. 2021. Vol. 14. Iss. 6. 435. DOI: 10.1007/s12517-021-06750-y
15. Ting Lei, Smaine Zeroug, Sandip Bose, Prioul R., Donald A. Inversion of High-Resolution High-Quality Sonic Compressional and Shear Logs for Unconventional Reservoirs // *Petrophysics*. 2019. Vol. 60. No. 6. P. 697–711.
16. Еникеев В. Н., Ташбулатов В. Д., Гаифуллин М. Я., Гуман О. М. Применение скважинных акустических методов для решения задач разработки месторождений твердых полезных ископаемых // Каротажник. 2011. № 5(203). С. 224–237.
17. Williams J. H., Johnson C. D. Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies // *Journal of Applied Geophysics*. 2004. Vol. 55. Iss. 1-2. P. 151–159.
18. Ozkaya S. I., Mattner J. Fracture connectivity from fracture intersections in borehole image logs // *Computers & Geosciences*. 2003. Vol. 29. Iss. 2. P. 143–153.
19. Скворцов В. Ю., Скобелев А. В. Глубинная телевизионная видеосистема «Арго-цифра» на каротажном кабеле // Каротажник. 2012. № 1(211). С. 110–116.
20. Козырев А. А., Константинов К. Н., Рыбин В. В., Бушков В. К. Экспериментальные определения параметров напряженного состояния прибортового массива пород карьера «Восточный» Олимпиадинского золоторудного месторождения // Проблемы недропользования. 2018. № 3(18). С. 61–69.
21. Yuanming Ji. Infrared radiation with deformation of bolt and rock // *Advances in Infrared Imaging and Applications : International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2009*. – Beijing, 2009. Vol. 7383. DOI: 10.1117/12.830941.
22. Wang Weixing, Wang Fengping, Huang Xiaojun, Song Junfang. Rock fracture image acquisition using two kinds of lighting and fusion on a wavelet transform // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2016. Vol. 75. Iss. 1. P. 311–324.
23. ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – М. : Стандартинформ, 2018. – 8 с.
24. Jifeng Bao, Carisa Kwok Wai Yu, Jinhua Wang, Yaohua Hu, Jen-Chih Yao. Modified inexact Levenberg–Marquardt methods for solving nonlinear least squares problems // *Computational Optimization and Applications*. 2019. Vol. 74. Iss. 2. P. 547–582. **PK**

«GORNYI ZHURNAL», 2022, № 3, pp. 8–12
DOI: 10.17580/gzh.2022.03.02

Method and equipment for the express-control of fracturing in adjacent rock mass by optical borehole logging

Information about authors

P. V. Nikolenko¹, Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences, p.nikolenko@misis.ru
M. G. Zaitsev¹, Post-Graduate Student
M. D. Chepur¹, Post-Graduate Student
¹NUST MISIS, Moscow, Russia

Abstract

Safety of mining should be based on reliable and timely information about the structure of the adjacent rock mass. Today, the main sources of such information are the acoustic and telemetering surveys in boreholes. At the same time, ultrasonic logging measurements are highly labor-intensive, and video imaging of borehole walls features complexity and subjectivity of image interpretation. In this paper, we propose a new method based on optical scanning of borehole walls using discrete photosensitive elements. The method allows identifying cracks intersecting the borehole, as well as determining their orientation angles α and β . To implement the method, an eight-channel optical logging probe and a dedicated software have been developed, which make it possible to determine the angles α and β in an automated mode immediately after scanning. Based on the representative sampling of rocks of various genotypes, it is experimentally proved that variations in the roughness and color of the scanned surface have no significant impact on the effectiveness of the proposed method. The laboratory studies show that the use of the weighted least square method according to the Levenberg–Marquardt algorithm to approximate data from eight photosensitive elements of a logging probe can improve the determination accuracy of crack geometry and to detect fractures with an opening of 0.5 mm and wider at high reliability. Furthermore, the advantages of the method include acquisition of measurement information in the form of logging curves ready for joint processing with the results of the other logging methods, for example, ultrasonic logging.

The study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 21-77-00046.

Keywords: cracks, control, boreholes, rock mass, optical measurements, safety, logging.

References

1. Shhokin Yu. P. Undermined water-impervious strata discontinuity in potassium mines. *Gornyi Zhurnal*. 2019. No. 1. pp. 70–75. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.15
2. Asanov V. A., Evseev A. V., Pankov I. L., Toksarov V. N. Deformation processes in rock mass and stoping system elements. *Gornyi Zhurnal*. 2018. No. 6. pp. 13–16. DOI: 10.17580/gzh.2018.06.02
3. Trofimov A. V., Kirkin A. P., Rummyantsev A. E., Yavarov A. V. Use of numerical modelling to determine optimum overcoring parameters in rock stress-strain state analysis. *Tsvetnye Metally*. 2020. No. 12. pp. 22–27. DOI: 10.17580/tsm.2020.12.03
4. Kobayashi R. Studies on Crack Distribution and Sonic Velocity Change in Rocks. *Journal of the Mining and Metallurgical Institute of Japan*. 1974. Vol. 90, Iss. 1031. pp. 21–26.
5. Shkuratnik V. L., Bochkareva T. N. Theory of electroacoustic path during the interhole sonic testing of rocks surrounding a worked space. *Journal of Mining Science*. 1996. Vol. 32, Iss. 6. pp. 476–482.
6. Rasolofoaon P. N. J., Rabbel W., Siegesmund S., Vollbrecht A. Characterization of crack distribution: fabric analysis versus ultrasonic inversion. *Geophysical Journal International*. 2000. Vol. 141, Iss. 2. pp. 413–424.

7. Tianyang Li, Zizhen Wang, Yu Jeffrey Gu, Ruihe Wang, Yuzhong Wang. Experimental study of fracture structure effects on acoustic logging data using a synthetic borehole model. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019. Vol. 183. 106433. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106433
8. Tianyang Li, Zizhen Wang, Nian Yu, Ruihe Wang, Yuzhong Wang. Numerical study of pore structure effects on acoustic logging data in the borehole environment. *Fractals*. 2020. Vol. 28, No. 3. 2050049. DOI: 10.1142/S0218348X20500498
9. Liu Yang, Li Yuan, Qiao Lan, Fan Dawei. Dry coupled ultrasonic testing technology and its application in testing rock dynamic and static parameters. *Journal of China Coal Society*. 2019. Vol. 44, No. 5. pp. 1465–1472.
10. Yang Liu, Lan Qiao, Yuan Li, Guodong Ma, Golosov A. M. Ultrasonic Spectrum Analysis of Granite Damage Evolution Based on Dry-Coupled Ultrasonic Monitoring Technology. *Advances in Civil Engineering*. 2020. Vol. 2020. 8881800. DOI: 10.1155/2020/8881800
11. Kormnov A. A., Nikolenko P. V. Structural diagnostics of underground excavation roof using ultrasonic noise correlation logging. *GIAБ*. 2016. No. 8. pp. 265–271.
12. Shkuratnik V. L., Nikolenko P. V., Kormnov A. A. Change in the correlation characteristics of acoustic noise in sonic testing of rocks under uniaxial mechanical loading. *Gornyi Zhurnal*. 2016. No. 6. pp. 60–63. DOI: 10.17580/gzh.2016.06.03
13. Winkler K. W., D'Angelo R. Ultrasonic borehole velocity imaging. *Geophysics*. 2006. Vol. 71, Iss. 3. pp. 25–30.
14. Rui Yuan, Denglin Han, Yangang Tang, Hongxing Wei, Tao Mo et al. Fracture characterization in oil-based mud boreholes using image logs: example from tight sandstones of Lower Cretaceous Bashijiqike Formation of KSS well area, Kuqa Depression, Tarim Basin, China. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021. Vol. 14, Iss. 6. 435. DOI: 10.1007/s12517-021-06750-y
15. Ting Lei, Smaine Zeroug, Sandip Bose, Prioul R., Donald A. Inversion of High-Resolution High-Quality Sonic Compressional and Shear Logs for Unconventional Reservoirs. *Petrophysics*. 2019. Vol. 60, No. 6. pp. 697–711.
16. Еникеев В. Н., Ташбулатов В. Д., Гаифуллин М. Я., Гуман О. М. Application of downhole acoustic methods for solving problems of solid mineral field development. *Karotazhnik*. 2011. No. 5(203). pp. 224–237.
17. Williams J. H., Johnson C. D. Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies. *Journal of Applied Geophysics*. 2004. Vol. 55, Iss. 1-2. pp. 151–159.
18. Ozkaya S. I., Mattner J. Fracture connectivity from fracture intersections in borehole image logs. *Computers & Geosciences*. 2003. Vol. 29, Iss. 2. pp. 143–153.
19. Skvortsov V. Yu., Skobelev A. V. Deep tele video system Argo-tsifra with logging cable. *Karotazhnik*. 2012. No. 1(211). pp. 110–116.
20. Kozыrev A. A., Konstantinov K. N., Rybin V. V., Bushkov V. K. Experimental determination of the parameters of the stressed state of the adjacent rock mass nearby the open pit wall: Vostochny quarry of the Olimpiadinskoe gold deposit. *Problemy nedropolzovaniya*. 2018. No. 3(18). pp. 61–69.
21. Yuanming Ji. Infrared radiation with deformation of bolt and rock. *Advances in Infrared Imaging and Applications : International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2009*. Beijing, 2009. Vol. 7383. DOI: 10.1117/12.830941.
22. Wang Weixing, Wang Fengping, Huang Xiaojun, Song Junfang. Rock fracture image acquisition using two kinds of lighting and fusion on a wavelet transform. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2016. Vol. 75, Iss. 1. pp. 311–324.
23. GOST 2789–73. Surface roughness. Parameters and characteristics. Moscow : Standartinform, 2018. 8 p.
24. Jifeng Bao, Carisa Kwok Wai Yu, Jinhua Wang, Yaohua Hu, Jen-Chih Yao. Modified inexact Levenberg–Marquardt methods for solving nonlinear least squares problems. *Computational Optimization and Applications*. 2019. Vol. 74, Iss. 2. pp. 547–582.

УДК 658:622.33

ВЫБОР ПОСТАВЩИКА РЕСУРСОВ ДЛЯ КОМПАНИИ УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Н. А. ЯРУШКИНА^{1,2}, доцент, канд. экон. наук

Э. Г. МАТЮГИНА^{1,3}, проф., доцент, д-р экон. наук

О. М. КЕРБ², зав. кафедрой, доцент, канд. экон. наук, o.kerb@mail.ru

¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

² Томский сельскохозяйственный институт – филиал Новосибирского государственного аграрного университета, Томск, Россия

³ Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

Введение

Влияние логистических решений на эффективность функционирования предприятия зачастую напоминает действие рычага: требуякратно меньших вложений по сравнению, например, с модернизацией производства, позволяет получить существенный выигрыш на длительную перспективу (затраты на управление закупками в структуре себестоимости производства продукции развитых стран составляют 40–60 % [1]). При этом речь может идти всего лишь об изменении методологических подходов к решению текущих задач. Начальным этапом, от качества прохождения которого зависит эффективность функционирования компании, является выбор поставщиков требуемых ресурсов [2].

К тенденциям, актуализирующим необходимость разработки метода выбора поставщика, относят: изменение концепции взаимодействия с несколькими или же с одним – наиболее надежным; значимость принятия правильного и адекватного решения по содержанию взаимодействий с поставщиками в условиях широкого предложения при нивелировании различий по условиям поставки; ориентированность предприятия на самостоятельное моделирование параметров коммерческого предложения [3]. Проблемы выбора поставщика затронуты в трудах отечественных [4–6] и зарубежных [7–9] авторов, однако сложность проблемы, дифференциация условий функционирования компаний и другие факторы не позволяют поставить окончательную точку в решении данного вопроса.

Цель исследования – разработка методики выбора поставщика, обеспечивающей многовариантность не только постановки задачи с критериями, имеющими разный уровень значимости, но и возможных ее решений. Для иллюстрации предлагаемого метода использованы данные производственной деятельности АО УК «Кузбассразрезуголь».

Методика выбора поставщика

При упоминании методов рейтинговых оценок, оценки затрат, доминирующих характеристик, анализа иерархий нельзя не отметить субъективность первого, трудоемкость и ориентированность лишь на стоимостную составляющую второго, ограниченность рассматриваемых параметров третьего и высокую трудоемкость

Рассмотрен подход к выбору поставщика компании угольной отрасли в контексте взаимосвязи «затраты – время». В рамках предложенного подхода использованы методы Парето, БОФа, позволяющие поэтапно устранить менее привлекательный вариант и выбрать лучшего поставщика по совокупности соответствующих критериев. Допущена возможность изменения списка поставщиков с привнесением фактора рисковости.

Ключевые слова: снабжение, поставка, надежность, риск, затраты, критерии выбора, метод БОФа

DOI: 10.17580/gzh.2022.03.03

и множество критериев последнего. В связи с этим представляется целесообразным использовать двухэтапную методику выбора поставщика, основанную на исключении заведомо непривлекательной альтернативы (метод Парето); обезличивании критериев и альтернатив посредством их ранжирования (метод БОФа).

Привнесение субъективизма в ранжирование критериев обеспечивает вариативность управленческих решений в зависимости от целевых ориентиров работы компании, определяемых значительной совокупностью факторов различной природы.

Таким образом, прежде всего необходимо определить критерии выбора поставщиков (их существует множество [5, 6]). Зачастую ограничиваются ценой и качеством продукции, подкрепляя их надежностью поставок (соблюдение обязательств по срокам, ассортименту, комплектности и т. д.). Однако кажущаяся простота довольно обманчива, ибо требуется учет существенного объема факторов, затрагивающих характер потребления ресурса, приоритеты компании-заказчика, уверенность в поставщике и т. д. Представляется целесообразным сгруппировать критерии по признаку их содержательного наполнения:

- стоимостные – уровень цен, предоставление скидки, рассрочки и др.;
- временные – сроки выполнения заказов, периодичность поставок и др.;
- географические – удаленность поставщика и др.;
- организационные – условия доставки (самовывоз, привлечение посредника), способ и быстрота контактирования, распределение рисков и др.;
- ресурсные – качество, минимальный размер партии, полнота ассортимента и др.

Специфические особенности отдельно взятого предприятия обуславливают многовариантность не только постановки многокритериальной оптимизационной задачи с критериями, имеющими разный уровень значимости, но и возможных ее решений. Это и послужило обоснованием апробации предлагаемого метода на материале конкретной компании – АО УК

Таблица 1. Динамика добычи угля АО УК «Кузбассразрез-уголь», тыс. т [13]

Филиал	2016 г.	2017 г.	2018 г.
Кедровский	5133,4	5190,1	5217,1
Моховский	5221,7	6435,3	7410,4
Бачатский	9501,1	9845,3	9794,6
Краснобродский	7707,9	7309,6	7567,8
Талдинский	12815,3	13366,8	11458,1
Калтанский	3964,3	4203,9	4209,1
Итого	44343,6	46351,1	45657,2

Таблица 2. Динамика поставок угля АО УК «Кузбассразрез-уголь», тыс. т [13]

Филиал	2016 г.	2017 г.	2018 г.
Кедровский	4173,9	4699,7	4320
Моховский	5113,8	6296,5	6680
Бачатский	8300,7	8916,8	8427,3
Краснобродский	6449,7	5919	6254,9
Талдинский	12779,1	13116,6	11534,5
Калтанский	2962,8	3229,3	3159,3
Итого	39780	42177,9	40376

Таблица 3. Параметры поставок моторного масла различными поставщиками [14]

Критерий	А	В	С	Д
Цена, руб.	67000	65280	69107	65163
Наличие предоплаты	Только по предоплате	Только по предоплате	Предоплата не требуется	Предоплата не требуется
Способ доставки	Самовывоз/доставка в течение 1 дня	Самовывоз	Самовывоз/доставка в течение 2 дней	Самовывоз/доставка в течение 1 дня
Среднее расстояние доставки	150 км, г. Кемерово, 1 ч 55 мин	120 км, г. Новокузнецк, 1 ч 50 мин	280 км, г. Барнаул, 3 ч 20 мин	270 км, г. Новосибирск 3 ч 35 мин

П р и м е ч а н и е. Используются фактические данные; каждому поставщику присвоено условное обозначение.

«Кузбассразрезуголь» (предприятие сырьевого дивизиона Уральской горно-металлургической компании, специализирующееся на добыче каменного угля открытым способом). Интерес к оптимизации деятельности предприятий данной отрасли подтвержден отечественными и зарубежными публикациями [10–12].

Динамика добычи угля компанией за 2016–2018 гг. (табл. 1) характеризуется следующим: фактический объем добычи угля по АО «УК «Кузбассразрезуголь» ниже планового на 0,54 %, в то время как Бачатский угольный разрез перевыполнил план на 0,46 % (для него же характерно превышение среднегодовых темпов роста добычи угля над средним по компании – 1,53 и 1,47 % соответственно).

Основные покупатели продукции АО УК «Кузбассразрезуголь» – компании энергетического, металлургического, жилищно-коммунального комплексов, использующие уголь для производства электроэнергии, выработки тепла или как сырьевой компонент при производстве промышленной продукции. Оценка динамики поставок угля (табл. 2) свидетельствует о некотором отставании среднегодового темпа прироста поставки (0,75 %) от среднегодового темпа прироста производства, имеет место и невыполнение плана в 2018 г. – на 4,21 %. По Бачатскому угольному разрезу (вице-лидеру по структуре поставок) фактические показатели ниже плановых на 3,41 % (при еще большем сокращении темпов прироста поставок – 1,53 % по сравнению со средними по компании).

На основании проанализированных данных в качестве объекта исследования была выбрана деятельность Бачатского угольного разреза, занимающего второе место по производству и реализации угля и демонстрирующего некоторый рост (стабильность) показателей при наметившейся тенденции снижения показателей

работы лидера (Талдинский разрез). Использование обширного парка техники (экскаваторы, бульдозеры, погрузчики, локомотивы и др.) обуславливает присвоение группе горючесмазочных материалов (ГСМ) статуса технологически значимых, на материале которых и будет продемонстрирован алгоритм предлагаемого метода оценки. Поставка моторного масла Лукойл Авангард Профессионал 10W40 (объем канистры 216,5 л) в качестве ГСМ для Бачатского разреза осуществляется из Кемеровской и Новосибирской областей, Алтайского края. Параметры поставок приведены в табл. 3.

Исключить заведомо непривлекательную альтернативу* или, напротив, выявить наиболее привлекательную позволяет метод Парето, основанный на построении таблиц предпочтения и признающий лучшей из двух ту альтернативу, которая по всем показателям не хуже другой и хотя бы по одному показателю – лучше (табл. 4).

Из списка следует исключить компанию С, так как компания Д преобладает над ней по значениям всех показателей, за исключением критерия «Наличие предоплаты» (совпадение значений).

Для выбора из оставшихся наиболее привлекательной альтернативы по множеству критериев может быть использован метод БОФа, инвариантный к числу и виду используемых частных критериев и сравниваемых альтернатив [15, 16]. Реализация метода предусматривает выполнение следующих этапов.

1. Ранжирование критериев (на первом месте наиболее значимый). За основу ранжирования принята взаимосвязь «затраты–время»; ценовым параметрам отдано предпочтение как не поддающимся влиянию покупателя и определяющему результативность работы (учет параметра «наличие предоплаты» связан

*Здесь и далее по тексту под альтернативой понимается компания-поставщик.

Таблица 4. Таблицы предпочтений для компаний-поставщиков моторного масла

Критерий	Поставщик		
	В	С	Д
Поставщик А			
Цена	–	+	–
Наличие предоплаты	0	–	–
Способ доставки	+	+	0
Среднее расстояние доставки	–	+	+
Поставщик В			
Цена	+	+	–
Наличие предоплаты	0	–	–
Способ доставки	–	–	–
Среднее расстояние доставки	+	+	+
Поставщик С			
Цена	–	–	–
Наличие предоплаты	+	+	0
Способ доставки	–	+	–
Среднее расстояние доставки	–	–	–
Поставщик Д			
Цена	+	+	+
Наличие предоплаты	+	+	0
Способ доставки	0	+	+
Среднее расстояние доставки	–	–	+

Примечание. Знак «+» присваивается при лучшем значении критерия, «–» при худшем, 0 – при равенстве.

с дополнительными затратами, сопровождающими досрочное (до момента поставки) изъятие средств из оборота). Наличие выбора по временным параметрам на уровне отдельно взятого поставщика (способ доставки) обеспечивает большую гибкость в принятии решений, а значит, и возможность варьирования затрат. Такой критерий, как качество, авторы не учитывали, так как речь идет о поставках заданного ресурса конкретным поставщиком. Ранги критериев приведены в табл. 5.

2. Определение веса C_j каждого частного критерия по формуле

$$C_j = 1 - (R_j - 1)/n, \quad (1)$$

n – число частных критериев, $n = 4$; j – порядковый номер критерия.

Веса критериев также отражены в табл. 5.

3. Определение нормированного веса каждого частного критерия:

$$\tilde{C}_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^4 C_j}; \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^4 C_j = 1 + 3/4 + 1/2 + 1/4 = 5/2; \quad \sum_{j=1}^4 \tilde{C}_j = 1.$$

Нормированные веса критериев представлены в табл. 5.

4. Ранжирование альтернатив по каждому критерию (на первое место ставится лучшее значение и т. д.) отражено в табл. 6.

5. Расчет весовых коэффициентов компаний по каждому критерию:

$$C_{ji} = 1 - (R_{ji} - 1)/m, \quad (3)$$

Таблица 5. Ранг, вес и нормированный вес критериев

Критерий	Ранг R_j	Вес критерия C_j	Нормированный вес \tilde{C}_j
Цена	1	1	0,4
Среднее расстояние доставки	2	0,75	0,3
Наличие предоплаты	3	0,5	0,2
Способ доставки	4	0,25	0,1

Таблица 6. Ранг R_{ji} , вес C_{ji} и нормированный вес \tilde{C}_{ji} альтернатив по каждому критерию

Критерий	А			В			Д		
	Ранг R_{ji}								
Цена	3	2	1	3	2	1	3	2	1
Наличие предоплаты	2,5	2,5	1	2,5	2,5	1	2,5	2,5	1
Способ доставки	1,5	3	1,5	1,5	3	1,5	1,5	3	1,5
Среднее расстояние доставки	2	1	3	2	1	3	2	1	3
Вес C_{ji}									
Цена	$\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	1
Наличие предоплаты	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Способ доставки	$\frac{5}{6}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{5}{6}$	$\frac{5}{6}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{5}{6}$	$\frac{5}{6}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{5}{6}$
Среднее расстояние доставки	$\frac{2}{3}$	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	1	$\frac{1}{3}$
Нормированный вес \tilde{C}_{ji}									
Цена	$\frac{2}{12}$	$\frac{4}{12}$	$\frac{6}{12}$	$\frac{2}{12}$	$\frac{4}{12}$	$\frac{6}{12}$	$\frac{2}{12}$	$\frac{4}{12}$	$\frac{6}{12}$
Наличие предоплаты	$\frac{3}{12}$	$\frac{3}{12}$	$\frac{6}{12}$	$\frac{3}{12}$	$\frac{3}{12}$	$\frac{6}{12}$	$\frac{3}{12}$	$\frac{3}{12}$	$\frac{6}{12}$
Способ доставки	$\frac{5}{12}$	$\frac{2}{12}$	$\frac{5}{12}$	$\frac{5}{12}$	$\frac{2}{12}$	$\frac{5}{12}$	$\frac{5}{12}$	$\frac{2}{12}$	$\frac{5}{12}$
Среднее расстояние доставки	$\frac{4}{12}$	$\frac{6}{12}$	$\frac{2}{12}$	$\frac{4}{12}$	$\frac{6}{12}$	$\frac{2}{12}$	$\frac{4}{12}$	$\frac{6}{12}$	$\frac{2}{12}$

где m – число компаний, $m = 3$; i – порядковый номер компании. Результаты расчетов также приведены в табл. 6.

6. Определение нормированных весовых коэффициентов компаний по каждому критерию:

$$\tilde{C}_{ji} = \frac{C_{ji}}{\sum_{i=1}^3 C_{ji}}; \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^3 C_{ji} = 2; \quad \sum_{i=1}^3 \tilde{C}_{ji} = 1.$$

Данные таблицы позволяют сделать вывод, что по стоимостным критериям к оптимальным приближены показатели поставщика Д (низкая цена и отсутствие предоплаты), по временным – показатели поставщика А, существенно уступающие по первой составляющей. Возникшая дилемма может быть решена с учетом приоритетов компании в момент принятия решения о закупке: чем она готова поступиться – возможностью самостоятельного регулирования временных параметров или же большими затратами? В любом случае основанием для выбора служит адекватное и полное

Таблица 7. Значения обобщающего критерия для каждой альтернативы

Альтернатива	Значение обобщающего критерия Z
A	$\frac{31}{120}$
B	$\frac{42}{120}$
D	$\frac{47}{120}$

Таблица 8. Параметры поставок моторного масла

Критерий	A	B	D	X
Цена, руб.	67000	65280	65163	Менее 65163
Наличие предоплаты	Только по предоплате	Только по предоплате	Предоплата не требуется	Предоплата не требуется
Способ доставки	Самовывоз/ доставка в течение 1 дня	Самовывоз	Самовывоз/ доставка в течение 1 дня	Самовывоз/доставка в течение 1 дня
Среднее расстояние доставки	150 км, г. Кемерово, 1 ч 55 мин	120 км, г. Новокузнецк, 1 ч 50 мин	270 км, г. Новосибирск, 3 ч 35 мин	180 км*
Уровень риска	Низкий	Низкий	Низкий	Высокий

*Среднее расстояние из имеющихся вариантов поставки.

Таблица 9. Ранги критериев

Критерий	Значение обобщающего критерия Z
Цена	1
Уровень риска	2
Среднее расстояние доставки	3
Наличие предоплаты	4
Способ доставки	5

Таблица 10. Значения обобщающего критерия для каждой альтернативы

Альтернатива	Значение обобщающего критерия Z
A	$\frac{32}{150}$
B	$\frac{38}{150}$
D	$\frac{40}{150}$
X	$\frac{40}{150}$

Таблица 12. Значения обобщающего критерия для каждой альтернативы

Альтернатива	Значение обобщающего критерия Z
A	$\frac{29}{150}$
B	$\frac{35}{150}$
D	$\frac{40}{150}$
X	$\frac{46}{150}$

вариативностью требований компании-потребителя к закупаемым ресурсам, актуализирует необходимость категоризации поставщиков, в основу которой заложен симбиоз их вклада (ценность для бизнеса) и риски взаимодействия [4]. Предположим возможность взаимодействия УК «Кузбассразрезуголь» с ранее игнорируемым поставщиком X, предлагающим льготные условия по ценовым факторам и усредненные параметры доставки (табл. 8). Высокий уровень риска поставщику

удовлетворение потребностей производства с возможной эффективностью, которая варьируется достаточно широко – от обеспечения выживаемости компании до получения целевой прибыли [17].

7. Расчет значений обобщающего критерия Z_i для каждой компании осуществляют по формуле

$$Z_i = \sum_{j=1}^4 \tilde{G}_j \tilde{C}_{ji}. \quad (5)$$

В табл. 7 приведены значения обобщающего критерия.

Большее значение обобщающего критерия характерно для компании D, следовательно, именно ей отдадут предпочтение при заключении договора на поставку.

Значительный разброс условий, делающий невозможным выбор «идеального» поставщика, сопровождающийся

присвоен в связи с отсутствием какого бы то ни было опыта совместной работы.

Присвоив фактору риска второй по значимости ранг, осуществим выбор наиболее привлекательной альтернативы (табл. 9, 10), опираясь на алгоритм, изложенный выше.

Большее значение обобщающего критерия соответствует компаниям D (подтверждение полученных выше результатов) и X, следовательно, именно с ними предпочтительно заключение договоров. Более того, расположение последнего на расстоянии, более близком к Бачатскому угольному разрезу по сравнению с другими поставщиками (табл. 11), позволяет утверждать, что при приоритетности критериев, представленной в табл. 9, предпочтение будет отдано компании-поставщику X (табл. 12).

Таблица 11. Параметры поставок моторного масла

Критерий	A	B	D	X
Цена, руб.	67000	65280	65163	Менее 65163
Наличие предоплаты	Только по предоплате	Только по предоплате	Предоплата не требуется	Предоплата не требуется
Способ доставки	Самовывоз/доставка в течение 1 дня	Самовывоз	Самовывоз/доставка в течение 1 дня	Самовывоз/доставка в течение 1 дня
Среднее расстояние доставки	150 км, г. Кемерово, 1 ч 55 мин	120 км, г. Новокузнецк, 1 ч 50 мин	270 км, г. Новосибирск, 3 ч 35 мин	Менее 120 км
Уровень риска	Низкий	Низкий	Низкий	Высокий

Заключение

Таким образом, предложенная авторами методика позволит осуществить обоснованный выбор поставщика, исходя из целевых приоритетов компании-покупателя, допуская возможность их

вариации в зависимости от ориентиров развития в конкретный период времени. Возможность детализации ведущего фактора существенно расширяет спектр возможных альтернатив.

Библиографический список

- Johnson P. F., Leenders M. R., Flynn A. E. *Purchasing Supply Management*. 14th ed. – New York : McGraw-Hill/Irwin, 2011. – 554 p.
- Андреева Т. А., Яшина М. Н., Андреев А. В. Развитие поставщиков в системе менеджмента качества предприятия // *Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета*. 2018. № 5(74). С. 12–18.
- Дегтярева Н. М., Яковлев Р. Методические подходы к выбору и оценке поставщиков предприятия // *Вестник Волжского университета им. В. Н. Татищева*. 2015. № 1(33). С. 100–105.
- Веселова Ю. В. Критерии и методы выбора поставщиков на основе применения принципов логистики // *The scientific heritage*. 2019. Vol. 2. No. 37. С. 3–7.
- Кубарева О. А., Арсентьева А. С., Быстров О. Ф. Сравнительный анализ и выбор цепи поставок груза по критерию «стоимость-время» // *Вестник науки и образования*. 2018. Т. 1. № 5(41). С. 43–45.
- Фасхиев Х. А. Обоснованный выбор поставщиков как фактор конкурентоспособности предприятия // *Логистика сегодня*. 2018. № 4. С. 294–308.
- Taherdoost H., Brard A. Analyzing the Process of Supplier Selection Criteria and Methods // *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 32. P. 1024–1034.
- Vacar Anca. Logistics and supply chain management: an overview // *Studies in Business and Economics*. 2019. Vol. 14. Iss. 2. P. 209–215.
- Azmi I., Hamid N. A., Hussin M. N. M., Ibtishamah N. Logistics and supply chain management: The importance of integration for business processes // *Journal of Emerging Economies and Islamic Research*. 2017. Vol. 5. No. 4. P. 73–80.
- Kudelko J. Structurization of mining companies // *Mineral Resources Management*. 2016. Vol. 32. Iss. 4. P. 157–180.
- Галиев Ж. К., Галиева Н. В. Анализ экономических условий функционирования угледобывающих предприятий России // *Горный журнал*. 2019. № 1. С. 33–36. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.07
- Агафонов В. В., Ошаров А. В., Захаров С. И. Повышение технико-экономической эффективности производства угля на основе совершенствования его организационной структуры // *Уголь*. 2019. № 10. С. 79–84.
- АО «УК «Кузбассразрезуголь» / Центр раскрытия корпоративной информации. URL: <https://e-disclosure.ru/portal/files.aspx?id=10488&type=2> (дата обращения: 24.06.2021).
- ДРОМ. URL: <https://baza.drom.ru/> (дата обращения: 28.06.2021).
- Быстров О. Ф., Мальцев А. В., Охотников Г. Н., Ролдугин В. Д., Торбин В. У. Теоретические основы моделирования военно-технических систем : учебник. – М. : РВСН, 1993. – 488 с.
- Быстров О. Ф. Метод принятия решения в задачах выбора на множестве альтернатив по множеству показателей – метод БОФЭМ // *Экономические и социально-гуманитарные исследования*. 2018. № 3(19). С. 12–18.
- Гаджинский А. М. *Логистика* : учебник. – 20-е изд. – М. : Дашков и К°, 2012. – 484 с. **ИЖ**

«GORNYI ZHURNAL», 2022, № 3, pp. 13–18
DOI: 10.17580/gzh.2022.03.03

Selecting assets supplier for coal mining company

Information about authors

N. A. Yarushkina^{1,2}, Associate Professor, Candidate of Economic Sciences
E. G. Matyugina^{1,3}, Professor, Associate Professor, Doctor of Economic Sciences
O. M. Kerb², Head of Department, Associate Professor, Candidate of Economic Sciences, o.kerb@mail.ru
¹Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia
²Tomsk Agricultural Institute Branch of the Novosibirsk State Agricultural University, Tomsk, Russia
³National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

Abstract

The approach to selecting a supplier for the coal industry is considered in the framework of the cost–time concept. The proposed approach uses the Pareto analysis and the BOFa method (decision-making among a set of multiple-attribute alternatives) which allow gradual elimination of less attractive options and selection of the best supplier according to the set of criteria. It is possible to change the list of suppliers with the introduction of a risk factor.

This article is related to the justification of approaches to selecting an assets supplier for a coal mining company. The research object is the activity of Kuzbassrazrezugol JSC's branch in Bachaty in terms of motor oil delivery from companies in the Kemerovo and Novosibirsk Regions and in the Altai Krai. The article describes the company's activity dynamics and the structure of coal production and supply per open pit coal mines. The criteria for selecting suppliers are the price of an asset, availability of prepayment, as well as the method and distance of delivery which directly form the cost of the purchased asset. It is noted that the specific features of a certain company determine the multivariance of both formulation of a multi-criteria optimization problem with the criteria of different levels of significance and possible solutions of the problem.

A two-stage supplier evaluation using the Pareto analysis and the BOFa method is proposed. The Pareto analysis to create a set of alternatives recognizes the best alternative as an alternative which is equal or better than the other alternative based on the selected criteria; the goal is to exclude the least attractive option from the list. The ranking is based on the relationship between the cost–time parameters, and the price factors are preferable as they are insensitive to a buyer's influence while governing a company's

performance. The next stage is selecting a supplier based on a set of criteria using the BOFa method which is invariant to the number and type of particular criteria and alternatives. This method is used to rank the criteria and to determine their weights, as well as the weights and ranks of alternatives are determined for each criterion, including the normalized alternatives, which finally enable calculation of a generalized criterion for each company.

The option of adding the list with a new supplier which the best (averaged) parameters as compared with the listed supplier is considered; due to the lack of any experience of cooperation with such supplier, the latter is assigned a high level of risk. The proposed approach can be used by any company regardless industry classification.

Keywords: supply, delivery, reliability, risk, expenses, selection criteria, BOFa method.

References

- Johnson P. F., Leenders M. R., Flynn A. E. *Purchasing Supply Management*. 14th ed. New York : McGraw-Hill/Irwin, 2011. 554 p.
- Andreeva T. A., Yashina M. N., Andreev A. V. Cultivation of suppliers in the quality management system of a company. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo sotsialno-ekonomicheskogo universiteta*. 2018. No. 5(74). pp. 12–18.
- Degtyareva N. M., Yakovlev R. Approaches for selection and assessment of suppliers companies. *Vestnik Volzhskogo universiteta im. V. N. Tatischeva*. 2015. No. 1(33). pp. 100–105.
- Veselova Yu. V. Criteria and methods of selecting suppliers on the basis of application of principles of logistics. *The scientific heritage*. 2019. Vol. 2, No. 37. pp. 3–7.
- Kubareva O. A., Arsenteva A. S., Bystrov O. F. Comparative analysis and choice of the supply chain of cargo according to the cost–time criteria. *Vestnik nauki i obrazovaniya*. 2018. Vol. 1, No. 5(41). pp. 43–45.
- Faskhiev Kh. A. Reasoned selection of suppliers as a competitiveness factor of a company. *Logistika segodnya*. 2018. No. 4. pp. 294–308.
- Taherdoost H., Brard A. Analyzing the Process of Supplier Selection Criteria and Methods. *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 32. pp. 1024–1034.
- Vacar Anca. Logistics and supply chain management: an overview. *Studies in Business and Economics*. 2019. Vol. 14, Iss. 2. pp. 209–215.
- Azmi I., Hamid N. A., Hussin M. N. M., Ibtishamah N. Logistics and supply chain management: The importance of integration for business processes. *Journal of Emerging Economies and Islamic Research*. 2017. Vol. 5, No. 4. pp. 73–80.

10. Kudelko J. Structurization of mining companies. *Mineral Resources Management*. 2016. Vol. 32, Iss. 4. pp. 157–180.
11. Galiev Zh. K., Galieva N. V. Economic conditions of coal industry performance in Russia. *Gornyi Zhurnal*. 2019. No. 1. pp. 33–36. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.07
12. Agafonov V. V., Osharov A. V., Zakharov S. I. Organization of competitive technical service of ensuring operability of the mining-transport equipment. *Ugol*. 2019. No. 10. pp. 79–84.
13. Kuzbassrazrezugol JSC. Corporate Information Disclosure Center. Available at: <https://e-disclosure.ru/portal/files.aspx?id=10488&type=2> (accessed: 24.06.2021).

14. DROM. Available at: <https://baza.drom.ru/> (accessed: 28.06.2021).
15. Bystrov O. F., Maltsev A. V., Okhotnikov G. N., Roldugin V. D., Torbin V. U. Theoretical framework for modeling military technical systems : Textbook. Moscow : RVSN, 1993. 488 p.
16. Bystrov O. F. Decision-making technique in selection tasks on the set of alternatives on the set of indicators—The BOfem method. *Ekonomicheskie i sotsialno-gumanitarnye issledovaniya*. 2018. No. 3(19). pp. 12–18.
17. Gadzhinskiy A. M. Logistics : Textbook. 20th ed. Moscow : Dashkov i K^o, 2012. 484 p.

УДК 622:338.5:621.31

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЗАТРАТЫ КАК ОСНОВНОЙ КОМПОНЕНТ В РАЗВИТИИ ИННОВАЦИЙ В ДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Т. Х. УСМАНОВА¹, главный научный сотрудник, д-р экон. наук, Utx.60@mail.ru
Д. А. ИСАКОВ², председатель Совета директоров, канд. экон. наук

¹ Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН, Москва, Россия
² ООО «Фонд «Инвестиции в национальную экономику», Москва, Россия

Введение

Актуальность исследования вопросов повышения тарифов в системе электроэнергетики обусловлена значительным ее влиянием на затраты всех отраслей, использующих электроэнергию, как основного компонента в структуре всех расходов. В настоящее время многие предприятия добывающей промышленности обращают внимание разработчиков энергетической политики на сверхвысокие тарифы на электрическую энергию, которая ложится тяжелым бременем на производство.

Современный глобальный бизнес является, по существу, национальным, т. е. имеет сеть во многих крупных и развивающихся странах, внедряя свои инструменты захвата, слияния и поглощения в рамках собственного менеджмента. Для того, чтобы достигнуть большего влияния у глобального бизнеса применим опыт, который существовал в условиях плановой экономики в России. При плановой экономике в СССР тарифы формировались централизованно для обеспечения экономического роста в стране. При этом планировалось развитие крупных производственных структур по принципам формирования межотраслевых балансов, которые способствовали развитию крупных промышленных производств, конкурентоспособных зачастую на мировом рынке [1–5].

В настоящее время в России в пользу защиты глобального капитала (под названием инвесторов) подготовлено множество нормативно-правовых документов и предложений по совершенствованию законодательства РФ [6]. При этом долгожданный ожидаемый эффект для устойчивого развития российской добывающей промышленности, равно как и системы электроэнергетики, не происходит. За последние годы перекося

Рассмотрены вопросы регулирования тарифов на электроэнергию и определены основные направления снижения доли энергозатрат в добывающем комплексе.

Ключевые слова: добывающая и горная промышленность, электроэнергетика, тарифообразование, затраты, трансдисциплинарные разработки, инновационные технологии, синергия

DOI: 10.17580/gzh.2022.03.04

в денежно-кредитной и бюджетно-налоговой политике привели к увеличению износа основных средств, уводу добавленной стоимости из отраслей в офшоры [7]. Ожидаемой эффективности работы по обеспечению российскими инновационными технологиями промышленной безопасности производственных объектов горной промышленности так и не произошло. Как в горной промышленности, так и в системе электроэнергетики не осуществлен переход на активное развитие и использование современных российских технологий [8]. Однако в условиях переходной экономики в качестве инноваций был внедрен TQM-менеджмент, который предусматривает соблюдение системы менеджмента качества в условиях интеграции экономик в мировое хозяйство. Интеграционные процессы в мировое хозяйство позволили внедрить особую зарубежную модель взаимодействия в инновационной деятельности, выполнении научно-исследовательских работ по заказу глобального капитала, проведении заинтересованных оценок соответствия, экспертиз и аудита продукции, работ и услуг, применяемых на горнопромышленных объектах [9]. При этом возникает необходимость поиска решения создавшихся проблем путем внедрения инновационных технологий в интересах российского производителя и потребителя и переоценки ценностей в условиях интеграции в мировое хозяйство [10, 11].

Анализ сложившейся ситуации и меры по ее улучшению

Как известно, во многих российских производственных структурах средняя заработная плата работника несильно отличается от

Таблица 1. Инвестиции в основной капитал в период 2000–2018 гг., млрд руб. (по данным Росстата)

Инвестиции	2000 г.	2010 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2018 г.
Общий объем инвестиций	1165,2	9152,1	13902,6	13897,2	14639,8	17595
<i>Виды экономической деятельности</i>						
Добыча полезных ископаемых	211,4	1264,0	2144,8	2385,2	2830,4	3199,5
В том числе добыча топливно-энергетических ресурсов	195,0	1157,9	1957,1	2173,1	2613,2	Нет данных
Обрабатывающие производства	190,2	1207,6	2084,6	2172,6	2123,7	2584,9
Производство и распределение электроэнергии, газа и воды	69,8	818,8	1186,2	980,0	940,2	1047,2

минимального размера оплаты труда (МРОТ) [12]. В такой ситуации может происходить качественное сокращение объема заработной платы в предприятиях горной промышленности, а также во всех других отраслях народного хозяйства. Такое сокращение заработной платы приводит к «двойному прессу» коренного населения территорий России. Такой «двойной пресс», созданный высокими тарифами за электроэнергию и приводящий к снижению объема заработной платы в организациях, не позволяет разрабатывать инновационные технологии, следовательно, приводит к значительному снижению наборов механизмов и инструментов стимулирования НИОКР [13].

Возникшие «проблемные зоны» требуют кардинального пересмотра Парадигмы развития электроэнергетики, которая является драйвером всей экономики, в том числе отраслей добывающей промышленности. Современное взаимодействие бизнеса и государства не может создать и предоставить добывающей промышленности те меры господдержки в части реализации НИОКР, которые необходимы для ее расширенного воспроизводства [14].

Для примера можем привести, как ОАО «АК «Транснефть» запускает в опытную эксплуатацию Корпоративную информационную систему управления (КИСУП) бизнес-процессами планирования и реализации инвестиционной программы и программ технического перевооружения и реконструкции, капитального ремонта. Система разработана на основе российской программной платформы бизнес-аналитики Prognoz Platform производства ЗАО «Прогноз» [15]. При этом цифровизация достигла совершенства в части создания системы расширенных пользовательских инструментов ввода, обработки и анализа данных, инструментов настройки цепочек согласования. Данный опыт показывает возможности тотального контроля над процессами развития инновационных проектов и программ корпорации [16–18].

Контрольные процессы и цифровизация в современной горнодобывающей промышленности требуют формирования особых технологий и техники с системой электроэнергетики. Симбиоз двух крупных отраслей может позволить развитие трансдисциплинарных разработок и значительно увеличить развитие

Таблица 2. Производство и распределение электроэнергии в период 2000–2018 гг., млрд кВт·ч (по данным Росстата)

Производство и потребление электроэнергии	2000 г.	2010 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2018 г.
Произведено электроэнергии	877,8	1038,0	1064,2	1067,5	1091,0	1115,1
Получено за пределами РФ	8,8	1,9	8,9	8,8	3,5	5,1
Потреблено электроэнергии, всего	863,7	1020,6	1065,0	1060,2	1078,4	1108,1
Потери в электросетях	–	104,9	106,9	106,6	107,2	103,1
<i>Получено потребителями РФ</i>						
Добыча полезных ископаемых, обрабатывающие производства, производство и распределение электроэнергии, газа и воды	–	554,4	561,1	559,2	565,8	585,8
Сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство	–	15,9	15,9	16,8	17,2	18,8
Строительство	–	10,7	12,8	12,1	12,6	12,6
Транспорт и связь	–	88,4	90,3	87,9	88,6	90
Другие виды экономической деятельности	–	119,2	132,0	131,2	133,1	100,3
Отпущено за пределы РФ	22,9	19,3	8,1	16,1	16,0	12,1

внутреннего рынка, а также оказать свое конкурентное влияние на мировую экономику.

В настоящее время природные ресурсы России и ее энергетика занимают высокие позиции в мировом товарообороте. Так, природный газ занимает 2-е место в мире; нефть, включая газовый конденсат, – 3-е; электроэнергия, чугун – 4-е; цемент, древесина – 5-е; уголь, сталь – 6-е.

Отрасли, производящие эти продукты, являются и наиболее энергоемкими: именно в них (особенно в тех, что добывают полезные ископаемые) направляется около половины общероссийских инвестиций (табл. 1).

При этом возникает необходимость проведения более глубокого анализа, чтобы понять ценность инвестиций и их ориентацию на результат (табл. 2–4).

Из табл. 2 видно, что потери в системе электросетей составляют значительную долю в выпадающих доходах и в перекрестном субсидировании в добывающих и промышленных отраслях, существенно ухудшая их экономическое положение (включая банкротство, слияния и плановые поглощения).

Данные табл. 3 показывают значительную добавленную стоимость в рамках формирования ВВП страны. При этом происходит ежегодное снижение фонда заработной платы во всех российских отраслях.

Анализ данных в представленных выше таблицах показывает резкое отличие финансовых результатов в долях от добавленной стоимости в отрасли производства и распределения электрической

энергии, газа и воды. В результате отсутствия прорывных инновационных технологий и затруднительности их вложения в тарифы электроэнергии, а также снижения контрактной цены на продукцию добывающей отрасли глобальный капитал формирует свой экономический интерес для аккумуляции активов в собственных ТНК и холдингах [10]. При этом Россия имеет самые высокие рейтинги по производству продукции, тем самым является серьезным участником во многих рынках сбыта продукции.

Поэтому необходимо внедрить трансдисциплинарные НИОКР в рамках систем электроэнергетики и горнодобывающей промышленности, создать научные центры прикладных исследований в симбиозе с фундаментальной наукой. Для разработки инновационных технологий в России имеется все, кроме управленческих решений, которые зависят от руководства отраслями и правительственных структур. Проблемы российских отраслей происходят только в рамках управленческих решений, которые могут быть решены в рамках развития научных технологий.

Фундаментальная наука предлагает множество научных технологий, многие из них являются прорывными для российских отраслей. Не хватает всего лишь объединения интересов в рамках внедрения инновационных технологий в деятельность отраслей России [8].

В Институте народнохозяйственного прогнозирования Российской академии наук (ИНП РАН) разработаны мероприятия по продвижению инновационных технологий в отраслях промышленности России. В каждой отдельно взятой экономической деятельности могут быть предложены особые механизмы внедрения инновационных технологий в рамках их прикладного применения, и наоборот. При поиске необходимых технологий могут быть предложены НИИ и прикладные исследования в рамках договорных отношений и разработки региональных инновационных программ и проектов, а также стратегий социально-экономического развития отраслей и регионов.

В условиях глобального наднационального регулирования поставок дорогостоящего оборудования предприятиям горнодобывающей промышленности привели их к импортозависимости в ущерб развитию собственных, значительно ускоряющих экономическое развитие технологий. Разработанные инновационные технологии позволяют развить трансдисциплинарные исследования в рамках смежных отраслей с использованием научных усилий инженеров и прикладной науки в части эксплуатации и управления производством и сбыта продукции, формирования собственной производственной базы в рамках российских научных технологий. Применение уникальных и модернизированных технологий в отраслях народного хозяйства также связано в основном с технологиями в системе электроэнергетики. Обучение персонала в рамках профессиональных отраслевых навыков может сопровождаться со знанием технологий в отрасли электроэнергетики. Как известно, добыча различных ископаемых требует особого совмещения работы в месторождениях с обеспечением альтернативных вариантов энергии. Только такой подход позволит повышать

Таблица 3. Средние затраты на производство и приобретение основных видов энергоресурсов в период 2000–2016 гг., руб. (источник: Росстат)*

Вид энергоресурсов	Затраты производителей				Затраты потребителей			
	2010 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2010 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.
Уголь, за 1 т	683	1027	1039	1412	2082	1883	2222	2929
В том числе коксующийся	1555	1440	2029	3809	5920	4225	5524	8524
Нефть, за 1 т	7566	10064	11417	12607	11045	9832	12325	18180
Газ горючий природный, за 1 тыс. м ³	626	1639	1785	1434	3081	4666	5205	5055
Бензины	16699	20946	21995	23066	24814	38496	40470	43170
Топливо дизельное, за 1 т	16340	23587	25463	25557	24157	36622	40015	39721
Мазут топочный, за 1 т	7805	7242	4957	7870	12058	11462	7099	12431
Электроэнергия, за 1 тыс. кВт	665	1009	989	1013	1539	2103	2189	2253

*На сайте Росстата обновленная информация не обнаружена.

Таблица 4. Финансовые результаты и эффективность деятельности организаций в период 2010–2018 гг., млн руб. (источник: Росстат)*

Вид деятельности	2010 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2018 г.
Добыча полезных ископаемых	1297897	2124346	2451513	2134238	4317552
Производство и распределение электроэнергии, газа и воды	345584	24056	183309	738340	607681

*На сайте Росстата обновленная информация не обнаружена.

навыки, уровень квалификации, знания работников в рамках искомого инновационного развития отраслей.

Заключение

Итак, необходимость развития и внедрения инновационных технологий в добывающей промышленности требует конгруэнтного формирования тарифов, разработки инновационных технологий в развитии электроэнергетики, затраты которой составляют значительную долю в себестоимости продукции горнопромышленных компаний. Поиск управленческих решений приводит к тому, что в настоящее время многие законодательные решения исследованы в рамках фундаментальной науки. В то же время необходим симбиоз фундаментальной и прикладной науки с научными центрами и НИИ для их трансдисциплинарного внедрения. Такой взаимосвязанный симбиоз добывающей промышленности и электроэнергетики может привести к абсолютно новому экономическому росту. Создание новых совместных научных трансдисциплинарных центров науки и производства, проведение особой научной экспертизы тарифов на электроэнергию позволят вывести экономику России на новый уровень развития.

Библиографический список

1. Вержанский А. П., Андреев С. И. О создании морской горнодобывающей отрасли России // Горная промышленность. 2015. № 3. С. 6–9.
2. Lange G.-M., Wodon Q., Carey K. The Changing Wealth of Nations 2018 : Building a Sustainable Future. – Washington : World Bank Group, 2018. – 255 p.
3. Vaz P. H. Discovery of natural resources: A class of general equilibrium models // Energy Economics. 2017. Vol. 61. P. 174–178.
4. Mineral Commodity Summaries 2019. – Reston : U.S. Geological Survey, 2019. – 200 p.
5. Ranängen H., Lindman Å. A path towards sustainability for the Nordic mining industry // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 151. P. 43–52.
6. Комков Н. И. Закономерности научно-технического развития и их использование при прогнозировании // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2010. № 3. С. 72–91.
7. Усманова Т. Х., Исаков Д. А. Научно-технологическое развитие в России в условиях внедрения цифровой экономики // Экономика и управление: проблемы, решения. 2018. Т. 7. № 5. С. 101–105.
8. Комков Н. И., Бондарева Н. Н., Романцов В. С., Диденко Н. И., Скрипнюк Д. Ф. Методические и организационные основы управления развитием компаний. – СПб. : Наука, 2015. – 520 с.
9. Лексин В. Н., Порфирьев Б. Н. Экспертиза проектов развития макрорегионов России: проблемы организации // Проблемы прогнозирования. 2016. № 6(159). С. 18–29.
10. Николаев В. А., Исаков Д. А. Методология стратегического анализа рисков социальных систем // Аудит и финансовый анализ. 2014. № 1. С. 316–318.
11. Vasyuchkov Yu. F., Melnik V. V. Mining of coal deposit on the base of “Local coal gas electric complexes” // Eurasian Mining. 2017. No. 2. P. 20–24. DOI: 10.17580/em.2017.02.05
12. Усманова Т. Х. Проекты развития взаимодействия ТЭК и ЖКХ: проблемы прогнозирования и управления // Проблемы прогнозирования. 2018. № 3(168). С. 67–74.
13. Усманова Т. Х., Исаков Д. А. Интеграция фундаментальной и прикладной науки для развития инноваций в производстве // Экономика. Бизнес. Банки. 2018. Т. 7. С. 66–78.
14. Пешкова М. Х., Федорова Г. В., Галиева Н. В., Галиев Ж. К. Управление отрицательными внешними эффектами на промышленных предприятиях // ГИАБ. 2017. Спец. выпуск 1. Труды международного научного симпозиума «Неделя горняка-2017». С. 469–480.
15. ОАО «АК «Транснефть» вводит в опытную эксплуатацию систему управления проектами и программами, разработанную на основе российской платформы. 2016. URL: <https://www.transneft.ru/newsPress/view/id/10242/> (дата обращения: 15.12.2021).
16. Питкевич И. Г., Подольск О. А. Управление качеством, стандартизация и сертификация как залог устойчивого развития предприятия // Горный журнал. 2018. № 8. С. 18–21.
17. Череповицын А. Е., Ларичкин Ф. Д., Воробьев А. Г., Азим Иброхим. Экономические перспективы развития производства сжиженного природного газа // Горный журнал. 2018. № 2. С. 59–64. DOI: 10.17580/gzh.2018.02.09
18. Шевырьев Ю. В., Федоров О. В., Сарваров А. С. Современный технологический уклад и его ресурсное обеспечение // ГИАБ. 2018. № 3. С. 82–90. **PK**

«GORNYI ZHURNAL», 2022, № 3, pp. 18–21
DOI: 10.17580/gzh.2022.03.04

Energy input as the key element of innovations in the mining industry

Information about authors

T. Kh. Usmanova¹, Chief Researcher, Doctor of Economic Sciences, Utx.60@mail.ru

D. A. Isakov², Chairman of the Board of Directors, Candidate of Economic Sciences

¹Institute of Economic Forecasting, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²National Economy Investment Fund, Moscow, Russia

Abstract

The mineral mining industry is a huge consumer of power both in Russia and in the world. The problems connected with power failure in the mining industry in recent years have revealed numerous imperfections in the tariff formation and industrial control on the governmental scale. Tariff raising affects the energy-intensive industries in terms of escalation of the production and transportation activity costs.

This study aims to find out how to deal with the annual raising of electricity tariff rates, which represents an unmanageable challenge for the energy-intensive industries.

The research methodology is based on the analytical and systematic approaches, disclosure of interactions between related industries, system prediction and comparison of empirical data.

The research result is the recommendations developed for the interrelated scientific and technological advancement the extractive industry and power-engineering. It should be planned to establish joint basic and applied science centers in the framework of transdisciplinary production. New-generation science and production cooperation between allied industries enables technological innovations. The interests of the two mentioned industries focus on the increased added value in their systems of product value formation. Transdisciplinary R&D implementation at the joint science and technology centers by the expert teams from the mining industry and power-engineering promote innovative development of Russia.

The conclusions drawn within the research are founded on the studies in the tariff formation problems in power-engineering. The tariff formation in the power industry influences costs and expenses in the mining industry. The article offers organizational proposals and managerial decision-making guidance. The technological paradigm shift calls for the novel methods and tools to provide competitive abilities in the allied industries.

Keywords: mining industry, power industry, tariff formation, expenses, transdisciplinary R&D projects, technological innovations, synergy.

References

1. Verzhanskiy A. P., Andreev S. I. Creation of seabed mining industry in Russia. *Gornaya promyshlennost*. 2015. No. 3. pp. 6–9.

2. Lange G.-M., Wodon Q., Carey K. The Changing Wealth of Nations 2018 : Building a Sustainable Future. Washington : World Bank Group, 2018. 255 p.
3. Vaz P. H. Discovery of natural resources: A class of general equilibrium models. *Energy Economics*. 2017. Vol. 61. pp. 174–178.
4. Mineral Commodity Summaries 2019. Reston : U.S. Geological Survey, 2019. 200 p.
5. Ranängen H., Lindman Å. A path towards sustainability for the Nordic mining industry. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 151. pp. 43–52.
6. Komkov N. I. Patterns of scientific and technological development and their use in forecasting. *MIR (Modernizatsiya. Innovatsii. Razvitie)*. 2010. No. 3. pp. 72–91.
7. Usmanova T. Kh., Usakov D. A. Scientific and technological development in Russia in the conditions of introduction of the digital economy. *Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya*. 2018. Vol. 7, No. 5. pp. 101–105.
8. Komkov N. I., Bondareva N. N., Romantsov V. S., Didenko N. I., Skriptyuk D. F. Methods and organization procedures for the development management at a company. Saint-Petersburg : Nauka, 2015. 520 p.
9. Leksin V. N., Porfirev B. N. Organizational Issues of Expert Review and Evaluation of Macroeconomic Development Projects in Russia. *Studies on Russian Economic Development*. 2016. Vol. 27, No. 6. pp. 621–628.
10. Nikolaev V. A., Isakov D. A. Methodology of strategic risk analysis of social systems. *Audit i finansovyy analiz*. 2014. No. 1. pp. 316–318.
11. Vasyuchkov Yu. F., Melnik V. V. Mining of coal deposit on the base of “Local coal gas electric complexes”. *Eurasian Mining*. 2017. No. 2. pp. 20–24. DOI: 10.17580/em.2017.02.05
12. Usmanova T. Kh. Projects of Development of Interaction of FEC and HCS: Problems of Forecasting and Management. *Studies on Russian Economic Development*. 2018. Vol. 29, No. 3. pp. 274–279.
13. Usmanova T. Kh., Isakov D. A. Integration of basic and applied science for the development of innovation in manufacturing. *Ekonomika. Biznes. Banki*. 2018. Vol. 7. pp. 66–78.
14. Peshkova M. Kh., Fedorova G. V., Galieva N. V., Galiev Zh. K. Management of negative external effects on the industrial enterprises. *GIAB*. 2017. Special issue 1. Proceedings of International Scientific Symposium Miner’s Week-2017. pp. 469–480.
15. Transneft Starts Trial Operation of Project and Programme Management System Based on Russian Platform. 2016. Available at: <https://www.transneft.ru/newsPress/view/id/10242/> (accessed: 15.12.2021).
16. Pitkevich I. G., Podolyak O. A. Quality management, standardization and certification as a key to sustainable development. *Gornyi Zhurnal*. 2018. No. 8. pp. 18–21.
17. Cherepovitsyn A. E., Larichkin F. D., Vorobiev A. G., Azim Ibrokhir. Economic prospects of advancement in liquefied natural gas production. *Gornyi Zhurnal*. 2018. No. 2. pp. 59–64. DOI: 10.17580/gzh.2018.02.09
18. Shevyrev Yu. V., Fedorov O. V., Sarvarov A. S. Technology state-of-the-art and supply of resources. *GIAB*. 2018. No. 3. pp. 82–90.

УДК 622.271.3

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНФИГУРАЦИИ БОРТА КАРЬЕРОВ В ЦЕЛЯХ ПОВЫШЕНИЯ ФИНАНСОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И СОКРАЩЕНИЯ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА ПРИ ДОБЫЧЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ*

С. УТИЛИ^{1,2*}, А. АГОСТИ², Н. МОРАЛЕС³, К. ВАЛЬДЕРРАМА⁴,
Р. ПЕЛЛ⁵, Г. АЛЬБОРНОЗ⁶

¹ OptimalSlope Ltd., Лондон, Великобритания

² Кафедра технологии, Университет Ньюкасла, Ньюкасл, Великобритания

³ Факультет горного дела и технологии материалов,
Политехнический университет Монреаля, Канада

⁴ Itasca Chile, Сантьяго, Чили

⁵ Minviro Ltd., Лондон, Великобритания

⁶ SRK Chile, Сантьяго, Чили

1. Введение

В последние четыре десятилетия наблюдается тенденция увеличения глубины ведения горных работ открытым способом (рис. 1, а). В существующих карьерах углубка стала возможна благодаря созданию оборудования повышенной производительности, а также появлению более эффективных методов и технологий добычи. В это же время глубина залегания невовлеченных в отработку рудных тел понижается (см. рис. 1, б). В период между 1930 и 2000 г. средняя глубина ведения открытых горных работ в таких странах, как Австралия, Канада и США, увеличилась от значений обнажений до 295 м [1]. Как следствие, возросла важность увеличения крутизны откосов бортов карьеров до максимально возможной величины, так как в более глубоких карьерах крутизна откоса бортов оказывает более сильное влияние на объемы вскрышных работ и, таким образом, – на рентабельность горнодобывающего предприятия [2].

Кроме того, увеличивается доля открытых работ на повышенных глубинах во вмещающих массивах, сложенных слабыми породами, например сапролитами [4]. В слабых породах откосы бортов карьеров делают менее крутыми по сравнению с прочными породами в целях предотвращения обрушений, что, в свою очередь, ведет к увеличению объемов вскрышных пород. Поэтому любое возможное увеличение предельного угла откоса (ПУО) борта карьера приобретает повышенную значимость ввиду повышения рентабельности горных работ.

Примечательный случай обоснованности нелинейности профиля откоса, т. е. с изменяющимся по глубине углом наклона по сравнению с линейным, т. е. плоским профилем, был отмечен еще в 1890 г. [5]. Автором было обнаружено, что зарубный штыб, полученный при выемке в полости с вогнутыми бортами в однородных пластах глины, имеет более высокую прочность, чем в полости с плоскими бортами

Угол откоса борта карьера оказывает значительное влияние на уровень доходов горнодобывающего предприятия. В статье предлагается новая методология проектирования угла откоса бортов карьеров при увеличении их заоткоски в предельном положении без ухудшения безопасности горных работ.

В существующей практике проектирования профили бортов карьеров зачастую имеют плоские сечения в слое пород, т. е. профиль борта в каждом породном слое имеет постоянный уклон. В нашем случае оптимизация откосов бортов осуществляется в новой программе OptimalSlope с изменением угла наклона борта по глубине. В программе OptimalSlope решается математическая задача оптимизации с максимизацией предельного откоса борта от его наивысшей точки до подошвы для данных литологических условий, инженерно-геологических свойств пород и их коэффициента устойчивости. Геометрические параметры уступов (высота, угол уклона забоя, минимальная ширина бермы) подлежат оптимизации как ограничивающие факторы, связывающие локальный максимум откоса оптимального профиля борта с другими условиями, такими как геологические отдельности, способные вызвать обрушение откоса. Полученные оптимизированные профили всегда имеют более крутой уклон на 8° по сравнению со своими двухмерными эквивалентами (т. е. двухмерными профилями с таким же коэффициентом устойчивости) в зависимости от типа пород и жесткости ограничений, установленных на значения локальных уклонов.

На примере меднорудного карьера проведено проектирование откоса борта в двухмерном случае и с помощью OptimalSlope. При оптимизированном откосе борта получено повышение чистой приведенной стоимости на 34 %, сокращение углеродного следа на 0,17 млн т в эквиваленте CO_2 и снижение потребления энергии на 82,5 млн МДж вследствие уменьшения объема вскрышных работ на 15 %.

Ключевые слова: карьер, стратегическое проектирование, оптимизация откоса борта, оптимизация, чистая приведенная стоимость (NPV), снижение потерь, уменьшение углеродного следа, OptimalSlope

при одинаковых ПУО, которые, в свою очередь, прочнее, чем в полости с выпуклыми бортами (рис. 2, а). Спустя несколько десятилетий Хок и Браун в главе 12 второго издания [6] изучили устойчивость вогнутых откосов круглого поперечного сечения. При условии однородного вмещающего массива пород и с помощью критерия прочности Кулона–Мора (KM), принятого для описания прочностных характеристик пород, т. е. сцепления c и внутреннего угла трения φ , авторы получили более высокое значение числа устойчивости (которое представляет собой безразмерный показатель механической

* Статья опубликована на английском языке в журнале *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2022. Vol. 39. По просьбе авторов публикуется перевод данной статьи с актуализацией результатов, полученных после ее первого издания.

** Контактное лицо: stefano_utili@optimalslope.com

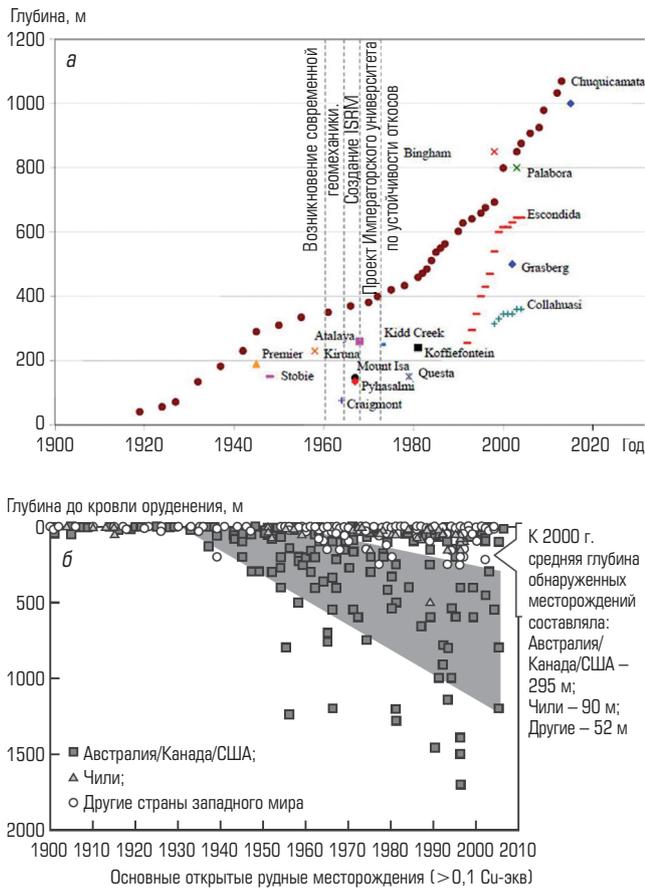


Рис. 1. Увеличение глубины отработки открытым способом по [3] (а); средняя глубина новых открытых месторождений руд по [1] (б)

устойчивости откосов, представленный далее в разделе 3) в случае круговых профилей, чем для плоских профилей, т. е. плоских откосов при одинаковых ПУО и точках подошвы и гребня. Закругленные откосы бортов исследовали также при проектировании железорудных карьеров в Канаде [7]. Хоек и Браун настоятельно рекомендуют воздерживаться от принятия однородных откосов бортов, так как в этом случае полностью игнорируется тот факт, что прочность геоматериалов имеет тенденцию изменяться с глубиной, с меньшим значением прочности в верхней части откоса благодаря хорошо известным геологическим процессам (например, отложение почв, выветривание и т. д.). Первый системный теоретический анализ механических свойств вогнутых профилей откосов в геоматериалах, обладающих определенным сцеплением, что применимо ко всем типам горных пород, а также глинистым грунтам, представлен в [8]. В данном исследовании системно доказано наличие более высокой устойчивости в случае логарифмически спиральных профилей (логоспиралей), имеющих радиус кривизны, возрастающий с глубиной (см. рис. 2, а), по сравнению с плоскими профилями при условии однородных откосов с прочностными характеристиками c и ϕ . С использованием метода верхней оценки при анализе предельных состояний Утили и Нова [8], во-первых, системно определили оптимальную форму логоспиралей, связанной с максимальным числом

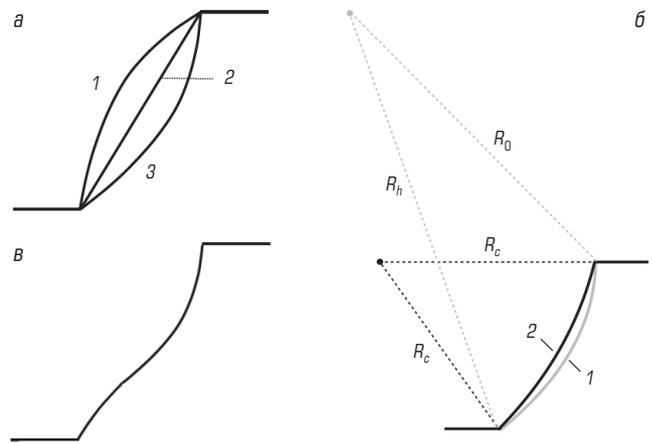


Рис. 2. Формы откосов:

а – вогнутый (1), плоский (2) и выпуклый (3) откосы при одинаковом значении предельного угла; б – профили откосов в однородных породах (с–ф): оптимальная логоспираль (1) [8] и оптимальный закругленный профиль (2) [10] (так как окружность является частным случаем логоспиралей, т. е. логоспиралей с постоянным радиусом (а не переменным), оптимальный логоспиральный профиль всегда более устойчивый, чем скругленный); в – оптимизированный частично вогнутый и частично выпуклый профиль, полученный в среде OptimalSlope для однородного с–ф-откоса

устойчивости для нескольких заданных значений ПУО, во-вторых, провели сравнительный анализ логоспиралей и их плоских эквивалентов. Показано, что профили логоспиралей характеризуются более высоким значением коэффициента устойчивости, чем плоские эквиваленты, при любых значениях c и ϕ с учетом наивысшего прироста при полуугле и вертикали, т. е. для ПУО $\sim \pi/4 + \phi/2$. Последующие исследования [9–11] были посвящены устойчивости вогнутых профилей полостей в однородных геоматериалах (с–ф) с использованием методов линий скольжения [9], предельного равновесия [10] и конечных элементов для оценки устойчивости откосов. Все исследователи пришли к одному и тому же выводу относительно повышенной устойчивости нелинейных вогнутых профилей. С другой стороны, ключевым ограничением данных исследований является принятие определенной формы профиля, т. е. круг [10], логоспираль [8] или кривая, происходящая из теории поля линий скольжения и соответствующих уравнений [9], и, таким образом, оптимальная форма находится как форма, связанная с максимальным числом устойчивости среди кривых из очень ограниченного семейства. Очевидно, что такие профили больше субоптимальны, и истинно оптимальный профиль невозможно получить путем подобного исследования. Фактически профиль выемки в однородном (с–ф) геоматериале, оптимизированный в среде OptimalSlope [12], оказывается частично вогнутым и частично выпуклым (см. рис. 2, в), т. е. отличным от чисто вогнутого профиля, рассмотренного в [8–11]. Еще одно, возможно, более значимое ограничение состоит в допущении однородности откоса во всех вышеприведенных методах, что делает их результаты не применимыми для реальных карьеров, характеризующихся обычно

сложным литологическим составом горных пород, имеющих различную механическую прочность, а также присутствием разнообразных геологических отделистостей.

Поиск оптимального профиля откоса борта карьера представляет собой трудную задачу топологической оптимизации, так как откосообразование вызывает значительные необратимые (пластические) деформации, вызывающие существенное перераспределение напряжений на стадии предразрушения пород, в то время как существующая в геотехнологии теория топологической оптимизации в основном имеет дело с упругими средами [13]. Игнорирование начала пластического деформирования откоса, т. е. допущение чисто упругого механизма деформирования, не является жизнеспособной опцией, так как в результате получается слишком заниженная оценка сопротивления разрушению откоса по критерию коэффициента устойчивости. Введение теории пластичности в топологическую оптимизацию находится в зачаточном состоянии [14]. Поэтому существующие в литературе алгоритмы топологической оптимизации неприменимы для поиска оптимального профиля откоса. В программе OptimalSlope используется тот факт, что разрушение откоса происходит либо по вращательному механизму (плоское разрушение является частным случаем разрушения вращением с бесконечным радиусом кривизны), либо согласно механизмам, кинематика которых обусловлена наличием неоднородностей (например, граница раздела двух типов пород, разломы, трещиноватость, напластование, и др.). Для откосов, обустроенных в однородных по критерию c - ϕ геоматериалах, применение метода верхней границы при анализе предельных состояний позволяет определить механизм критического вращения просто путем определения минимума аналитической целевой функции без дискретизации откоса на конечные элементы [15]. Эту функцию получают путем установления энергетического баланса между внешней работой, выполняемой массивом, в котором ожидается разрушение, и энергией, рассеиваемой вдоль поверхности разрушения. Уравнение распространили на случай критического механизма для кусочно-линейного профиля откоса в однородном породном слое, а затем на случай многослойного откоса [12]. Кроме того, постановку задачи распространили на случай откосов в породах, удовлетворяющих обобщенному критерию прочности Хоека–Брауна (ОХБ) [16, 17]. Минимум функции уравнения энергетического баланса и, таким образом, критический механизм разрушения определяют в среде OptimalSlope [12]. Со времени внедрения критерия ОХБ сообщество геомехаников достигло прочного консенсуса относительно превосходства данного критерия над критерием КМ в области описания прочности пород [18, 19]. Однако для массивов сильно выветрелых пород, а также аллювиума лучше применять критерий КМ [4], поэтому в некоторых случаях для оценки прочности одних породных массивов используют критерий КМ, а других – критерий ОХБ. Программа OptimalSlope работоспособна в обоих случаях, так как в ней параметры, входящие в критерий ОХБ, конвертируются в эквиваленты параметров c - ϕ с помощью метода Ренани–Мартина [20].

Борта карьеров обычно слагаются пластами пород различной прочности. Программа OptimalSlope позволяет определять оптимальный профиль откоса для любой заданной литологической последовательности (в качестве входных данных можно задавать

любое число слоев, при этом прочность разных пластов можно описывать либо с помощью критерия КМ, либо критерия ОХБ) без необходимости ограничения поиска какого-то определенного семейства профилей. Оптимальный профиль откоса находят из решения математической задачи оптимизации, где ПУО, т. е. уклон откоса от гребня до подошвы, максимизируется при любой заданной стратиграфии, прочностных характеристиках пород и их коэффициента устойчивости. Геометрические размеры уступов (высота, откос забоя, минимальная ширина берм) задаются в качестве ограничений, связывающих максимальный локальный уклон искомого профиля откоса с другими геометрическими условиями, предотвращающими локальные разрушения, вызванные геологическими неоднородностями, т. е. разломами и трещинами (см. раздел 3).

В этом разделе статьи представлен финансовый и экономический эффект оптимизации откосов бортов. В разделе 3 описывается методология оптимизации, а в разделе 4 – ее результаты и выводы. В методологическом разделе демонстрируется работа оригинальной программы OptimalSlope [21] и ее взаимодействие с другими программными пакетами, применяемыми в стратегическом проектировании открытых горных работ.

2. Пример

Оптимизация откосов борта карьера рассматривается на примере блочной модели конкретного меднорудного месторождения. Модель предоставлена горнодобывающей компанией, ведущей разработку данного месторождения и сотрудничающей с Лабораторией проектирования рудников Дельфос Чилийского университета (рис. 3). Из-за соглашения о неразглашении название и местоположение исследуемого месторождения не могут быть раскрыты. Все параметры, необходимые для проектирования, взяты из [22], за исключением поправочного коэффициента стоимости (ПКС), специально рассчитанного для данного анализа. Характеристики блочной модели следующие: кубические блоки общим числом 647446 каждый размером 10×10×10 м составляют блочную модель размером 2250×2250×360 м. После анализа литологии выбранного объекта исследований и инженерно-геологических свойств пород были грубо выделены два однородных участка карьера [22] (рис. 4). Для каждого участка выбрано представительное поперечное сечение для проектирования профиля борта.

Прочность на одноосное сжатие (UCS), геологический индекс прочности (GSI) m_i и фактор нарушенности D даны в табл. 1. Прочность пород характеризуется критерием ОХБ [16]. Фактор нарушенности учитывает ослабленность пород вследствие буровзрывных работ и разгрузки от напряжений. Если принять $D = 1$ во всем массиве, это будет консервативный подход, так как проведение буровзрывных работ в современных карьерах хорошо контролируется. Кроме того, глубина карьера такова, что величина разгрузки от напряжений не вызовет значительных разрушений. Однако в нашем случае $D = 1$ согласуется с набором входных данных [22], поэтому допускаем определенную степень консервативности в отношении значения данного параметра.

Значения параметров экономики, металлургического передела, а также ставка дисконтированного дохода согласно [22] перечислены в табл. 2. С учетом капитальной стоимости в [22]

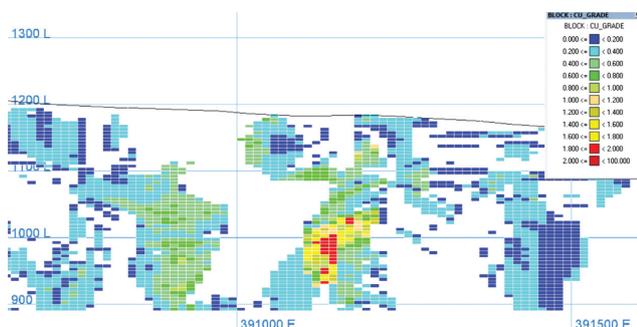


Рис. 3. Блочная модель (сечение в направлении восток–запад) [22]

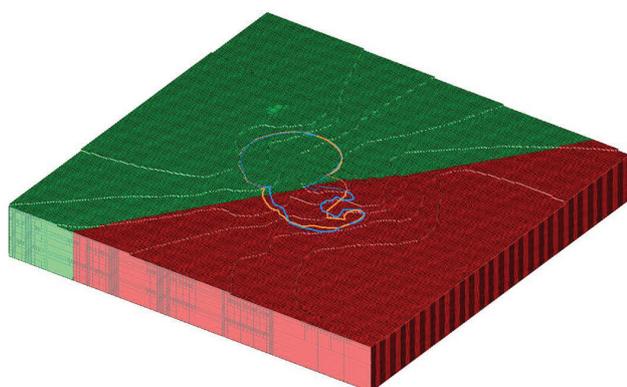


Рис. 4. Трехмерный вид блочной модели и выбранных участков карьера:

красный цвет – сектор S1, зеленый цвет – сектор S2; посередине топографической поверхности – контур предельной границы карьера: оранжевый цвет – плоские борта; голубой цвет – оптимизированный откос борта

принимается во внимание только стоимость для обогатительной фабрики. Однако авторы статьи хотели учесть все виды стоимости, типичные для проекта открытых горных работ (табл. 3).

3. Методология

Проектирование борта карьера – итеративный процесс, в котором принимают участие многопрофильные группы, состоящие из геологов, геотехников и горных инженеров [1]. Каждая команда циклически выполняет определенные шаги [23]. Обычно на испытательной площадке бурят несколько скважин и берут образцы кернов для лабораторного определения механической прочности геоматериалов и ключевых литологических отдельностей. Затем осуществляют предварительный упрощенный расчет и вычерчивают контур границ карьера по поверхности. Потом карьер делят на сектора для проектирования бортов [23]. Целесообразно делить карьер на малые сектора для получения репрезентативных двухмерных вертикальных сечений, представляющих литологический состав пород в каждом секторе. После этого необходимо спроектировать форму борта для каждого поперечного сечения с максимально крутым уклоном и в соответствии с заданным

Таблица 1. Инженерно-геологические свойства [22]

Сектор	UCS, МПа	GSI	m_i	D	γ , кН/м ³
S1	65	45	15	1	25,9
S2	50	45	12	1	25,9

Таблица 2. Экономические параметры и металлургическое восстановление [22]

Цена меди, долл. США/т	6000	3
Торговые издержки, долл. США/т	1700	0,85
Контрольная стоимость добычи, долл. США/т		3,4
Стоимость обогащения, долл. США/т		6,1
Металлургическое восстановление, %		85
ПКС, долл. США/т/уступ		0,13
Ставка дисконта, %		10
Предел обогатительной технологии, млн т/год		5
Предел геотехнологии, млн т/год		10

Таблица 3. Распределение капитальных затрат

Объект проектирования, виды работ	Характеристика	Стоимость, млн долл. США
Открытые работы	Добывающая инфраструктура	11,2
Обогатительная фабрика	Сгущение, фильтрация и хранение концентрата	5,7
	Дробильная установка	99
	Флотация и доизмельчение	28,3
	Молибденовая установка	3,7
	Всего	136,7
Дробление	Предварительное дробление, переработка крупной руды	45
Хвосты	Сгущение хвостов и утилизация воды	9,5
Материально-техническая база	Фабричная инфраструктура	9,6
Вспомогательные системы	Службы	34,5
	Общая площадь	3,4
	Всего	37,9
Итого		250

коэффициентом устойчивости, предотвращающем обрушение. Полученные профили бортов совместно со значимыми экономическими и металлургическими данными вводят в оптимизационную программу с целью расчета предельного контура карьера (ПКК) и эффективного минимального размера заходок. Это выполняется обычно с помощью алгоритма Лерха–Гроссмана [24] или более позднего метода псевдопотока [25]. В обоих алгоритмах необходимо определить очередность отработки блоков в модели в пределах границ карьера. Оценка очередности отработки блоков в карьерах переменного с глубиной угла откоса бортов описана в [26, 27].

Приведенная выше итерационная процедура расчета ПКК представлена на рис. 5. Процедура не зависит от принятой формы

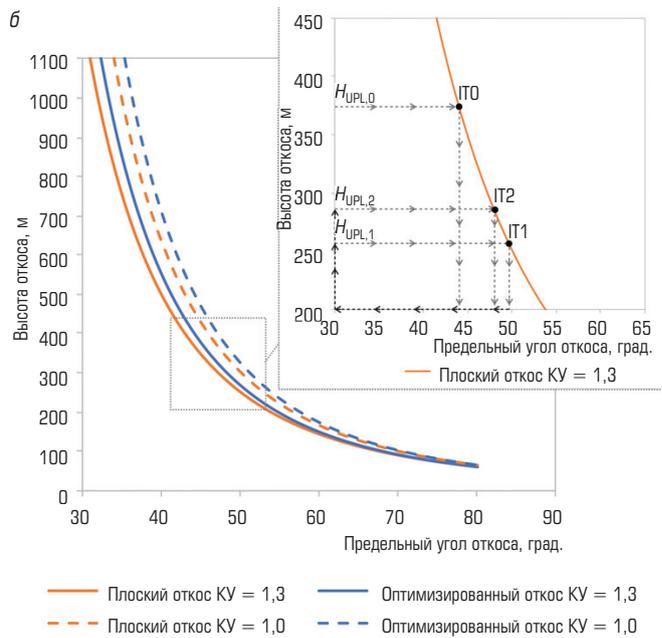
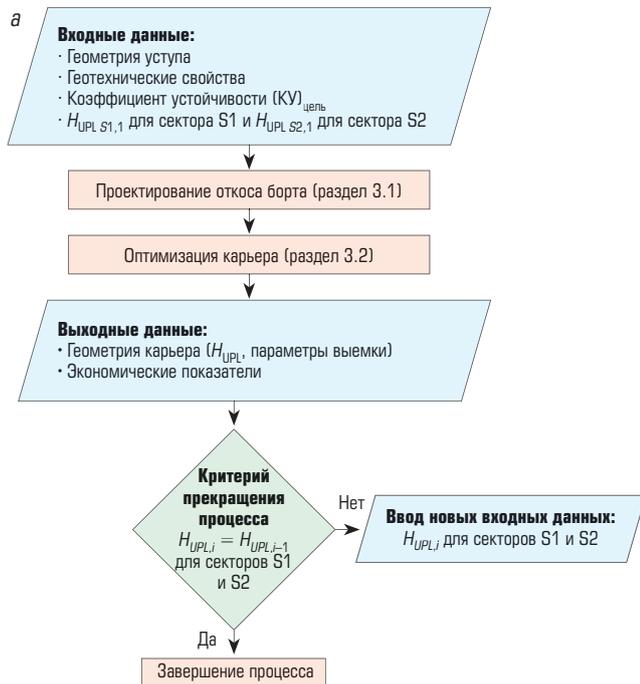


Рис. 5. Проектирование карьера:

а – схема итерационного процесса определения предельного контура карьера и минимального, экономически эффективного размера добычных блоков (процесс одинаков для любых принятых профилей бортов); *б* – зависимость высоты откоса (борта) карьера от общего угла откоса при разных значениях коэффициента устойчивости и разных формах профиля борта (плоский профиль показан оранжевым цветом, оптимизированный профиль – голубым цветом); данные кривые были получены для конкретных инженерно-геологических условий анализируемого карьера, с другим набором характеристик прочности пород будут получены другие кривые с сохранением качественных тенденций; на рисунке графически показаны итерации, выполненные до получения ПУО борта в каждом секторе карьера: серыми стрелками обозначен процесс проектирования профилей бортов при заданных высотах (см. раздел 3.1), черными стрелками показан процесс оптимизации профилей с получением глубины карьера в предельном контуре при заданных профилях (см. раздел 3.2)

профиля борта, т. е. плоской или оптимальной: начальную глубину карьера H_0 считают равной общей высоте блочной модели за вычетом «воздушных» блоков (выработанное пространство): $H_{UPL\ S1,0} = H_{UPL\ S2,0} = 370$ м, где $H_{UPL\ S1,0}$ и $H_{UPL\ S2,0}$ – высота борта в секторе S1 и S2, соответственно; UPL – предельная граница контура карьера. Затем рассчитывают характерные профили бортов при определенной глубине карьера в каждом секторе: для плоских бортов используется метод предельного равновесия в программе Slide2 [28], оптимальные профили определяют в OptimalSlope. Затем профили бортов вводят в оптимизатор (Geovia Whittle 4.7.3) и запускают его до получения предельного контура карьера (необходимые шаги описаны в разделе 3.2). Детали интеграции процедур, выполняемых в OptimalSlope и в Geovia, представлены на **рис. 6**. Кроме того, на рисунке описано комплексирование программы OptimalSlope с тремя другими основными коммерческими программными пакетами в горном деле, а именно: Datamine, Maptek и Hexagon Mining. Следует отметить, что процесс в принципе не зависит от применяемого программного обеспечения, однако названия модулей программ, обрабатывающих блочную модель, их язык и некоторые функции оптимизатора могут различаться. Поэтому авторами статьи была проверена и подтверждена применимость описанной процедуры

проектирования совместно с программами, указанными на рис. 6, а именно: Geovia Surpac [29] и Whittle [30], Datamine Studio OP [31] и Studio NPVS [32], Maptek Vulcan Open Pit Mine Planning [33], Hexagon MinePlan3D [34] и Project evaluator [35]. Значение глубин карьеров $H_{UPL\ S1,1}$ для сектора S1 и $H_{UPL\ S2,1}$ для сектора S2 в предельных границах, полученных как выходные данные стратегической карьерной оптимизации, сравнили с заданными входными значениями глубин, $H_{UPL\ S1,0}$ и $H_{UPL\ S2,0}$ соответственно. Вследствие их различия провели повторную итерацию, в которой глубины $H_{UPL\ S1,1}$ и $H_{UPL\ S2,1}$ были приняты в качестве входных данных для повторного процесса расчета откоса и второго цикла работы оптимизатора. Процедуру считали оконченной, когда величины глубин карьера в предельном контуре, полученные оптимизатором, были равны значениям, заданным как входные в расчете откосов бортов в каждом секторе карьера. Итерации до достижения сходимости представлены в табл. 5 (раздел 4).

3.1. Проектирование бортов карьеров

Все чаще горнодобывающие предприятия вынуждены вести открытую разработку полезных ископаемых в сложных литологических условиях, в которых разрушение по разным механизмам (например, обрушение уступов, площадок между транспортными

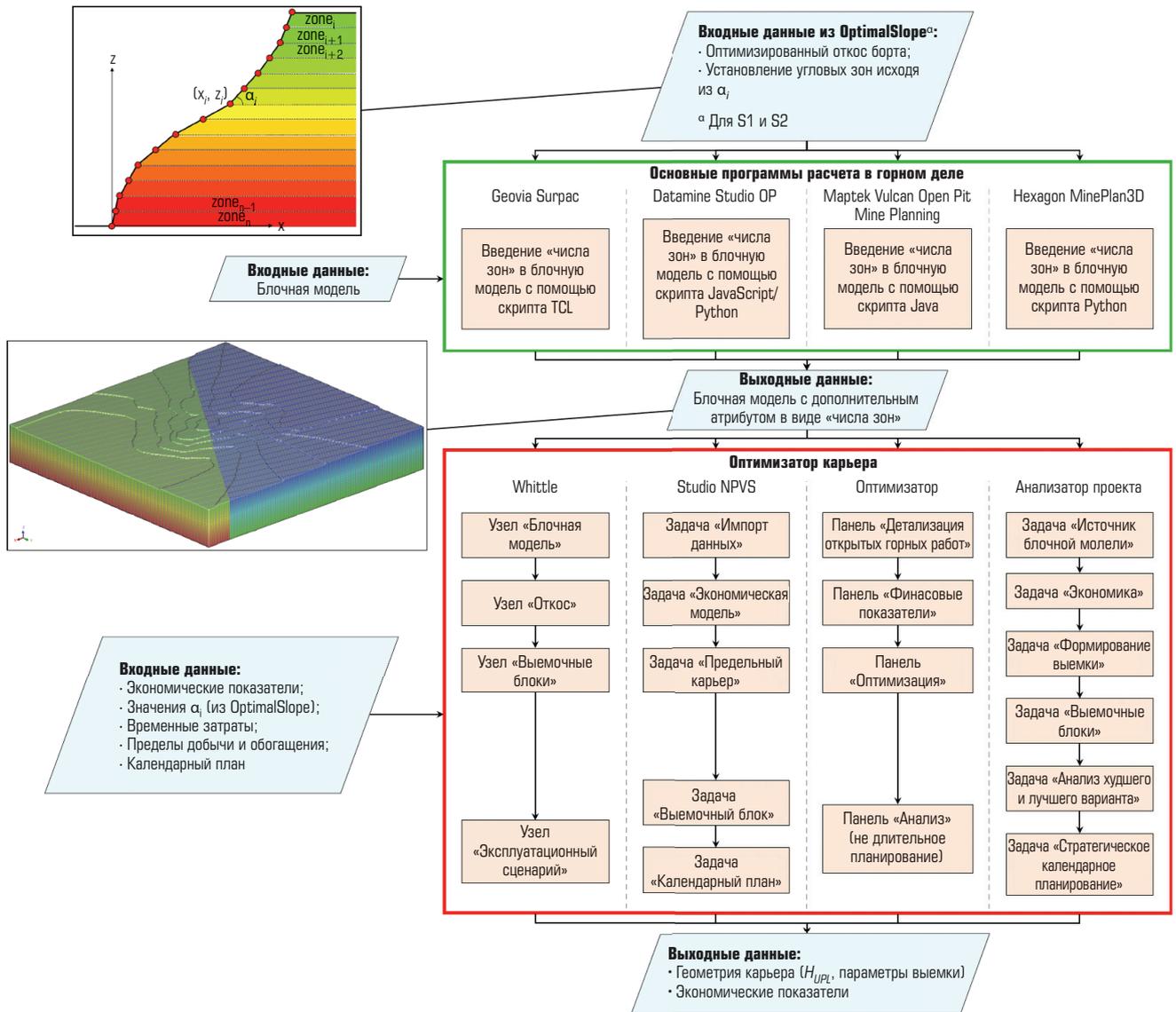


Рис. 6. Схема взаимодействия программ OptimalSlope [21], Geovia, Datamine, Maptek и Hexagon Mining при проектировании карьеров: сверху вниз: 1) в OptimalSlope осуществляется расчет оптимального профиля откоса в границах предельного контура карьера для каждого сектора; 2) задание профилей по каждому сектору блочной модели карьера стандартным образом путем указания угла уклона α_i по ряду (рядом) блоков в каждом сегменте профиля постоянного уклона (следует помнить, что задание углов откосов возможно несколькими способами; в нашем случае задан дополнительный атрибут блочной модели и блоки сгруппированы по зонам, так как для всех блоков с одинаковым углом откоса, т. е. принадлежащих одной зоне, задание угла возможно только одним методом); 3) обычная работа оптимизатора при определении предельного контура карьера и минимального, экономически эффективного размера добычных блоков. В красной рамке оптимизатора PIT OPTIMIZER приведены названия узлов/задач/панелей, используемых для введения входных данных и прогона оптимизатора

уклонами, сдвиговое разрушение откосов, обрушение вдоль разрывов и других нарушений сплошности и т. д.) происходит в разных частях карьера, и такие механизмы разрушения необходимо исследовать. При проектировании бортов карьеров авторы статьи придерживались стандартной процедуры, начиная от расчета уступов и переходя к расчету предельных профилей бортов [36, 37].

Для определения максимального уклона уступных забоев выполнен анализ Моргенштерна–Прайса методом предельного равновесия в программе Rocscience Slide 2 [28] с учетом

заданного коэффициента устойчивости ($KU = 1,1$, табл. 4). В основном количество законтурных повреждений при контурном взрывании, а также эффективный угол уступного забоя регулируются фактором наличия трещин и разрывных нарушений, секущих каждый уступ. В данном случае трещины не рассматривали просто в силу отсутствия соответствующих данных по анализируемому карьеру. При наличии данных о блочности массива определение максимального уклона уступных забоев возможно с помощью программных пакетов SWedge [38] или Frac_Rock [39].

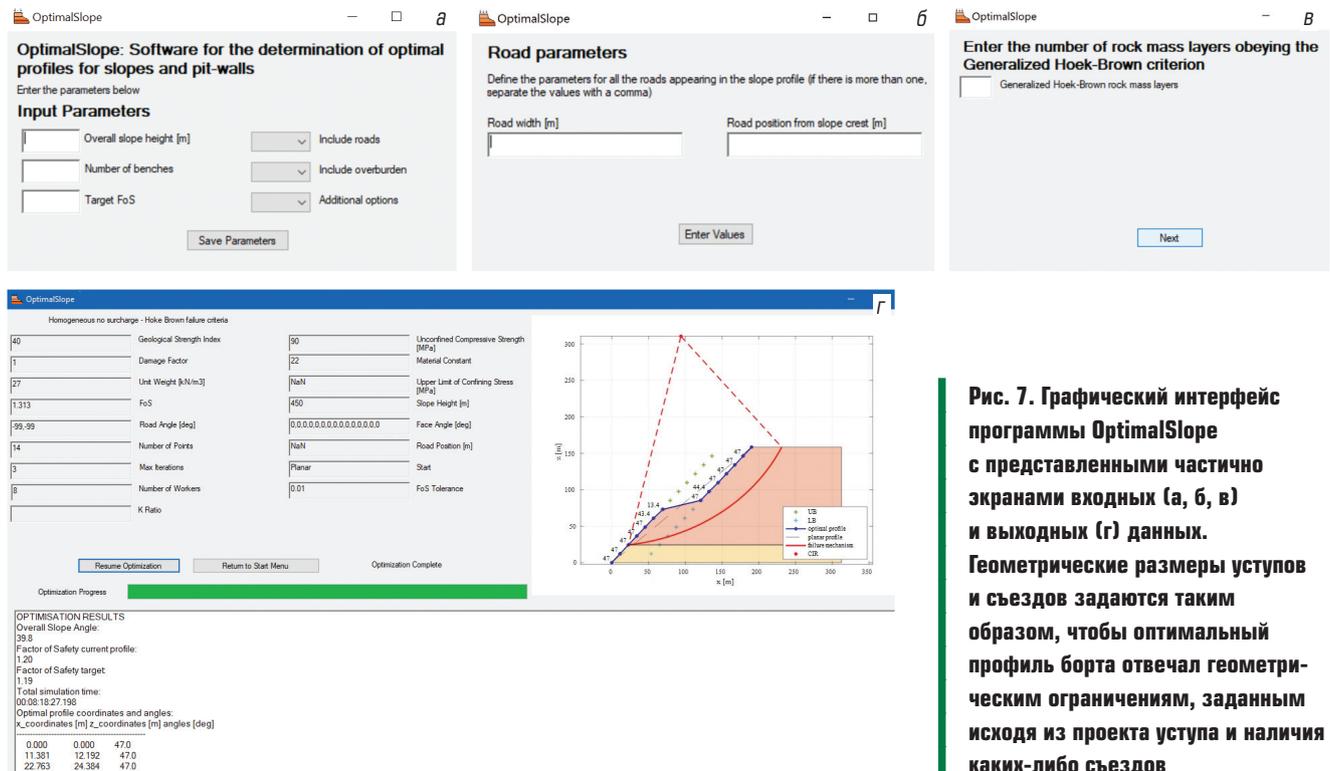


Рис. 7. Графический интерфейс программы OptimalSlope с представленными частично экранами входных (а, б, в) и выходных (г) данных. Геометрические размеры уступов и съездов задаются таким образом, чтобы оптимальный профиль борта отвечал геометрическим ограничениям, заданным исходя из проекта уступа и наличия каких-либо съездов

Высоту уступов принимали равной 10 м для всего карьера [22]. В соответствии с набором исходных данных [22], рассчитали минимальную ширину бермы b_w (м), используя уравнение, предложенное Коллом [40] и известное как модифицированный критерий Ритчи, хорошо зарекомендовавший себя в натуральных исследованиях уступных откосов в карьерах [41]:

$$b_w = 4,5 + 0,2H_{\text{уступ}} \quad (1)$$

Следует отметить другое уравнение: $b_w = 3,5 + 0,17H_{\text{уступ}}$, предложенное в [41], однако в силу его неоднозначности [42] было отдано предпочтение уравнению (1).

При установлении ширины бермы следует иметь в виду, что бермы должны удовлетворять нескольким техническим требованиям, в том числе ключевым, таким как удержание обвалов и перехват породных обломков, возможных при отработке уступа, работа выбранного парка экскаваторов. Бермы не проектируются с целью удержания 100 % объема обвала пород, потому что в этом случае придется задавать чрезмерную ширину. Из уравнения (1) получают ширину бермы, способную удержать 70–85 % объема обвала [18], что не может быть удовлетворительным. Поэтому в течение последних двух десятилетий были проведены исследования обрушений горных пород с применением численного моделирования потенциальных траекторий при проектировании откосов с использованием 2D-моделей сосредоточенной массы (2DLM) как, например, Rocscience RocFall [43] и/или 3D-моделей твердого тела (3DRB) как, например, Трајес3D [44]. В этих моделях используются коэффициенты упругого восстановления для описания количества потерь энергии при упругом деформировании, вызванном соударением кусков породы, отскакивающих от бермы или уступа. С другой стороны, входные параметры моделей 2DLM и 3DRB

весьма разнятся. Кроме того, их редко калибруют на основе данных анализа обрушений на какой-то конкретной площадке или данных натуральных испытаний при выполнении технико-экономического обоснования проекта открытой добычи. Более того, они могут оставаться некалиброванными в течение всего срока отработки карьера [45]. В заключение при наличии имеющейся информации, полученной в ходе выполнения ТЭО проекта, считаем уравнение (1) достаточно компетентным для определения ширины бермы, особенно в условиях принятой (низкой) высоты берм в данном случае [45]. Наконец, как отмечено в [18, раздел 10.2.1.2] уравнение (1) широко применяется на практике как в Северной, так и в Южной Америке. Еще одно технологическое условие, которому должна удовлетворять берма выбранной ширины, это перехват обломков породы вследствие наличия призм обрушения на поверхности уступного забоя. Пригодность выбранной ширины бермы подтверждается либо компьютерным моделированием [39], либо численным анализом [46]. Современный обширный обзор методологий проектирования берм, использующихся в настоящее время в практике открытых горных работ, представлен в [47].

После расчета геометрических размеров берм проведено определение геотехнически оптимальных профилей откосов в сечениях двух выделенных секторов в карьере (см. рис. 4) с помощью

Таблица 4. Критерии приемлемости коэффициентов устойчивости

$K_{w, \text{мин.уступ}}$	1,1
$K_{w, \text{мин.предел.контур}}$	1,3

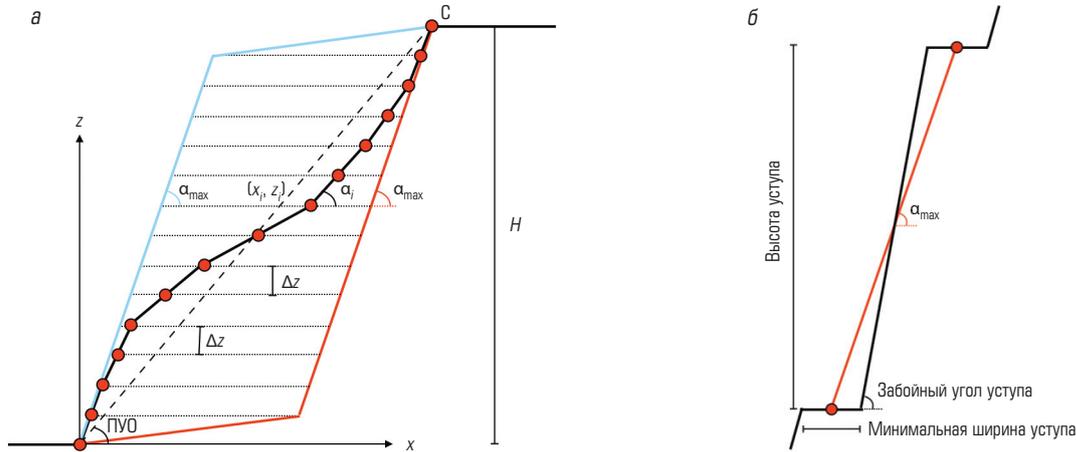


Рис. 8. Возможный базовый профиль откоса (а) и определение $\alpha_{i\max}$ на основе геометрических параметров уступа (входные данные программы OptimalSlope) (б).

Пятка профиля находится в точке начала координат (x_0, y_0) , точка C – гребень профиля; по направлению z принимается однородная дискретизация; линиями красного и голубого цвета обозначены области поиска оптимального профиля; интервал дискретизации профиля $n \Delta z$, т. е. $n - 1$ неизвестных подлежат определению: x_1, x_2, \dots, x_{n-1} ; для карьерных условий удобно принять, что Δz равен высоте уступа

оригинальной программы OptimalSlope [21]. Исходные данные для работы программы, а именно: высота уступа, уклон уступного забоя, минимальная ширина бермы и ширина транспортного пути (рис. 7), используются как ограничения при поиске оптимального профиля. Профиль борта конструируется в OptimalSlope набором дискретных точек в вертикальной плоскости: координаты (x_i, z_i) на рис. 8, где z_i содержит значения, определяемые высотой уступа ($\Delta z =$ высоте уступа) и вводимые пользователем, в то время как x_i представляет неизвестные переменные, подлежащие определению. Поиск оптимальных профилей сводится к определению вероятных профилей (в пределах областей, ограниченных красными и голубыми контурами на рис. 8). Профиль считается вероятным и подходящим, если $(z_i - z_{i-1}) / (x_i - x_{i-1}) \leq \tan \alpha_{i\max}$ для любого i , т. е. величина уклона любого сегмента профиля ограничена сверху значением $\alpha_{i\max}$. Оценка $\alpha_{i\max}$ выполняется в программе до активации алгоритма оптимизации на основе исходных данных о высоте уступа, уклоне уступного забоя и минимальной ширины бермы, которые вводятся пользователем (см. рис. 8, б). Если необходимо учесть наличие транспортного уклона в профиле борта, на участке профиля, соответствующего вертикально позиции транспортного уклона, задается меньшее значение $\alpha_{i\max}$.

Оптимальным профилем борта считается профиль максимальной крутизны при сохранении безопасности, т. е. $\text{ПУО} = \text{ПУО}_{\max}$, где ПУО – угол наклона линии, соединяющей подошву и гребень борта относительно горизонтали (см. рис. 8). ПУО_{\max} определяется в программе OptimalSlope путем итераций (рис. 9). С помощью главного алгоритма находят оптимальную форму профиля при заданном ПУО и геометрических ограничениях (значения $\alpha_{i\max}$). Сначала ПУО определяют при заданных значениях высоты борта, инженерно-геологических свойств всех породных слоев и коэффициента устойчивости на основе данных диаграмм устойчивости [48], построенных в программе OptimalSlope. Если прочность пород описывается с помощью критерия ОХБ, параметры, входящие в этот

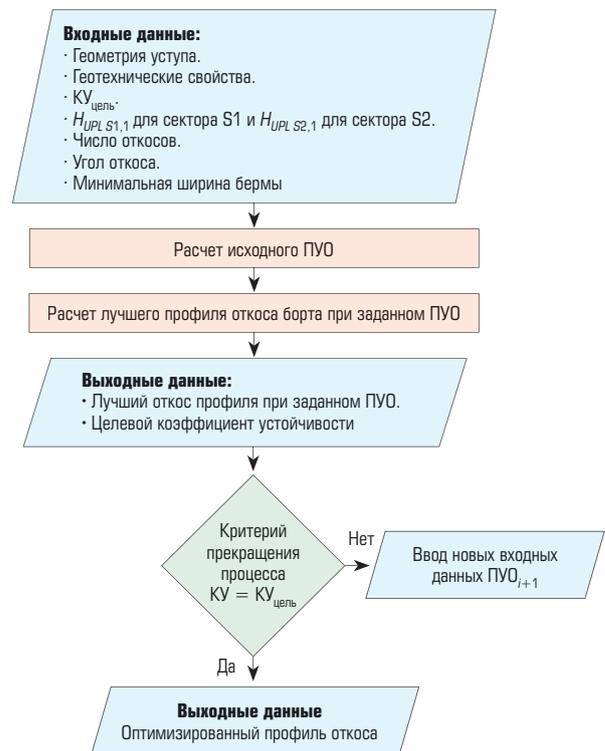


Рис. 9. Итерационная процедура оптимизации профиля борта карьера в программе OptimalSlope

критерий, конвертируются в критерий КМ с помощью уравнения (14) в работе [20]. Несколько известных уравнений для перевода параметров критерия ОХБ в критерий КМ для проведения анализа устойчивости откосов предложены также в [49, 50]. Все эти соотношения зависят от горного давления, которое испытывает откос. Таким образом, получается, что основной проблемой нахождения

эквивалентных критериев разрушения является выбор диапазона значений горного давления. Однако в противоречие вышеуказанным соотношениям, согласно [20], эффективный диапазон значений горного давления нечувствителен к прочности пород и, наоборот, определяется конфигурацией откоса, и только уравнения, предложенные в [20], отражают эту зависимость. Значение коэффициента устойчивости KU_i , связанное с оптимальным профилем, полученным на шаге итерации i , сравнивают с целевым значением $KU_{цель}$: если он выше, на следующем шаге итерации задается более высокое значение предельного угла откоса, и наоборот. Критерием прекращения процесса итерации является процентная разница между $KU_{цель}$ и KU_i . В нашем случае понадобились 4 итерации для получения разницы между $KU_{цель}$ и KU_i менее 1 %.

В случае однородного уступа, т. е. состоящего из одного однородного слоя породы/грунта, оптимальный профиль борта находят с помощью главного алгоритма для заданного исходного ПУО как профиль, соответствующий максимальному коэффициенту устойчивости, определяемому с использованием критерия КМ или ОХБ. Известный скалярный параметр, введенный Тэйлором [51, 52] при создании безразмерных диаграмм устойчивости, является адекватной мерой сравнения способности разных профилей выдерживать нагрузку [21]. В случае слоистого (неоднородного) уступа оптимальный профиль определяют в OptimalSlope как профиль, соответствующий максимальному значению эквивалентного, вычисляемого как физическое средневзвешенное параметров γ , H , c или всех слоев откоса. Следует отметить, что в слоистом откосе процесс разрушения может охватывать несколько слоев весьма различной прочности, и длина поверхности разрушения (двухмерный график) в каждом слое может оказывать существенное негативное влияние на общую сопротивляемость откоса разрушению (т. е. количество рассеянной энергии в уравнении энергетического баланса анализа предельных состояний). По этой причине в программе OptimalSlope определяют количество рассеянной энергии вдоль поверхности разрушения для каждого механизма разрушения, исходя из реальной длины кривой прочности для каждого слоя при условии, что рассчитанная для каждого механизма разрушения величина отражает истинный коэффициент устойчивости (рис. 10). Крайне важно определить коэффициент устойчивости каждого потенциального профиля при всех возможных механизмах разрушения в среде OptimalSlope, включая все поверхности разрушения, выходящие на земную поверхность уступа (см. рис. 10).

3.2. Оптимизация контуров карьеров

С целью введения форм профилей борта в оптимизатор контуров карьеров Geovia Whittle блочную модель разделили на «зоны» (согласно терминологии Whittle) с помощью Geovia Surpac. В каждой зоне задали уклон откоса. Число зон зависит от формы профиля борта (см. рис. 6). Для расчета предельного контура карьера и минимального, экономически эффективного размера выемочного блока использовали программу Whittle с целью получения кривой наилучшего дисконтированного сценария на календарном графике добычи (рис. 15, раздел 4.4). Затем с помощью так называемого алгоритма Milawa NPV получили кривую сценария нормативного случая для исходного набора минимальных, экономически

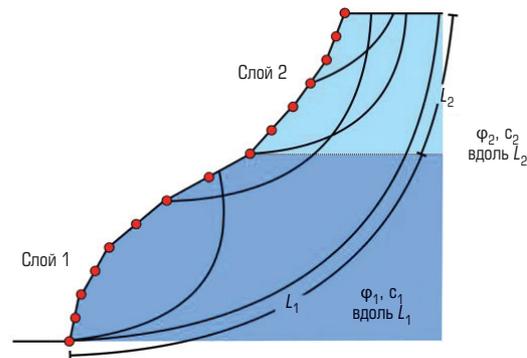


Рис. 10. Механизмы разрушения, рассмотренные в OptimalSlope для возможного базового профиля слоистого откоса, сложенного породами различной прочности

эффективных выемочных блоков в соответствии с пиками кривой наилучшего сценария. После этого кривую нормативного сценария несколько раз пересчитывают с целью изучения возможных выемочных блоков вблизи изначально выбранных, чтобы максимально приблизить кривую нормативного случая к кривой наилучшего сценария. Получив комбинацию выемочных блоков, позволяющих достичь максимального значения NPV в предельном контуре карьера, построили график ежегодной добычи (рис. 16, раздел 4.4). При необходимости варьировали набор выемочных блоков с целью обеспечения постоянного максимального ежегодного объема добычи для питания обогащательной фабрики на весь срок эксплуатации карьера. Наконец, выбрали ПКК в соответствии с наивысшим плато кривой нормативного сценария (см. рис. 15). На практике наборы возможных выемочных блоков могут незначительно изменяться: например, можно выбрать выемочные блоки, слегка отличные от пиков кривой нормативного сценария, в качестве ПКК в силу различных соображений (чтобы максимизировать объем добычи руды или количество запасов, или по эксплуатационным причинам), или, возможно, по причине нежелания выполнять необходимую процедуру итерации для выбора минимальных эффективных размеров блоков и ПКК. Кроме того, методики проектирования могут различаться в зависимости от задач горнодобывающего предприятия, а также опыта разработчиков. Тем не менее ключевой задачей процедуры проектирования, описанной выше, является проведение последовательного и значимого сравнения традиционного подхода, основанного на использовании плоских бортов, и оптимизационного метода, предложенного в данной работе, с целью приблизительной количественной оценки финансовых и экономических выгод в случае принятия геотехнически оптимизированных профилей бортов карьеров. В связи с этим было бы логично использовать предложенные методы выбора ПКК и экономически эффективных минимальных размеров выемочных блоков независимо от форм откосов бортов. Авторы также убеждены, что даже при условии постановки иных задач проектирования (например, достижения компромисса между необходимым значением NPV и максимально экономным использованием ресурсов), или при выборе иных методик определения ПКК и экономически эффективных минимальных размеров блоков (например, когда отдается предпочтение периоду

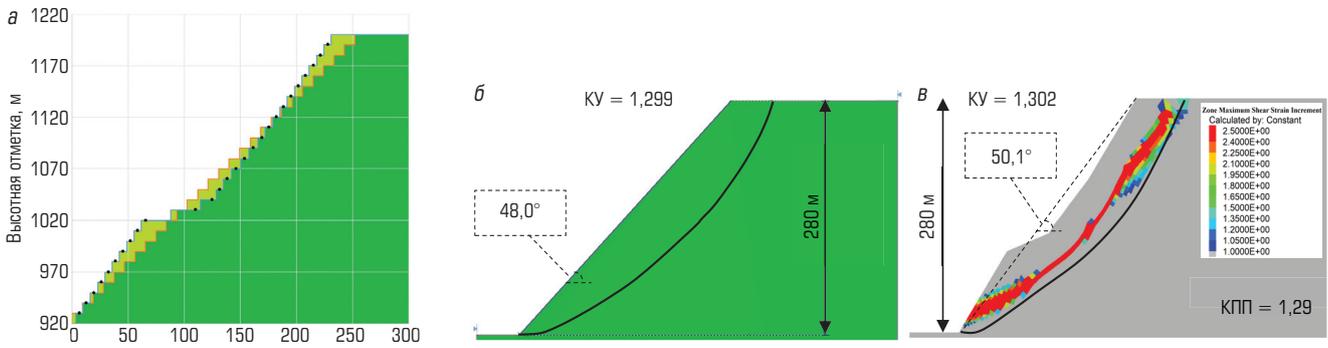


Рис. 11. Предельный контур борта в секторе S1:

a – сравнение традиционного и оптимизированного расчета (плоский профиль показан оранжевым цветом, оптимальный профиль – голубым цветом, черным цветом представлены координаты x_i, z_i , рассчитанные в среде OptimalSlope); *б* – механизм разрушения (черная линия) и коэффициенты устойчивости, определенные методом предельного равновесия (2D Slide2) для плоских профилей; *в* – механизм разрушения и коэффициенты устойчивости, определенные методом предельного равновесия (2D Slide2), и сдвиговая деформация, рассчитанная конечно-разностным методом со снижением сдвиговой прочности (FLAC3D) для оптимального профиля; КПП – коэффициент понижения прочности

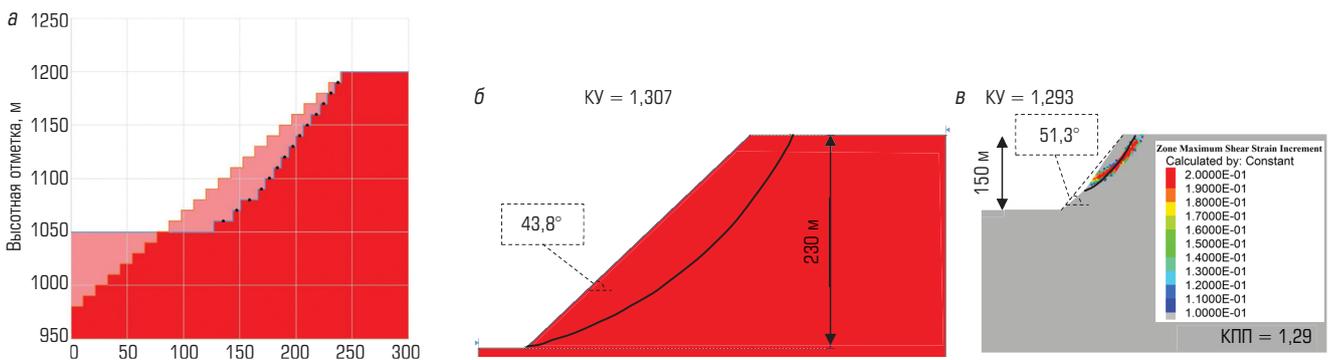


Рис. 12. Предельный контур борта в секторе S2:

a – сравнение традиционного и оптимизированного расчета (плоский профиль показан оранжевым цветом, оптимальный – голубым цветом, черным цветом представлены координаты x_i, z_i , рассчитанные в среде OptimalSlope); *б* – механизм разрушения (черная линия) и коэффициенты устойчивости, определенные методом предельного равновесия (2D Slide2) для плоских профилей; *в* – механизм разрушения, коэффициенты устойчивости, определенные методом предельного равновесия (2D Slide2), и сдвиговая деформация, рассчитанная конечно-разностным методом со снижением сдвиговой прочности (FLAC3D) для оптимального профиля

окупаемости, а не максимизации NPV, использованию дисконтирования уступов и т. д.), принятие оптимальных профилей бортов карьеров всегда позволит получить финансовый и экологический эффект по причине сокращения объемов выемки пустой породы независимо от выбранной методики проектирования или приоритетов конкретной горнодобывающей компании.

4. Результаты

Геометрические характеристики предельных контуров карьеров ($H_{урЛ}$ и ПУО), полученные в результате каждой итерации процесса проектирования (см. рис. 5, *a*), представлены в **табл. 5**. По традиционной методике с плоскими бортами были выполнены шесть итераций, в то время как при оптимизационном проектировании сходимость была достигнута за две итерации.

Отметим, что для проведения последовательного и объективного сравнения двух проектов был выбран метод последовательных приближений между традиционным и оптимальным профилем бортов по системе Whittle (см. рис. 5). В реальности возможно выполнение меньшего числа итераций или без учета всех необходимых ограничений, с получением в результате не самого оптимального проекта контура карьера. И тем не менее даже без проведения итераций, т. е. видя результаты 1-й итерации в **табл. 5**, можно утверждать, что принятие оптимального контура карьера позволит получить финансовую выгоду.

4. 1. Профили борта карьера

Полученные профили борта карьера для сектора S1 и S2 представлены на **рис. 11, а** и **12, а** соответственно. Коэффициенты

устойчивости профилей подтверждены с использованием метода анализа предельных состояний Моргенштерна–Прайса с применением всех уравнений равновесия ко всем слоям [53] и в среде Slide2 [28] при некруговой поверхности разрушения и иных параметрах по умолчанию. Предварительный анализ показал, что результаты не зависят от числа слоев и границ выделенных областей. Профили борта карьера, полученные в Slide2, показаны на рис. 11, б и 12, б для плоских профилей и оптимальных профилей соответственно, с их коэффициентами устойчивости. Во всех случаях полученные KV отличаются от целевого значения 1.3 менее чем на 1 % (см. табл. 4). Для оптимальных профилей, с учетом важности независимой проверки их коэффициентов устойчивости, был проведен дополнительный анализ устойчивости методом конечных разностей при снижении сдвиговой прочности (FDMSSR) в среде FLAC3D 7.0с [54] с заданной единичной длиной в направлении от плоскости. В среде FLAC критерий ОХБ применяли в комбинации с «модельным коэффициентом устойчивости» и иными значениями по умолчанию, оказывающими влияние на сходимость (в виде неравновесных узловых сил) и на эффективность определения обрушения откоса. Более подробно алгоритм расчета коэффициента устойчивости описан в руководстве FLAC [54]: в общих словах, за стандартной процедурой, принятой в методе FDMSSR, как в случае геоматериалов, отвечающих критерию КМ [55] следует аппроксимация критерия ОХБ к локальному критерию КМ: $\tau_{\max} = \tan\Phi_{\text{loc}} + c_{\text{loc}}$, где локальное сцепление c_{loc} и угол сдвиговой прочности $\tan\Phi_{\text{loc}}$ рассчитывают с помощью локального минимального главного напряжения и параметров, входящих в ОХБ. На каждом шаге анализа FLAC значения c_{loc} и $\tan\Phi_{\text{loc}}$ снижают путем деления на повышающийся коэффициент ослабления до обрушения откоса. Коэффициент устойчивости определяют как фактор ослабления на грани обрушения откоса. При анализе с нулевой и ненулевой дилатансией были получены практически одинаковые коэффициенты устойчивости. Важно, что дилатансия имеет пренебрежимо малое влияние на устойчивость откоса, так как ее значение неизвестно для пород, слагающих массив исследуемого карьера. Критические механизмы разрушения, определенные с помощью Slide2 и FLAC3D, а также соответствующие KV представлены на рис. 11, в и 12, в. В обоих выделенных секторах карьера полученные KV отличаются от целевого значения, равного 1.3, менее чем на 1 %. Следует обратить внимание на то, что FDMSSR принципиально отличается от методов анализа предельного равновесия и предельных расстояний (которые используются в OptimalSlope). Поэтому факт получения подобных коэффициентов устойчивости в средах Slide2 и FLAC3D подтверждает достоверность KV профилей борта карьера, определенных в программе OptimalSlope. Проверка значений коэффициентов устойчивости профилей бортов, полученных в среде OptimalSlope с использованием самых распространенных в геотехнике программ Slide2 и FLAC, подтвердила их надежность.

На рис. 11, а и 12, а показано визуальное сравнение плоского профиля борта карьера, полученного традиционным расчетом. Относительно сектора S1: общая высота профилей бортов одинакова. Очевидно, кривизна оптимизированного профиля выше, чем у плоского. Площадь, закрашенная светло-зеленым цветом

Таблица 5. Определение оптимального предельного контура карьера

Итерация	$H_{\text{урл}}, i-1, \text{ м}$		ПУО, градус		$H_{\text{урл}}, i, \text{ м}$	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2
<i>Плоские борта</i>						
1	370	360	44,1	37,1	260	140
2	260	140	49,5	51,7	280	260
3	280	260	48	42,1	280	230
6	280	230	48	43,8	280–270	230
<i>Оптимальные профили борта</i>						
1	270	220	50,5	47,4	280	250
2	280	250	50,1	51,3	280	150

(см. рис. 11, а) обозначает разницу между двумя профилями: за исключением небольшого различия в центральной зоне, при оптимальном профиле объем вскрышных работ значительно ниже. Касательно сектора S2: профили существенно различаются по высоте: длина оптимального профиля на 70 м меньше, чем плоского (см. рис. 12, а). Кроме того, крутизна откоса оптимального профиля больше. В дополнение: объемы вскрышных работ выглядят одинаковыми, но по-разному распределены в пространстве. В верхней половине борта при оптимальном профиле объем работ выше, в основном по руде, тогда как при плоском профиле для экскавации руды требуется достичь большей глубины.

4. 2. Трехмерный анализ устойчивости откоса борта карьера

Предельные контуры борта карьера, полученные в результате традиционного (плоский борт) и оптимизированного расчета представлены в трехмерном виде на рис. 13, а и 13, б соответственно. В обоих случаях видно, что карьер имеет несколько выемок усредненно-конической формы, причем глубина карьера в одном случае отчетливо ниже. Это объясняется разными свойствами пород вмещающего массива и разным распределением полезного ископаемого в границах S1 и S2.

Коэффициенты устойчивости борта в границах предельного контура проверяли путем анализа с использованием метода конечных разностей в трехмерном виде с помощью FLAC3D 7.0 [44]. С целью сохранения совместимости результатов входные данные для анализа устойчивости в трехмерном виде использовали те же, что и при двухмерном анализе (см. раздел 4.1). Критические механизмы разрушения, определенные моделированием и установленные с помощью карты изолиний коэффициентов устойчивости, показаны на рис. 14. Для проверки зависимости от вида сетки проведены два вида расчета с ячейками более крупного и более мелкого (вдвое меньше, чем в первом случае) размеров. Полученный общекарьерный минимальный KV равен 1,70 в первом случае и 1,67 – во втором. Такое небольшое различие результатов означает, что принятый размер ячеек сетки весьма мал для обеспечения отсутствия влияния шага сетки на результаты расчета коэффициента устойчивости в практических целях. Авторами было принято значение коэффициента

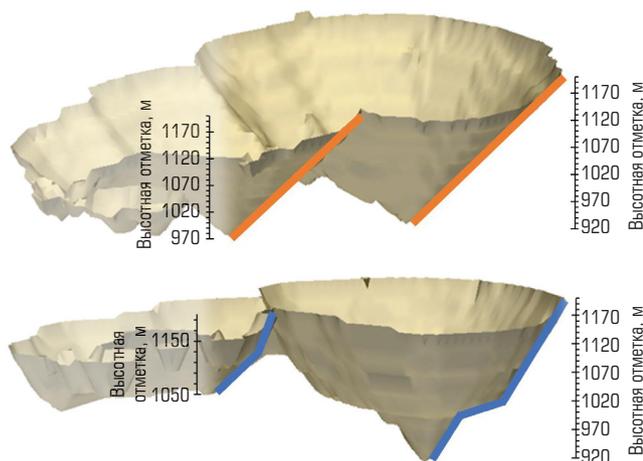


Рис. 13. Предельный контур карьера:

а – традиционный расчет; б – оптимизированный расчет; в границах ПКК карьер представлен несколькими выемками с границей между конусами, усредненно-проходящей между секторами S1 и S2

устойчивости 1,67 из расчета по FLAC3D, которое значительно выше результатов расчетов двумя способами по 2D FLAC, ~1,30 и ~1,31 (см. раздел 4.1). Такое решение базируется на эффекте образования вогнутой линии, что в случае вогнутых в плане откосов ведет к увеличению их устойчивости [6, 56]. Выраженная вогнутость откосов в границах предельного контура борта работает как ограничивающий фактор сдвижения. Это факт не учитывается в двумерных расчетах вследствие их консервативности.

4.3. Ключевые финансовые показатели

Ключевые выходные данные двух видов расчета приведены в **табл. 6**. Чистая приведенная стоимость (ЧПС) оптимизированного борта превышает NPV традиционного плоского борта приблизительно на 12 млн долл. США. Таким образом, при выемке с оптимальным профилем борта повышение NPV составляет 34 %. Такое повышение эффективности работ объясняется сокращением объема вскрышных работ на 15 % с 23,7 до 20,7 млн т при том же объеме производительности по руде. При этом снижение коэффициента вскрыши составляет от 0,40 до 0,35. Еще одной мерой доходности производства является внутренняя норма прибыли (ВНП). При работе борта оптимизированного профиля достигается рост ВНП на 15,8 % по сравнению с 13,9 % в проекте с плоским бортом. ВНП 15 % считается некоторыми компаниями порогом жизнестойкости горного предприятия, поэтому для исследуемого здесь карьера оптимизация профиля борта предложенным способом способствует повышению экономической жизнестойкости данной компании.

4.4. График производства

На **рис. 15** представлен график добычи проектного карьера с традиционным плоским и оптимизированным бортом. Вертикальными линиями черного цвета обозначены конфигурации карьера (фазы работ), выбранные в качестве минимального

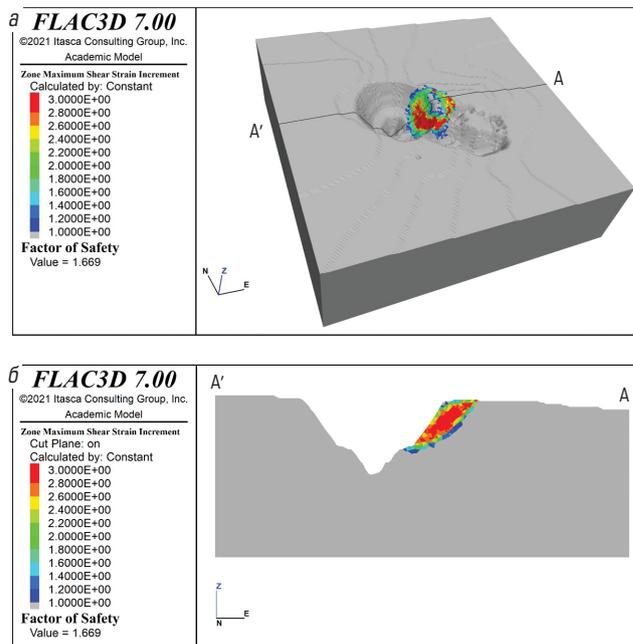


Рис. 14. Карта приращений сдвиговой прочности в среде FLAC3D для предельных контуров бортов оптимального профиля (а) и приращения сдвиговой прочности в вертикальном сечении А–А' (б)

Таблица 6. Экономические и технологические результаты оптимизации карьера

Выходные данные в границах предельного контура борта карьера	Плоский борт		Оптимизированный борт	
	S1	S2	S1	S2
Предельный угол откоса, градус	48	43,8	50,1	51,3
$H_{урл}$, м	270	220	280	150
Пустая порода, т	23707500		20651462	
Руда, т	59314446		59232285	
Коэффициент вскрыши	0,4		0,35	
NPV, долл. США	34561747		46231284	
ВНП, %	13,9		15,8	
Срок службы, лет	12,22		12,12	
Период окупаемости, лет	3,89		3,57	
Приращение NPV, %			33,8	

экономически эффективного размера выемочных блоков, а также предельный контур борта карьера (крайняя правая линия). В обоих случаях ПКК выбран в соответствии с выемочными блоками, отвечающими пику кривой дисконтированного нормативного сценария (зеленый цвет). Факт наличия плато на кривой нормативного сценария означает, что данный выбор обеспечивает устойчивый оптимум NPV. На **рис. 16** показан объемы производства в зависимости от срока эксплуатации карьера. Из рисунка видно, что в обоих вариантах расчета объем добычи руды достаточно единообразный год от года. Постоянная производительность – положительный фактор в плане логистики.

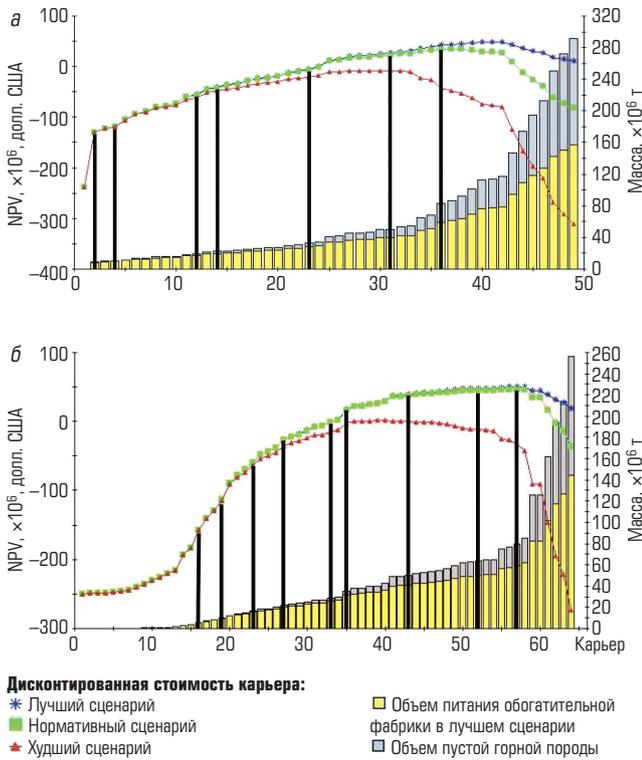


Рис. 15. График карьерных работ с указанием NPV и объема выемки руды и пустой породы в зависимости от числа вложенных заходок. Каждая конфигурация карьера (фаза работ) соответствует определенному значению валового дохода (фиксированные диапазоны): а – традиционный расчет; б – оптимизированный расчет

4.5. Экологические показатели

В современной литературе предложены несколько методов оценки сроков эксплуатации карьеров. Авторами рассчитано значение необходимой энергии экскавации руд и пустых пород с соответствующим углеродным следом в двух вариантах проекта (плоского борта и оптимизированного борта) на основе [57]. Все уравнения, используемые в расчетах, приведены в Приложении к статье. Потребление энергии и углеродный след рассчитаны по каждому выемочному блоку в границах предельного контура борта карьера с учетом таких параметров, как сорт, масса и расстояние до контрольной точки земной поверхности на 1 т добытой руды. Затем потребленную энергию на добычу 1 т руды переводили в величину углеродного следа с помощью характеристических факторов, включая объемы выбросов 1, 2 и 3 в результате буровых, взрывных, выемочных и откаточных работ [58]. Этот подход применяли в [59] с целью включения параметров жизнеспособности горного предприятия напрямую в блочную модель рудного тела для стратегической оптимизации работы горнодобывающего предприятия. Характеристические факторы брали из [60] с учетом комбинированного способа выработки электроэнергии для территории расположения исследуемого карьера в Чили. Результаты расчетов приводятся в **табл. 7**.

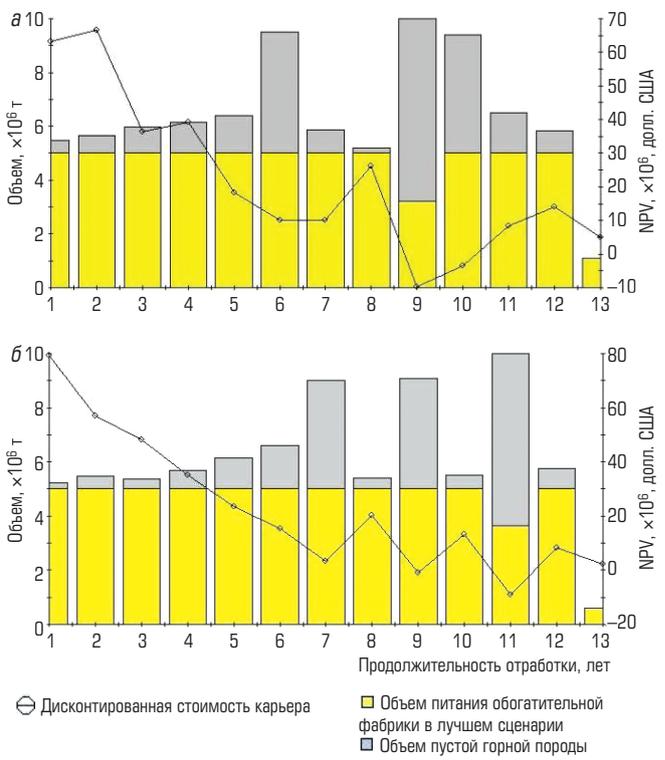


Рис. 16. Объемы выемки руды и пустой породы, а также денежных потоков в зависимости от года отработки: а – традиционный расчет; б – оптимизированный расчет

В результате оптимизации борта карьера достигается сокращение углеродного следа и потребленной энергии на 0,17 млн т CO₂ экв и на 82,5 млн Дж соответственно, в течение всего срока эксплуатации карьера. Величина 0,17 млн т CO₂ экв эквивалентна объему углерода, потребленного 2,8 млн деревьев в течение 10 лет или снижению объема выделения парниковых газов в результате работы 35 ветряных турбин, производящих электроэнергию на протяжении года [61]. И сокращение углеродного следа, и экономия энергии достигаются в результате значительного сокращения объема выемки пустых пород на 15 % при практически одном и том же объеме произведенной руды (см. табл. 6).

5. Выводы

Известно, что крутизна откосов бортов карьеров имеет огромное влияние на объемы вскрышных работ, поэтому ее увеличение позволяет повысить коэффициент вскрыши и общую производительность предприятия и при этом сократить потребление энергии и углеродный след. В настоящее время практика проектирования карьеров основана на использовании плоских бортов, т. е. с постоянным углом откоса или со сглаженным предельным углом откоса на каждом участке карьера. Однако исходя из конечной геометрии любого поперечного сечения карьера профиль борта далек от плоского в связи с необходимостью обустройства уступов, ниш и разрезных траншей, поэтому допущение постоянного

и/или предельного угла откоса является упрощением, которое следует и нужно устранять с целью повышения качества расчета. Естественно, возникает вопрос о применимости бортов нелинейной формы вместо плоских. В технической литературе уже доказана в некоторых случаях более высокая устойчивость бортов карьеров нелинейного профиля по сравнению с плоским профилем борта для откосов с однородными характеристиками $c-\phi$ [8–11]. В программе OptimalSlope [12] возможна оптимизация конфигурации как однородных, так и неоднородных откосов, сложенных любым количеством слоев пород, и для геоматериалов, прочность которых описывается либо критерием Кулона–Мора, либо обобщенным критерием Хоека–Брауна. В данной работе с целью максимизации предельного угла откоса применяли оптимизацию профилей борта в программе OptimalSlope на примере открытого рудника по добыче медной руды. Долгосрочное планирование добычи осуществляли в среде Geovia Whittle сначала с плоскими бортами, а затем с профилями борта, оптимизированными в программе OptimalSlope.

В результате геотехнической оптимизации профиля борта получено повышение чистой приведенной стоимости до 34 % и значительное сокращение углеродного следа и потребления энергии на 0,17 млн т CO₂ экв и 82,5 млн МДж соответственно, вследствие снижения объема выемки вскрышных пород на 15 % по сравнению с традиционным расчетом на основе плоских профилей борта. Устойчивость всех поперечных сечений борта, оптимизированного в среде OptimalSlope, проверяли независимым расчетом с помощью двух широко распространенных в геотехнологии пакетов программ, а именно Rocscience Slide2, при проведении анализа методом предельного равновесия в комбинации с методом Morgenштерна–Прайса и FLAC3D при моделировании методом конечных разностей со снижением сдвиговой прочности. Значения коэффициента устойчивости, полученные с помощью Slide2 и FLAC, хорошо согласуются с результатами OptimalSlope (разница менее 1 %). Кроме того, трехмерный анализ устойчивости конечного борта карьера, выполненный в среде FLAC3D, показал, что результирующий коэффициент устойчивости превышает нормативное значение ($KU = 1,3$ в данном случае). Дополнительно с помощью программы OptimalSlope было осуществлено проектирование двух сценариев открытой отработки золотоносной руды на примере действующего рудника «Кинросс» [64] и хорошо известного рудника «МакЛафлин», блочная модель которого имеется в открытом доступе [65]. В работе [64] в программе OptimalSlope исследовали геологически более сложный случай залегания нескольких слоев пород с разными критериями разрушения Кулона–Мора. Было выполнено моделирование пяти различных секторов карьера при наличии существенного пласта вскрышных пород, оказывающего дополнительную нагрузку на рельеф карьера в верхней части борта, требующую учета в модели. В обоих случаях оптимизация профилей откоса бортов карьеров ведет к значительному, до 52,7 %, повышению NPV и к существенному сокращению потребления энергии и углеродного следа в результате уменьшения

коэффициента вскрыши благодаря геотехнической оптимизации профиля борта.

В данной работе проведено исследование конкретного небольшого рудника по открытой добыче медной руды, залегающей в среднепрочном вмещающем массиве. Предполагается, что в данном случае возможно большее увеличение угла откоса борта карьера, чем в слабых породах. Кроме того, известно, что чем глубже карьер, тем большее влияние оказывает крутизна борта на экономические показатели работы предприятия. Поэтому авторы статьи считают, что в случае карьера увеличенного размера и глубины достигаются повышенные финансовые и экологические показатели. И наконец, независимо от размера открытого рудника, плоский откос является частным случаем криволинейного откоса, получаемым заданием бесконечного радиуса кривизны вдоль всего откоса, поэтому теоретически можно предположить, что плоский профиль борта является квазиоптимальной опцией для многих видов породных и грунтовых массивов, за исключением несвязных грунтов.

Финансирование. Докторская диссертация второго автора статьи финансируется Исследовательским советом по техническим и физическим наукам Великобритании (EPSRC, Счет для финансирования подготовки докторов наук). Пребывание за рубежом первого и второго авторов с целью выполнения исследований финансировалось за счет гранта EU H2020 RISE Hercules (778360). Нельсон Моралес выражает благодарность Центру передовых технологий Чилийского университета за финансовую поддержку в рамках проекта ANID/PIA Basal Project AFB180004.

Конфликт интересов отсутствует.

Доступность данных и материалов. Блочная модель представлена горнодобывающей компанией. Все обращения по поводу модели будут перенаправлены данной компании.

Доступность программного обеспечения. Все входные и выходные данные и файлы программ OptimalSlope, Whittle и Slide2 доступны при обращении к контактному лицу в рамках данной статьи.

Научный вклад авторов. С. Утили – идея и концепция работы, методология, анализ результатов, подготовка, рецензирование и редактирование статьи. А. Агости – получение результатов в среде OptimalSlope и программах-оптимизаторах, методология, анализ результатов, составление графиков и таблиц, рецензирование и редактирование статьи. Н. Моралес – анализ результатов, рецензирование и редактирование статьи.

Таблица 7. Потребление энергии и углеродный след для двух вариантов расчета

	Плоский борт	Оптимизированный борт	Разница между оптимальным и плоским вариантами	Разница между оптимальным и плоскими вариантами, %
Энергия, млн Дж	2,134·10 ⁹	2,052·10 ⁹	-8,25·10 ⁷	-3,90
Углеродный след, CO ₂ экв, млн т	4,46	4,29	-0,17	-3,80

К. Вальдеррама – выполнение аналитических исследований в среде FLAC. Р. Пелл – анализ результатов раздела 4.4. Г. Альборноз – рецензирование и редактирование статьи.

Благодарность. Авторы выражают признательность г-ну А. Руссо (SRK Consulting) за рецензирование раздела 3.1 данной статьи и г-ну С. Чжану за выполнение расчетов экологических показателей (раздел 4.5).

Приложение

В Приложении представлены формулы и уравнения расчета потребления энергии и углеродного следа в периоды ведения буровых, взрывных, погрузочных и откаточных работ в выемочных блоках в границах предельного контура борта карьера.

Расчеты основаны на формулах компании, которая первая предоставила комплексную систему уравнений для расчета энергопотребления и потенциала глобального потепления для компонентов блочной модели. Впервые энергопотребление каждого блока было оценено с учетом оказывающих на него влияние процессов, и затем эти данные были использованы для расчета потенциала глобального потепления. В работе [57] определены три основные стадии потребления энергии, включая процессы добычи полезного ископаемого, обогащения и металлургического передела. В данной статье две последние стадии не рассматривались, так как материал питания обогатительной фабрики и продукт дробления не известны. Кроме того, нет информации о применяемом методе обогащения. Однако исходя из одинакового объема извлекаемой руды как при традиционном, так и при оптимизационном расчете борта карьера (см. табл. 6), нет оснований полагать наличие какой-либо разницы в размерах углеродного следа и энергопотребления между результатами расчетов. Энергопотребление добычных работ E_D представляется суммой четырех параметров [57]:

$$E_D = E_{\text{бур}} + E_{\text{взрыв}} + E_{\text{погруз}} + E_{\text{откат}}$$

где $E_{\text{бур}}$, $E_{\text{взрыв}}$, $E_{\text{погруз}}$, $E_{\text{откат}}$ – количество энергопотребления на буровых, взрывных, погрузочных и откаточных работах (на обогатительную фабрику или в отвал) соответственно.

Энергопотребление бурения рассчитывается согласно [57]

$$E_{\text{бур}} = AE_vLN/(\eta_{\text{бур}}m_6), \text{ МДж/т,}$$

где $A = 116,9 \text{ см}^2$ – площадь буровой скважины; $L = 35 \text{ см}$ – длина заряженной части скважины; E_v – удельная энергия бурения,

которая зависит от типа пород и оценивается на основе единой классификации пород по критерию буримости [62]; $N = 10$ – число буровых свайн в каждом выемочном блоке; $\eta_{\text{бур}}$ – КПД бурового инструмента; m_6 – масса блока, т.

Удельную энергию ВВ при детонации вычисляют по формуле [57]

$$E_{\text{взрыв}} = LFE_{\text{уд.з}} \text{ МДж/т,}$$

где $LF = 6 \text{ кг/т}$ – коэффициент нагрузки, выраженный через количество ВВ на 1 т взрывающей породы; $E_{\text{уд.з}} = 3,81581 \text{ МДж/т}$ – удельная энергия взрыва [57] взрывного вещества ANFO, применяемого в данном исследовании.

Удельная энергия фронтального погрузчика при погрузке раздробленного материала в самосвал представлена в виде

$$E_{\text{погруз}} = P_L T / (\eta_{\text{погруз}} m_{\text{гн}}) \text{ МДж/т,}$$

где $P_L = 0,18 \text{ МВт}$ – мощность фронтального погрузчика CAT 950 GC; $T = 45 \text{ с}$ – среднее время загрузки самосвала фронтальным погрузчиком; $\eta_{\text{погруз}} = 70 \%$ – КПД фронтального погрузчика; $m_{\text{гн}} = 92,2 \text{ т}$ – грузоподъемность самосвала Komatsu HD 785-8 при условии полной загрузки самосвала в каждом рейсе.

Удельная энергия транспортирования 1 т груза от карьера до обогатительной фабрики или отвала рассчитана по формуле [57]

$$E_{\text{откат}} = 9,81S[m_{\text{гн}}i + (R_s + R_i)(2M_{\text{гн}} - m_{\text{гн}})]/m_{\text{гн}} \text{ МДж/т,}$$

где S – расстояние от блока i до обогатительной фабрики или отвала, рассчитанное для каждого блока, км; $i = 10 \%$ – уклон откаточного пути; $R_s = 2 \%$ – сопротивление качению поверхности откаточного пути, принятого согласно [63]; $R_i = 1 \%$ – расчетное внутреннее сопротивление самосвала; $M_{\text{гн}} = 166 \text{ т}$ – общая масса самосвала Komatsu HD 785-8 с грузом;

Для расчета углеродного следа удельное энергопотребление переводили в удельный углеродный след с помощью коэффициентов учета объема выбросов 1, 2 и 3, связанными с разработкой полезных ископаемых уравнением [57]:

$$GWP[t_{\text{CO}_2,eq}/t] = \alpha(E_{\text{бур}} + E_{\text{погруз}} + E_{\text{откат}})/1000 + \beta(E_{\text{бур}} + E_{\text{погруз}} + E_{\text{откат}})/1000 + \delta E_{\text{взрыв}}/1000$$

где α , β , δ – коэффициенты карбонизации для матрицы дизельного топлива и электроэнергии, а также ВВ, взятые из базы данных Экоинвент [60], МДж: $\alpha = 0,09159$, $\beta = 0,5200$, $\delta = 2,270$. И в итоге комплексный выброс углекислого газа вычисляется путем умножения удельного углеродного следа на объем добычи (т), достигнутый в границах предельного контура карьера.

Библиографический список

1. Randolph M. Current Trends in Mining // SME Mining Engineering Handbook. 3rd ed. – Society for Mining Metallurgy and Exploration, 2011. P. 11–19.
2. Hustrulid W., Kutcha M., Martin R. Open pit mine planning and design. 3rd ed. : in two volumes. – Boca Raton : CRC Press, 2013.
3. Brown E. T. Geomechanics: The critical engineering discipline for mass mining // Proceedings of MassMin 2004. – Santiago : Chilean Engineering Institute, 2004.
4. Martin D., Stacey P. Guidelines for Open Pit Slope Design in Weak Rocks. – Leiden : CRC Press/Balkema, 2018. – 416 p.
5. Newman J. Earthwork Slips and Subsidence Upon Public Works: Their Causes, Prevention, and Reparation. – London : E. & F. N. Spon, 1890. – 234 p.
6. Hoek E., Bray J. Rock Slope Engineering. 2nd revised ed. – London : The Institution of Mining and Metallurgy, 1977. – 402 p.
7. Rana M. H., Bullock W. D. The design of open pit mine slopes // Canadian Mining Journal. 1969. P. 58–66.
8. Utill S., Nova R. On the Optimal Profile of a Slope // Soils and Foundations. 2007. Vol. 47. Iss. 4. P. 717–729.
9. Jeldes I. A., Drumm E. C., Yolder D. C. Design of Stable Concave Slopes for Reduced Sediment Delivery // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2015. Vol. 142. Iss. 2. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001211
10. Vahedifard F., Shahrokhbadi S., Leshchinsky D. Optimal profile for concave slopes under static and seismic conditions // Canadian Geotechnical Journal. 2016. Vol. 53. No. 9. P. 1522–1532.

11. Vo T., Russell A. R. Stability charts for curvilinear slopes in unsaturated soils // *Soils and Foundations*. 2017. Vol. 57. Iss. 4. P. 543–556.
12. *Utili S. OptimalSlope: Software for the determination of optimal profiles for slopes and pitwalls* // Registered at the United States Copyright Office, 2016.
13. *Bendsøe M. P., Sigmund O. Topology Optimisation. Theory, Methods, and Applications*. 2nd ed. – Berlin : Springer, 2004. – 339 p.
14. *Fin J., Borges L. A., Fancello E. A. Structural topology optimization under limit analysis* // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2019. Vol. 59. Iss. 4. P. 1355–1370.
15. *Chen W.-F. Limit Analysis and Soil Plasticity. Series: Developments in Geotechnical Engineering*. – Amsterdam : Elsevier, 1975. Vol. 7. – 638 p.
16. *Hoek E. Strength of Rock and Rock Masses* // *ISRM News Journal*. 1994. Vol. 2(2). P. 4–16.
17. *Hoek E., Brown E. T. Practical estimates of rock mass strength* // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1997. Vol. 34. Iss. 8. P. 1165–1186.
18. *Read J., Stacey P. Guidelines for Open Pit Slope Design*. – Collingwood : CSIRO Publishing, 2009. – 487 p.
19. *Hoek E., Brown E. T. The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition* // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019. Vol. 11. Iss. 3. P. 445–463.
20. *Renani H. R., Martin C. D. Slope Stability Analysis using Equivalent Mohr–Coulomb and Hoek–Brown criteria* // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2020. Vol. 53. Iss. 1. P. 13–21.
21. *OptimalSlope: Software for the determination of optimal profiles for slopes and pitwalls. User manual. Version 1*. 2021.
22. *Parra A., Morales N., Vallejos J., Nguyen P. M. V. Open pit mine planning considering geomechanical fundamentals* // *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2017. Vol. 32. Iss. 4. P. 221–238.
23. *Stewart A. F., Hawley P. M., Rose N. D., Gilmore B. W. Mining applications* // *Rock Slope Engineering. Civil and Mining*. 4th ed. – London : Spon Press, 2004. P. 357–376.
24. *Lerches H., Grossmann I. Optimum Design of Open-Pit Mines* // *Transactions – Canadian Institute of Mining and Metallurgy*. 1965. Vol. 58. P. 17–24.
25. *Hochbaum D. S. The Pseudoflow Algorithm: A New Algorithm for the Maximum-Flow Problem* // *Operations Research*. 2008. Vol. 56. No. 4. P. 992–1009.
26. *Khalokakaie R., Dowd P. A., Fowell R. J. Lerchs–Grossmann algorithm with variable slope angles* // *Mining Technology: Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy: Section A*. 2000. Vol. 109. Iss. 2. P. 77–85.
27. *Khalokakaie R., Dowd P. A., Fowell R. J. Incorporation of slope design into optimal open pit design algorithms* // *Mining Technology: Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy: Section A*. 2000. Vol. 109. Iss. 2. P. 70–76.
28. *Rocscience. Slide2*. 2021.
29. *Geovia. Surpac user manual. Geovia Dassault systemes*, 2021.
30. *Geovia. Whittle user manual. 4.7.3 ed. Geovia Dassault systemes*, 2021.
31. *Datamine. Studio OP. 2.8 ed. Datamine*, 2021.
32. *Datamine. Studio NPVS. 1.0.51.0 ed. Datamine*, 2021.
33. *Maptek. Vulcan Open Pit Mine Planning*. 2020.1 ed. Maptek, 2021.
34. *Hexagon. HxGN MinePlan Engineering OP LTP Pro. Hexagon*, 2021.
35. *Hexagon. HxGN MinePlan Project Evaluator. Hexagon*, 2021.
36. *Kliche C. A. Slope Stability* // *SME Mining Engineering Handbook*. 3rd ed. – Society for Mining Metallurgy and Exploration, 2011. P. 495–525.
37. *Lorig L., Read J., Stacey P. Slope design methods* // *Guidelines for Open Pit Slope Design*. – CRC Press, 2009. P. 237–264.
38. *SWedge Overview* / Rocscience, 2021. URL: <https://www.rocscience.com/help/swedge/documentation> (дата обращения: 15.01.2022).
39. *SRK. Frac_Rock: programme for the analysis of discontinuous rock masses*. 2016.
40. *Call R. D. Slope stability* // *SME Mining Engineering Handbook*. 2nd ed. – Littleton : Society for Mining Metallurgy and Exploration, 1992. Vol. 1. P. 881–896.
41. *Ryan T. M., Pryor P. R. Designing Catch Benches and Terramp Slopes* // *Slope Stability in Surface Mining*. – Littleton : Society for Mining Metallurgy Exploration, 2001. P. 27–38.
42. *Alejano L. R., Pons B., Bastante F. G., Alonso E., Stockhausen H. W. Slope geometry design as a means for controlling rockfalls in quarries* // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2007. Vol. 44. Iss. 6. P. 903–921.
43. *RocFall user manual 2002* / Rocscience, 2021. URL: <https://www.rocscience.com/help/rocfall/documentation> (дата обращения: 15.12.2021).
44. *Basson F. R. P. Rigid Body Dynamics for Rock Fall Trajectory Simulation* // *Proceedings of the 46th US Rock Mechanics & Geomechanics Symposium*. – Chicago : American Rock Mechanics Association, 2012. P. 1438–1444.
45. *Bar N., Nicoll S., Pothitos F. Rock fall trajectory field testing, model simulations and considerations for steep slope design in hard rock* // *APSSIM 2016 : Proceedings of the First Asia Pacific Slope Stability in Mining Conference*. – Perth : Australian Centre for Geomechanics, 2016. P. 457–466.
46. *Gibson W. H., de Bruyn I. A., Walker D. J. H. Considerations in the Optimisation of Bench Face Angle and Berm Width Geometries for Open Pit Mines* // *The South African Institute of Mining and Metallurgy International Symposium on Stability of Rock Slopes*. 2006. P. 557–579.
47. *Coetsee S. An overview of bench design for cut slopes with an example of an advanced dataset assessment technique* // *Slope Stability 2020 : Proceedings of the 2020 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*. – Crawley : Australian Centre for Geomechanics, 2020. P. 731–748.
48. *Gao-peng Tang, Lian-heng Zhao, Liang Li, FengYang. Stability charts of slopes under typical conditions developed by upper bound limit analysis* // *Computers and Geotechnics*. 2015. Vol. 65. P. 233–240.
49. *Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition* // *Proceedings of the Fifth North American Rock Mechanics Symposium*. Toronto, 2002. Vol. 1. P. 267–273.
50. *Li A. J., Merifield R. S., Lyamin A. V. Stability charts for rock slopes based on the Hoek–Brown failure criterion* // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2008. Vol. 45. Iss. 5. P. 689–700.
51. *Taylor D. Stability of earth slopes* // *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*. 1937. Vol. 24. P. 197–246.
52. *Taylor D. W. Fundamentals of Soil Mechanics*. – New York : John Wiley and Sons, 1948. – 711 p.
53. *Morgenstern N. R., Price V. E. The analysis of the stability of general slip surfaces* // *Geotechnique*. 1965. Vol. 15. Iss. 1. P. 79–93.
54. *FLAC 3D user manual* / Itasca International Inc., 2021.
55. *Dawson E. M., Roth W. H., Drescher A. Slope stability analysis by strength reduction* // *Géotechnique*. 1999. Vol. 49. Iss. 6. P. 835–840.
56. *Lorig L., Varona P. Practical Slope-Stability Analysis Using Finite-Difference Codes* // *Slope Stability in Surface Mining*. – Littleton : Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2001. P. 115–124.
57. *Muñoz J., Guzmán R. R., Botin J. A. Development of a methodology that integrates environmental and social attributes in the ore resource evaluation and mine planning* // *International Journal of Mining and Mineral Engineering*. 2014. Vol. 5. No. 1. P. 38–58.
58. *Guidance / Greenhouse Gas Protocol*, 2019. URL: <https://ghgprotocol.org/> (дата обращения: 21.03.2021).
59. *Pell R., Tijsseling L, Palmer LW, Glass HJ, Yan X, et al. Environmental optimisation of mine scheduling through life cycle assessment integration* // *Resources, Conservation and Recycling*. 2019. Vol. 142. P. 267–276.
60. *Wernet G., Bauer C., Steubing B., Reinhard J., Moreno-Ruiz E. et al. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology* // *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2016. Vol. 21. Iss. 9. P. 1218–1230.
61. *Greenhouse Gas Equivalencies Calculator* / U.S. Environmental Protection Agency, 2021. URL: <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator> (дата обращения: 21.03.2021).
62. *Isheyskiy V., Sanchidrián J. A. Prospects of Applying MWD Technology for Quality Management of Drilling and Blasting Operations at Mining Enterprises* // *Minerals*. 2020. Vol. 10. Iss. 10. 925. DOI: 10.3390/min10100925
63. *Soofastaei A., Aminossadati S. M., Arefi M. M., Kizil M. S. Development of a multi-layer perceptron artificial neural network model to determine haul trucks energy consumption* // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2016. Vol. 26. P. 285–293.
64. *Agosti A., Utili S., Gregory D., Lapworth A., Samardzic J. et al. Design of an open-pit gold mine by optimal pitwall profiles* // *CIM Journal*. 2021. Vol. 12. Iss. 4. P. 149–168.
65. *Agosti A., Utili S., Valderrama C., Albornoz G. Optimal pitwall profiles to maximise the overall slope angle of open pit mines: the McLaughlin Mine* // *SSIM 2021: Proceedings of the Second International Slope Stability in Mining Conference*. – Perth : Australian Centre for Geomechanics, 2021. P. 69–82. **ПК**

УДК 504:622.2(517)

УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ МОНГОЛИИ*

Д. НЯМДОРЖ¹, канд. техн. наук

Б. ЛАЙЖАНСУРЕН², проф., д-р техн. наук

Н. ДАВААХУУ³, младший научный сотрудник, канд. экон. наук

И. М. ПОТРАВНЫЙ⁴, проф., д-р экон. наук, esoaudit@bk.ru

¹ ПГС «Предприятие Эрдэнэт», Эрдэнэт, Монголия

² Монгольский институт науки и технологий, Улан-Батор, Монголия

³ Улан-Баторский филиал Российского экономического университета им. Г. В. Плеханова, Улан-Батор, Монголия

⁴ Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова, Москва, Россия

Введение

Горные предприятия являются источником воздействия на окружающую среду в части образования отходов, пыли, вследствие ведения взрывных работ и др. [1]. Взрывные работы, проводимые в карьерах горнодобывающих предприятий, оказывают существенное воздействие на окружающую среду, создают негативные экологические эффекты при ведении горных работ [2–4]. Для снижения данного воздействия на окружающую среду используют различные технологии, например пылеподавление. Значительные резервы уменьшения нагрузки на окружающую среду от деятельности горнодобывающих предприятий, в том числе и в части минимизации последствий взрывных работ, могут быть реализованы путем вовлечения ресурсов техногенных месторождений в хозяйственный оборот в качестве новой ресурсной базы производства [5]. В последнее десятилетие для минимизации воздействия взрывных работ на окружающую среду широкое распространение получила технология взрывной облицовки. Очевидно, что проведение взрывных работ при разработке месторождений полезных ископаемых, обеспечение безопасности таких работ и снижение нагрузки на окружающую среду находятся в тесной взаимосвязи [6, 7]. В этих условиях важное значение имеет развитие технологий взрывных работ с учетом экологических факторов в контексте циркулярной экономики [8].

Методы и технологии

С 1950-х годов многие горнодобывающие предприятия, в том числе в Монголии, широко использовали методику создания воздушного пространства при выполнении взрывных работ, разработанную российскими учеными Н. М. Мельниковым и М. Н. Марченко [9]. Данный подход позволяет снизить потребление неводоустойчивых взрывчатых веществ путем создания воздушного зазора в скважине, а также уменьшить радиус разброса кусков породы, снизить уровень шума и вибрации [10, 11].

Обоснован подход к утилизации отходов промышленного производства при проведении взрывных работ в карьерах. Технология предполагает повторное использование отходов для создания пластмассовых опор и воздушного зазора при подготовке взрывных скважин. Реализация данной технологии позволяет предприятию «Эрдэнэт» (Монголия) получать экономическую выгоду и решать множество экологических проблем.

Ключевые слова: горнодобывающее предприятие «Эрдэнэт», взрывные работы, утилизация промышленных отходов, воздушный зазор, пластиковые опоры, проектное управление, опыт Монголии
DOI: 10.17580/gzh.2022.03.05

В последние годы получили развитие исследования и разработки в направлении совершенствования технологий взрывных работ в горном деле [12–14]. Можно отметить использование расширителей в виде веера в России, применение полиэтиленовых воздушных баллонов в Южной Корее, технологии воздушного шара в Австралии [15–17]. В таких странах, как Австралия, Канада, Китай, Республика Корея, США и Япония разработаны методы создания воздушного промежутка во взрывной скважине [18, 19]. Бразилия, Перу, Чили также совершенствуют методы взрывных работ. В последние годы используют воздушные баллоны, опоры и воздушные шары при взрывных работах [20].

Предприятие «Эрдэнэт» в Монголии является одной из ведущих компаний по добыче меди и молибдена. На данном горнодобывающем предприятии в последние годы использовали методику проведения взрывных работ южнокорейского ученого Канг Д. У. из университета DONG-A. На **рис. 1** показано расположение воздушного баллона скважинного заряда. Реализация способа, учитывающего такое расположение воздушного баллона, схематично представлена на **рис. 2**.



Рис. 1. Расположение воздушного баллона скважинного заряда

*Статья подготовлена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 21-18-00500 «Институциональный инжиниринг моногородов Арктической зоны – модернизация и устойчивое развитие».

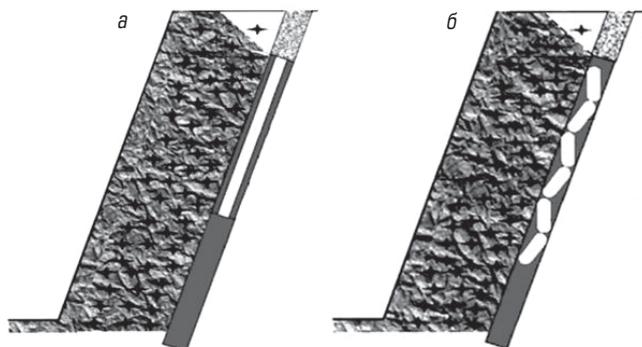


Рис. 2. Сплошное (а) и отдельными частями (б) расположение воздушной трубы



Рис. 3. Измельчитель синтетических отходов

Преимуществами такого технологического решения являются экономия взрывчатых веществ на 35 %, снижение уровня сейсмических волн, повышение эффективности воздействия заряда взрывчатого вещества на горные породы, уменьшение радиуса разлета кусков горной породы при проведении взрывов.

В целом утилизацию промышленных отходов при осуществлении взрывных работ на горных объектах можно рассматривать как составляющую методологии проектного управления [21].

Результаты исследования

На предприятии «Эрдэнэт» ежегодно накапливается около 75 т отходов синтетического происхождения, таких как мешки от аммиачной селитры и сернистого натрия (70 %), другие пластиковые материалы (30 %), которые являются основным сырьем для изготовления опор под воздушный зазор взрывной скважины. Все пластиковые отходы классифицируют, измельчают, промывают в ванне и сушат (рис. 3).



Рис. 4. Устройство для плавки пластиковых отходов

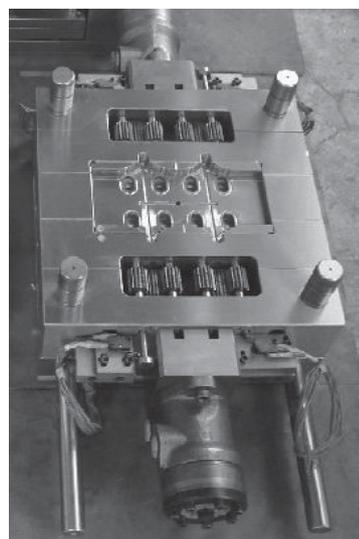


Рис. 5. Стальная форма для воздушной опоры взрывной скважины

Многие горнодобывающие предприятия разрабатывают направления утилизации пластиковых отходов, в частности путем повторного их использования для создания опор, что позволяет снизить нагрузку на окружающую среду. Измельченные и высушенные отходы перемещают в аппарат, где они переплавляются в определенную форму при температуре 180–250 °С (рис. 4).

Переплавленное сырье остужают в стальной форме для получения конечного продукта (рис. 5).

В зависимости от диаметра скважины опору изготавливают диаметром 85–230 мм, толщина шапки 40 мм. Данная опора должна быть выполнена с учетом нагрузки от взрывчатых веществ и забоечных материалов в скважине, а также выдерживать полное возгорание во время взрыва.

Таблица 1. Размеры кусков породы при взрывании сухих скважин в опоре воздушного зазора

Показатель	Характеристика выхода кусков фракций по их крупности							d_{cp} , мм
	0–100	101–200	201–300	301–400	401–500	501–600	> 600	
Выход фракций, мм								
Доля кусков фракций при взрыве, % от их общего количества	46,65	20	15	13,75	4,6	–	–	160



Рис. 6. Монтаж опоры воздушного зазора во взрывной скважине на экспериментальном блоке

Основные показатели опоры для воздушного зазора взрывной скважины

Длина, мм	1700
Размер, мм	70×70
Диаметр круглой шапки опоры, мм	240
Толщина круглой шапки опоры, мм	40
Допустимая нагрузка на опору, Н	$3,5 \cdot 10^3$
Температура возгорания, °C	220
Общая масса, кг	7,5

Данная технология прошла испытания на карьере предприятия «Эрдэнэт» в июне 2015 г. на 65 сухих скважинах глубиной 15 м с перебором 2 м (блок № 55422, горизонт 1370 м). Опору для воздушного зазора расположили в заряженной скважине за три дня до взрыва, проверили способность выдерживать нагрузку от взрывчатого вещества и забоечных материалов. В испытуемом блоке измеряли развал горной массы. После взрыва остатки полиэтиленовых опор не обнаружили, что означает полное их сгорание и утилизацию во время взрыва. При маркшейдерских замерах уровень горизонта отмечен на отм. 1354,5 м. Результаты испытаний показывают эффективность использования опоры для воздушного промежутка во взрывной скважине; кроме

того, удельный расход взрывчатого вещества ($0,38 \text{ кг/м}^3$) снижен на 16,5 % (ранее этот показатель составлял $0,5 \text{ кг/м}^3$). Это означает, что только на одном блоке экономия составила около 4875 кг взрывчатого вещества, обеспечено сокращение затрат в объеме 2600 долл. США.

Пластиковая опора была выполнена длиной в 1,75 м и имела «шапку» диаметром 230 мм, располагалась на дне скважины. Применение данного метода позволяет экономить на одной опоре 75 кг взрывчатых веществ. На рис. 6 показан монтаж опоры воздушного зазора во взрывной скважине на экспериментальном блоке предприятия.

Результаты экспериментальных взрывов с применением опоры для воздушного зазора оценивали по выходу фракций различной крупности и среднему размеру кусков руды (табл. 1).

Определение гранулометрического состава горной массы после взрыва свидетельствует о высокой эффективности применения данного метода. При этом средний размер куска составляет 160 мм, что позволяет эффективно работать экскаватору. В табл. 2 приведены данные по скважинам, пробуренным на глубину более 16 м на карьере предприятия.

За последние 5 лет число сухих скважин составляет 5892 ед., из общего числа 78 % скважин были обводнены, для них используют водостойчивые взрывчатые вещества. Для взрывания остальных сухих скважин (22 %) применяют взрывчатое вещество «Игданит». На предприятии «Эрдэнэт» территория карьера с каждым годом расширяется, глубина горных работ увеличивается, и, соответственно, возрастают объемы добычи руды, буровых и взрывных работ. Число сухих скважин на верхнем уровне карьера составляет 15–20 %. При этом ежегодная потребность во взрывчатом веществе «Игданит» составляет 2000–2500 т. С 16 мая 2016 г. по 1 июня 2017 г. были пробурены 486 сухих скважин в 7 блоках.

Результаты снижения удельных норм расхода взрывчатых веществ и их объемов после внедрения предлагаемого метода приведены в табл. 3.

После внедрения данной технологии снижены удельные нормы расхода взрывчатых веществ на 15,2 %, экономия взрывчатых материалов составила 36675 кг. Реализация данной технологии имеет следующие преимущества: повторное

Таблица 2. Сведения о скважинах, пробуренных в 2013–2017 гг. на руднике предприятия «Эрдэнэт»

Показатель	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	Средний показатель
Общее число скважин, ед.	21515	21839	27034	27144	33235	26153
Число сухих скважин, ед.	3927	6570	7510	6195	5258	5892
Число скважин, % от общего числа пробуренных скважин	18,2	30	27,7	22,8	15,8	22,5

Таблица 3. Снижение удельных норм расхода взрывчатых веществ после внедрения опор для воздушного зазора во взрывной скважине

Дата	Номер блока	Число опор, ед.	Удельная норма расхода взрывчатых веществ, кг/м ³ (по проекту)	Удельная норма расхода взрывчатых веществ, кг/м ³ (фактически)	Экономия взрывчатых веществ, кг
27.05.2016 г.	40408	54	0,45	0,36	4050
03.06.2016 г.	40409	54	0,49	0,36	4050
10.06.2016 г.	45532	80	0,49	0,41	6000
08.07.2016 г.	55452	60	0,51	0,45	4500
16.12.2016 г.	45542	80	0,52	0,43	6000
23.12.2016 г.	30534	60	0,51	0,43	4500
06.01.2017 г.	30536	98	0,57	0,50	7350

использование отходов производства, что позволяет экономить сырьё для создания опоры; снижение влияния на окружающую среду благодаря утилизации отходов и полному их сгоранию во время взрыва; экономическая выгода за счет экономии взрывчатых веществ.

В законе Монголии «Об отходах производства и потребления» (2018 г.) сформулирована необходимость повторного использования и переработки отходов, а также стимулирования деятельности по их переработке, утилизации и внедрению безотходной технологии. Таким образом, предлагаемый подход не только позволяет получать экономическую выгоду, но и решает важные экологические проблемы горнодобывающих предприятий. При использовании разработанной технологии может быть получен следующий экономический эффект:

- количество сэкономленного взрывчатого вещества в год: $Q = NQ_{\text{ВВ}} = 5892 \times 75 = 441900$ кг, где N – число сухих скважин, ед., $Q_{\text{ВВ}}$ – количество сэкономленного взрывчатого вещества в одной скважине, кг;

- экономия затрат на создание опоры для воздушного зазора во взрывной скважине: $Z = NY_{\text{ОП}} = 5892 \times 22050 = 129918,6$ тыс. тугр., где $Y_{\text{ОП}}$ – цена одной опоры, 22050 тугр.;

- экономия взрывчатых веществ: $Z = QC_{\text{ВВ}} = 441,9 \times 1217464 = 537997,3$ тыс. тугр., где $C_{\text{ВВ}}$ – себестоимость 1 т взрывчатых веществ, тугр.;

- чистая прибыль как разница получаемой экономии и затрат: $537997,3 - 129918,6 = 408078,7$ тыс. тугр.

Решением Ведомства по охране интеллектуальной собственности Монголии был выдан патент № 4561 на изобретение

«Опоры для воздушного промежутка во взрывной скважине». Данный продукт позволяет образовать вакуумное пространство на дне скважины, благодаря чему повышается эффективность взрывания горных пород и снижается нагрузка на окружающую среду.

Выводы

1. Установлено, что применение предлагаемой технологии обеспечивает снижение интенсивности сейсмической волны на 10–30 %, сокращение объемов использования взрывчатых веществ в расчете на 1 м³ горной массы на 15,2–16,5 %. Технология экономична, улучшает состояние окружающей среды.

2. Размеры кусков раздробленной руды после взрыва соответствуют технологическим нормам, при этом обеспечивается полная утилизация отходов, что подтверждается маркшейдерскими замерами.

3. Отличительной чертой данного метода от остальных технологий является возможность утилизации синтетических отходов, которые ранее захоранивали на полигоне. Применение данной технологии позволяет осуществить импортозамещение и сократить объемы использования взрывчатых веществ в среднем на 400–450 т в год, а также получить чистую прибыль в размере более 400 млн тугр. в год.

4. Предложенная технология проведения взрывных работ с утилизацией отходов имеет универсальный характер и может быть использована на многих горнодобывающих предприятиях, в том числе при разработке полезных ископаемых в Арктической зоне Российской Федерации.

Библиографический список

1. Mochalova L., Sokolova O., Yurak V. Logistics System of Waste Management at the Mining Enterprises // Journal of Environmental Management and Tourism. 2019. Vol. 10. No. 1(33). P. 202–209.
2. Шевчук Е. Б., Лещинский А. В. Пути снижения вредного воздействия взрывных работ на окружающую среду // ГИАБ. 2005. № 11. С. 190–194.
3. Grachev V., Novoselov A., Novoselova I., Pliamina O. New Methods of Assessing Damage from Environmental Pollution // Journal of Environmental Management and Tourism. 2018. Vol. 9. No. 1(25). P. 105–113.
4. Chmykhalova S. Quality of mineral wealth as a factor affecting the formation of refuse of ore mining and processing enterprises // Problems of Complex Development of Georesources: Proceedings of the VII International Scientific Conference. 2018. E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 56. 04018. DOI: 10.1051/e3sconf/20185604018
5. Даваахуу Н., Потравный И. М., Тишков С. В., Кулаков К. А. Моделирование деятельности горнодобывающего предприятия в условиях истощения ресурсной базы: эколого-экономический аспект // Горный журнал. 2019. № 8. С. 50–54. DOI: 10.17580/gzh.2019.08.09
6. Лайхансурен Б., Нямдорж Д., Жаргалсайхан Х., Тувхуу Л. Изучение рудной массы и буровзрывные работы. – Улан-Батор: Арвай принт, 2009. – 114 с.

7. Нямдорж Д., Лайхансурен Б. Безопасность взрывных работ. – Улан-Батор : Арвай принт, 2020. – 290 с.
8. Мочалова Л. А., Соловова О. Г., Еремеева О. С. Циркулярные бизнес-модели как управленческие инновации в недропользовании // Управленец. 2021. Т. 12. № 3. С. 2–12.
9. Мельников Н. В., Марченко Л. Н. Энергия взрыва и конструкция заряда. – М.: Недра, 1964. – 138 с.
10. Цейтлин Я. И., Смолий Н. И. Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов. – М.: Недра, 1981. – 192 с.
11. Казаков Н. Н. Разрушение и дробление горных пород в карьерах // Взрывное дело. 2018. № 119-76. С. 5–19.
12. Басов В. В., Серг А. Г. Геомеханическое обоснование параметров сопряжений горных выработок с учетом влияния динамического опорного давления // Наукотехнические технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2018. № 4. С. 117–121.
13. Дугартыренов А. В., Рахманов Р. А. Оценка влияния воздушных промежутков на эффективность взрывания скважинных зарядов // Взрывное дело. 2019. № 122-79. С. 59–70.
14. Лещинский А. В., Шевчук Е. Б. Определение рациональных параметров элементов из пенопласта для создания воздушных промежутков скважинных зарядов // Записки Горного института. 2009. Т. 180. С. 155–160.
15. Lu W., Hustrulid W. A Further Study on the Mechanism of Airdecking // *Fragblast: International Journal for Blasting and Fragmentation*. 2003. Vol. 7. No. 4. P. 231–255.
16. Еременко Г. И., Мартынюк М. В. Разработка и применение конструкций скважинных зарядов ВВ с радиальным зором при разрушении горных пород в карьере // Горный вестник. 2012. Т. 1. № 95-1(1). С. 213–219.
17. Комиссаров П. В., Нифадыев В. И., Коваленко В. А., Райымкулов М. А., Басакина С. С. Поперечные эффекты в воздушном промежутке при взрыве сегмента рассредоточенного скважинного заряда // Горение и взрыв. 2018. Т. 11. № 3. С. 130–136.
18. Барон В. Л., Кантор В. Х. Техника и технология взрывных работ в США. – М.: Недра, 1989. – 376 с.
19. Кульминский А. С., Калмыков В. Н., Котик М. В., Петрова О. В. Моделирование и опытно-промышленные испытания взрывной отбойки зарядами с водяным кольцевым зором // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. № 3. С. 225–237.
20. Нифадыев В. И., Коваленко В. А., Райымкулов М. А., Комиссаров П. В., Басакина С. С. Механизм действия воздушного промежутка скважинных зарядов // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2017. Т. 17. № 12. С. 170–174.
21. Потравный И. М., Яшалова Н. Н., Гассий В. В., Чавез Феррейра К. Й. Проектный подход в управлении экологически ориентированным развитием экономики региона // Экономика региона. 2019. Т. 15. № 3. С. 806–821. 

«GORNYI ZHURNAL», 2022, № 3, pp. 38–42
DOI: 10.17580/gzh.2022.03.05

Blasting waste recycling at mines in Mongolia

Information about authors

D. Nyamdorj¹, Candidate of Engineering Sciences

B. Laikhansuren², Professor, Doctor of Engineering Sciences

N. Davaakhuu³, Junior Researcher, Candidate of Economic Sciences

I. M. Potravny⁴, Professor, Doctor of Economic Sciences, ecoaudit@bk.ru

¹Erdenet Mining Corporation, Erdenet, Mongolia

²Mongolian University of Science and Technology, Ulan-Bator, Mongolia

³Ulan-Bator's Branch of the Plekhanov Russian University of Economics, Ulan-Bator, Mongolia

⁴Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia

Abstract

Industrial wastes accumulated at mining enterprises, including synthetic waste, pose a threat to the environment. The article substantiates the approach to the disposal of industrial waste during blasting operations in the quarries of mining enterprises. The essence of the campaign is the reuse of waste for the production of plastic supports and the creation of an air gap during the preparation of blast wells. Such a simple technological solution involves the creation of plastic supports for the formation of an air space in the lower part of the well during blasting operations in quarries by recycling and reusing industrial waste. The air gap in the dry blast well allows you to control the detonation process and change the explosion pulse, which, along with the use of such waste, reduces the negative impact of mining operations on the environment. The testing and application of this technology at Erdenet Mining Corporation in Mongolia for more than 5 years has shown that this approach allows you to manage blasting operations from the point of view of environmental impact, to replace imported air cylinders, and to reduce the use of explosives on average 400–500 tons. Moreover, the company receives a net profit of more than 150 thousand dollars per year. Thus, the recycling of industrial waste during blasting allows a company to receive not only economic benefits, but also solves many environmental problems. The study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 21-18-00500 Institutional Engineering of the Arctic Monotowns—Modernization and Sustainable Development.

Keywords: Erdenet Mining Corporation, blasting, industrial waste disposal, air gap, plastic supports, project management, Mongolia's experience.

References

1. Mochalova L., Sokolova O., Yurak V. Logistics System of Waste Management at the Mining Enterprises. *Journal of Environmental Management and Tourism*. 2019. Vol. 10, No. 1(33). pp. 202–209.
2. Shevkun E. B., Leshchinskiy A. V. Ways to reduce the environmental impact of mining. *GIAB*. 2005. No. 11. pp. 190–194.
3. Grachev V., Novoselov A., Novoselova I., Pliamina O. New Methods of assessing Damage from Environmental Pollution. *Journal of Environmental Management and Tourism*. 2018. Vol. 9, No. 1(25). pp. 105–113.

4. Chmykhalova S. Quality of mineral wealth as a factor affecting the formation of refuse of ore mining and processing enterprises. *Problems of Complex Development of Georesources : Proceedings of VII International Scientific Conference*. 2018. *E3S Web of Conferences*. 2018. Vol. 56. 04018. DOI: 10.1051/e3sconf/20185604018
5. Davaakhuu N., Potravny I. M., Tishkov S. V., Kulakov K. A. Modeling mining company activities under conditions of resource base depletion: Ecological-and-economic aspect. *Gornyi Zhurnal*. 2019. No. 8. pp. 50–54. DOI: 10.17580/gzh.2019.08.09
6. Laikhansuren B., Nyamdorj D., Zhargalsaikhan Kh., Tubbkhuu L. Ore mass analysis and drilling-and-blasting. Ulan-Bator : Arvay print, 2009. 114 p.
7. Nyamdorj D., Laikhansuren B. Safety of blasting. Ulan-Bator : Arvay print, 2020. 290 p.
8. Mochalova L. A., Sokolova O. G., Eremeeva O. S. Circular business models as management innovations in subsoil use. *The Manager*. 2021. Vol. 12, No. 3. pp. 2–12.
9. Melnikov N. V., Marchenko L. N. Energy of explosion and explosive charge design. Moscow : Nedra, 1964. 138 p.
10. Tseytin Ya. I., Smolii N. I. Seismic and shock air waves of industrial blasts. Moscow : Nedra, 1981. 192 p.
11. Kazakov N. N. The destruction and crushing of rocks in open cast mine. *Vzryvnoe delo*. 2018. No. 119/76. pp. 5–19.
12. Basov V. V., Serg A. G. Geomechanical assessment of intersection parameters in underground mines with regard to dynamic abutment pressure. *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispolzovaniya mineralnykh resursov*. 2018. No. 4. pp. 117–121.
13. Dugartyrenov A. V., Rakhmanov R. A. Evaluation of the effect of air gap on the efficiency of blasting borehole charges. *Vzryvnoe delo*. 2019. No. 122/79. pp. 59–70.
14. Leshchinskiy A. V., Shevkun E. B. Rational design of expanded plastic components to arrange air gaps in blasthole charges. *Journal of Mining Institute*. 2009. Vol. 180. pp. 155–160.
15. Lu W., Hustrulid W. A Further Study on the Mechanism of Airdecking. *Fragblast: International Journal for Blasting and Fragmentation*. 2003. Vol. 7, No. 4. pp. 231–255.
16. Eremenko G. I., Martynuk M. V. Design and application of blasthole charges with radial gaps in rock breakage in open pit mines. *Gornyi vestnik*. 2012. Vol. 1, No. 95-1(1). pp. 213–219.
17. Komissarov P. V., Nifadev V. I., Kovalenko V. A., Raiymkulov M. A., Basakina S. S. Transverse effects in air gap of air-decking borehole charge segment exploded. *Gornie i vzryv*. 2018. Vol. 11, No. 3. pp. 130–136.
18. Baron V. L., Kantor V. Kh. Blasting technology and equipment in the USA. Moscow : Nedra, 1989. 376p.
19. Kulminskiy A. S., Kalmykov V. N., Kotik M. V., Petrova O. V. Modeling and experimental testing of explosive burning by charges with a water ring gap. *Izvestiya Tulskego gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2019. No. 3. pp. 225–237.
20. Nifadev V. I., Kovalenko V. A., Raiymkulov M. A., Komissarov P. V., Basakina S. S. On air-deck borehole charge mechanism. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiyskogo Slavyanskogo universiteta*. 2017. Vol. 17, No. 12. pp. 170–174.
21. Potravny I. M., Yashalova N. N., Gassiy V. V., Chavez Ferreyra K. Y. The Project Approach for Managing the Environmentally Oriented Development of the Regional Economy. *Ekonomika regiona*. 2019. Vol. 15, No. 3. pp. 806–821.

УДК 622.44:253.7:62-5

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО СПОСОБА РЕГУЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ШАХТНОГО ВЕНТИЛЯТОРА И ЕГО ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Г. И. ЗАМОЛОДЧИКОВ¹, младший научный сотрудник, канд. техн. наук, g.zamolodchikov@gmail.com

А. С. ФУРАШОВ¹, инженер

Р. З. ТУМАШЕВ², доцент, канд. техн. наук

¹Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н. Е. Жуковского, Жуковский, Россия

²Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Приведена методика определения наиболее экономичного способа регулирования шахтного осевого вентилятора при изменении глубины выработки, а также его оптимальных геометрических параметров. Рассмотрены два наиболее эффективных способа регулирования осевых вентиляторов – поворотом рабочих лопаток и изменением частоты вращения. Характеристики вентилятора определяли одномерным расчетом на средней поверхности тока.

Ключевые слова: осевой вентилятор, поворотные лопатки, вентиляция шахт, регулирование вентилятора, эффективность работы вентилятора

DOI: 10.17580/gzh.2022.03.06

Введение

Современные осевые вентиляторы, в том числе высоконагруженные, имеют высокий КПД лопаточного аппарата на расчетном режиме работы, который может достигать 90 % и более [1, 2]. Однако часто вентилятор должен работать на разных режимах, например, если возникает необходимость изменения расхода воздуха в сети в связи с колебанием внешних условий. Наиболее распространенными способами регулирования характеристики системы являются дросселирование, перепуск рабочего тела в сети и изменение характеристики вентилятора за счет перехода на другую частоту вращения или форму проточной части. При изменении режима меняется течение рабочего тела в межлопаточных каналах вентилятора и, следовательно, параметры потока, определяющие его эффективность, такие как углы атаки, скорость потока и т. д. Далее рассмотрим эффективность разных способов регулирования.

Оценка различных способов регулирования

Изменение расхода и давления нерегулируемого вентилятора при сохранении высокого значения КПД возможно только в пределах его рабочей характеристики, полученной для расчетной частоты вращения рабочего колеса. При этом одному показателю расхода соответствует одно значение давления (рис. 1, а). Достижение потребных рабочих режимов сети с нерегулируемым вентилятором может быть обеспечено дросселированием [3, 4]. Таким образом можно уменьшить расход рабочего тела через сеть и, соответственно, вентилятор, но при этом часть мощности привода затрачивается на преодоление сопротивления в дросселе.

Еще одним эффективным способом регулирования работы вентиляторов является изменение геометрии проточной части путем поворота лопаток лопаточных венцов. В случае одноступенчатых

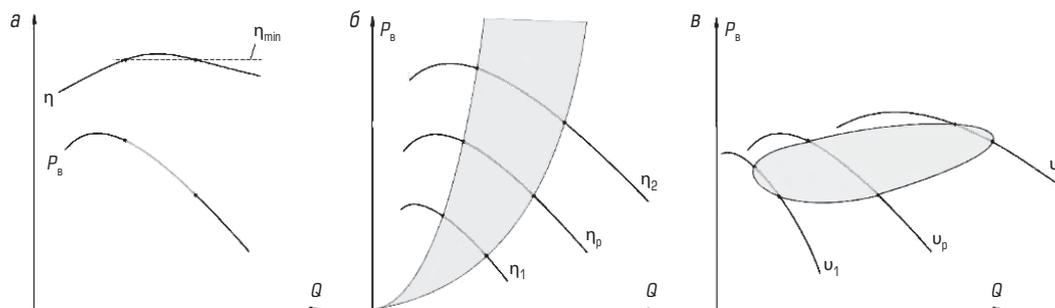


Рис. 1. Области высокоэффективных рабочих режимов вентилятора (выделены серым цветом):

а – без регулирования; б – при регулировании изменением частоты вращения; в – при регулировании поворотом лопаток рабочего колеса; η_{\min} – минимально допустимая величина КПД; η_1 , η_2 – характеристики вентиляторов, регулируемые частотой вращения «вниз» и «вверх» соответственно; η_p – исходная характеристика вентилятора, регулируемого частотой вращения; η_1 , η_2 – характеристики вентиляторов, регулируемые углом поворота лопаток РК «вниз» и «вверх» соответственно; η_p – исходная характеристика вентилятора, регулируемого углом поворота лопаток РК; P_b – полное давление вентилятора

вентиляторов можно применять регулирование поворотом лопаток входного направляющего аппарата (ВНА), рабочего колеса (РК) или совместно ВНА + РК. Характеристика вентилятора при повороте лопаток смещается относительно начального положения. Таким образом рабочие режимы с высоким КПД образуют область в координатах P, Q (см. рис. 1, в).

Регулирование поворотом лопаток РК оказывает более сильное влияние на характеристику, чем ВНА, и обеспечивает лучшую экономичность в широком диапазоне изменения расхода [5]. Конструктивно регулируемое РК сложнее, чем регулируемый ВНА, так как механизм поворота рабочих лопаток располагается в ограниченном пространстве втулки и вращается вместе с рабочим колесом, в то время как механизм поворота лопаток ВНА, как правило, размещен снаружи, на корпусе вентилятора. Для поворота рабочих лопаток в процессе работы вентилятора в основном используют электромеханические, гидравлические и термодравлические приводы, все они существенно увеличивают массу, стоимость и вероятность отказа конструкции [6]. Тем не менее в связи с потребностями в глубокорегулируемых вентиляторах с высокой эффективностью работы новые конструкции механизмов поворота рабочих лопаток продолжают разрабатывать [7, 8].

В работах [9–12] выполнены исследования регулируемых вентиляторов. Эксперименты показали, что выход из срывного режима с помощью поворота рабочих лопаток проходит значительно плавнее и при меньших изгибающих напряжениях на лопатках, чем при регулировании изменением частоты вращения.

Выбор способа регулирования определяется рабочими режимами, которые необходимо реализовать на данном вентиляторе, и конструктивными ограничениями. В промышленных системах вентиляции возникает необходимость изменения расхода воздуха в неизменной сети. В таких условиях наиболее эффективным способом регулирования является изменение частоты вращения рабочего колеса.

На практике часто встречаются системы, в которых коэффициент сопротивления сети изменяется. При добыче руды рабочее место перемещается, и длина доставки воздуха к нему постоянно меняется [13, 14], т. е. при постоянном расходе воздуха изменяются коэффициент сопротивления и перепад давления в сети. Для обеспечения необходимого расхода воздуха часто заменяют вентиляторы на более высоконапорные по мере увеличения длины выработки. Так как обслуживать несколько вентиляторов на каждом участке нецелесообразно, иногда устанавливают наиболее мощный из линейки и искусственно увеличивают сопротивление сети на начальных этапах работы, когда длина выработки еще мала, с расчетом выйти на полную гидравлическую мощность вентилятора к концу работы на данном участке [15]. Такой подход позволяет экономить на обслуживании парка вентиляторных установок и их замене, но увеличивает энергетические затраты, поскольку часть энергии уходит на преодоление искусственного сопротивления. Применение вентиляторов, регулируемых изменением частоты вращения или с помощью поворотных рабочих лопаток, позволяет вывести из эксплуатации часть вентиляторных установок и достичь существенной экономии суммарной установленной мощности [16, 17].

На стадии проектирования нового вентилятора, как правило, известны параметры его рабочих режимов ($P_{в1}, Q_1, P_{в2}, Q_2 \dots$). В том случае, если эти режимы вносят одинаковый или близкий вклад в энергетические затраты системы, важно создать такой вентилятор, который будет не только обеспечивать заданные параметры, но и сохранит высокий КПД на всех рабочих режимах. Традиционный процесс проектирования вентилятора заключается в определении его геометрических параметров и частоты вращения, обеспечивающих работу на расчетном режиме ($P_{вр}, Q_p$) с высокой эффективностью; на других рабочих режимах КПД, как правило, снижается по сравнению с расчетным. Выбор расчетного режима при проектировании вентилятора с учетом возможности реализации всех заданных рабочих режимов с максимальной эффективностью является сложной задачей. Один из подходов к выбору расчетного режима состоит в том, чтобы нанести режимы с минимальным и максимальным расходом рабочего тела на график с осями P, Q и соединить линией. Координаты точки, разбивающей эту линию на отрезки, относящиеся друг к другу как 2:3, находящейся ближе к началу координат, принимают в качестве расчетных параметров [5]. Отношение 2:3 объясняется особенностью характеристик осевых одноступенчатых вентиляторов, регулируемых поворотом рабочих лопаток: при изменении режима относительно расчетного в направлении увеличения расхода КПД снижается медленнее, чем при изменении в направлении уменьшения расхода. При таком подходе есть вероятность, что часть режимов не реализуется или реализуется с низким КПД.

Решение таких задач требует большого опыта в проектировании вентиляторов и допускает выполнение нескольких итераций для достижения хороших результатов.

Целью работы являлась разработка метода определения наиболее экономичного способа регулирования шахтного осевого вентилятора при изменении глубины выработки, а также установление его оптимальных геометрических параметров, обеспечивающих максимальный средний КПД на всех рабочих режимах.

Метод исследований

Метод включает в себя разработанную математическую модель и алгоритм оптимизации. Математическая модель осевого вентилятора описывает рабочие режимы вентилятора, состоящего из ВНА, РК и спрямляющего аппарата СА с цилиндрической проточной частью, постоянной циркуляцией скорости по радиусу и постоянной осевой составляющей скорости. Закон профилирования с постоянной циркуляцией скорости по радиусу является наиболее распространенным в осевых вентиляторах и позволяет при определенных условиях применять результаты расчета элементарной ступени на среднем радиусе ко всему вентилятору. Схема вентилятора ВНА + РК + СА является наиболее общим случаем осевого вентилятора, поэтому из данной математической модели можно получить математические модели для других схем вентиляторов: ВНА + РК, РК + СА, РК.

Рассмотрены два варианта математических моделей регулирования вентиляторов: поворотом рабочих лопаток и изменением частоты вращения ротора. Это позволит осуществить выбор

наиболее эффективного способа регулирования вентилятора для конкретного задания на стадии проектирования. Исходными данными для создания математической модели являлись геометрические параметры лопаточных венцов вентилятора на среднем радиусе и параметры рабочего режима P_B, Q (рис. 2). Результатом расчета являлся КПД вентилятора на заданном режиме, который определяли по потерям давления в элементарной ступени на среднем радиусе. Геометрические параметры вентилятора в математической модели описывали размерами проточной части: относительным диаметром втулки v , диаметром вентилятора D , геометрией решеток ВНА, РК и СА; на среднем радиусе: прогибом средней линии профиля рабочего колеса f , густотой решетки τ , углом установки лопаток РК u . Режим работы задавали полным давлением вентилятора P_B , объемным расходом воздуха Q и частотой вращения n . В математической модели вентилятора, регулируемого поворотом рабочих лопаток, угол u_k определяли в процессе расчета таким образом, чтобы вентилятор обеспечил заданные давление и расход, а в случае вентилятора с переменной частотой вращения аналогично определяли частоту вращения n . Безразмерные значения хорды и толщины профилей оказывают слабое влияние на потери давления при дозвуковом, турбулентном течении [18], поэтому их влияние на КПД в математической модели не учитывали, и они не были подвергнуты оптимизации.

По описанной математической модели была разработана программа на языке Matlab. В процессе расчета параметров вентилятора задают первое приближение КПД, которое в дальнейшем будут уточнять. Выражение для определения коэффициента теоретического напора может быть записано следующим образом:

$$\bar{H}_T = \bar{r}_{cp} (\bar{C}_{2u} - \bar{C}_{1u}) = P_B / (\rho U^2 \eta), \quad (1)$$

где \bar{C}_{2u} – относительная величина окружной составляющей скорости за РК, \bar{C}_{1u} – относительная величина окружной составляющей скорости перед РК, ρ – плотность воздуха, U – окружная скорость РК, η – КПД вентилятора.

После преобразования уравнение (1) можно записать в следующем виде:

$$\frac{Q \bar{r}_{cp}}{FU} \left(\frac{1}{\cot \beta_1} - \frac{1}{\cot \beta_2} \right) = \frac{P_B}{\rho U^2 \eta}, \quad (2)$$

где \bar{r}_{cp} – относительный средний радиус проточной части; $F = \pi D^2 (1-v)/4$ – площадь проточной части, где D – диаметр РК, v – относительный диаметр втулки; $U = \pi D n / 60$ – окружная скорость венцов лопаток, где n – частота вращения РК; β_1, β_2 – углы потока перед и за РК в относительном движении, определенные с помощью метода дискретных вихрей с эмпирическим учетом вязкости [19].

Численное решение уравнения (2) позволяет получить угол установки лопаток РК u_{pk} в случае регулирования поворотом лопаток или окружную скорость в случае регулирования изменением частоты вращения, при которых реализуются параметры вентилятора P_B и Q .

Затем вычисляют приведенные потери в рабочем колесе и в спрямляющем аппарате в одномерной постановке. Потери полного давления в лопаточном венце отнесены к решетке на среднем

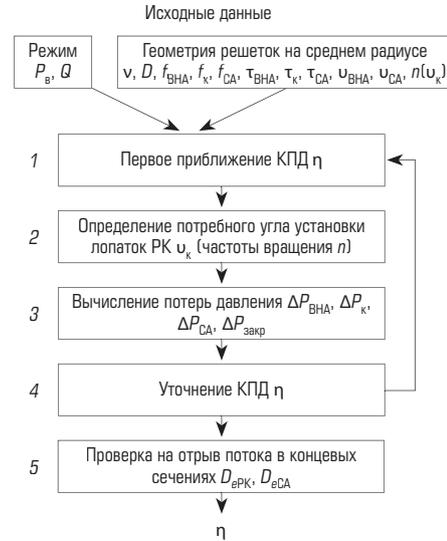


Рис. 2. Блок-схема математической модели осевого вентилятора по схеме ВНА + РК + СА, регулируемого поворотом лопаток или изменением частоты вращения

радиусе, и учитывают не только профильные потери, но и потери в концевых областях лопаточных венцов. Такой подход обеспечивает хорошее совпадение результатов с экспериментом для вентиляторов с изменяемым углом установки рабочих лопаток при большом относительном диаметре втулки $v \geq 0,5$ [20, 21].

Потери давления в РК включают в себя:

- профильные потери

$$C_{x_{проф}} = C_{x_{проф, мин}} f \left(\frac{i - i_{опт}}{\Delta \beta_{опт}}, 2\theta \right), \quad (3)$$

где i – угол атаки; $i_{опт} = 2,5(\tau_k - 1)$ – оптимальный угол атаки; $C_{x_{проф, мин}} = 0,012 + 0,048f_k + 0,0023\tau_k$ – коэффициент профильных потерь в решетке при оптимальном угле атаки; $\Delta \beta_{опт}$ – поворот потока в решетке при оптимальном угле атаки, θ – кри-

визна средней линии профиля; $f \left(\frac{i - i_{опт}}{\Delta \beta_{опт}}, 2\theta \right)$ – эмпирическая

зависимость [5];

- потери в концевых областях

$$C_{x_{тр}} = C_{x_{проф}} \sin u_k \frac{\bar{b}_k}{\tau_k (1-v)}; \quad (4)$$

- вторичные потери

$$C_{x_{вт}} = 0,018 \tau_k C_g^2, \quad (5)$$

где $C_g = 2(C_{2u} - C_{1u}) / W_b \tau_k$ – коэффициент подъемной силы профиля в решетке; u_k – угол установки лопаток РК, $\bar{b}_k = b_k / D$ – длина хорды профиля РК b_k , отнесенная к диаметру РК D ; τ_k – густота решетки РК;

$$W_b = \frac{\bar{C}_a}{\sin \left[\text{actg} \left(\frac{\text{ctg} \beta_1 + \text{ctg} \beta_2}{2} \right) \right]} -$$

коэффициент средней относительной скорости в решетке, где \bar{C}_g – коэффициент расхода;

- потери в радиальном зазоре

$$C_{x_{\text{рад}}} = \frac{0,8\bar{s}\tau_k C_g^2}{\sin\beta_2}, \quad (6)$$

где $\bar{s} = s/l$ – относительный радиальный зазор; s – радиальный зазор; l – длина лопатки.

Суммарные приведенные потери в РК вычисляют по формуле

$$\Delta\bar{P}_K = \tau_k W_b^3 (C_{x_{\text{проф}}} + C_{x_{\text{тр}}} + C_{x_{\text{вт}}} + C_{x_{\text{рад}}}) / (2\bar{C}_g), \quad (7)$$

где $\Delta P_K = \Delta P_{K'} \rho U^2$ – приведенные абсолютные потери полного давления в РК $\Delta P_{K'}$.

Аналогично вычисляют потери на среднем радиусе ВНА и СА:

$$\Delta\bar{P}_{CA} = \tau_{CA} W_b^3 (C_{x_{\text{проф}}} + C_{x_{\text{тр}}} + C_{x_{\text{вт}}}) / (2\bar{C}_g); \quad (8)$$

$$\Delta\bar{P}_{ВНА} = \tau_{ВНА} W_b^3 (C_{x_{\text{проф}}} + C_{x_{\text{тр}}} + C_{x_{\text{вт}}}) / (2\bar{C}_g);$$

Так как рассматривается общий случай и возможна остаточная закрутка за спрямляющим аппаратом ступени, также вычисляют коэффициент потерь, связанных с динамическим давлением закрученного потока на выходе из вентилятора [22]:

$$\Delta\bar{P}_{\text{закр}} = \bar{r}_{\text{ср}}^2 C_{3u}^2 \ln(v)/(v^2 - 1), \quad (9)$$

где C_{3u} – относительная величина окружной составляющей скорости за СА.

Значение КПД вентилятора определяют по формуле

$$\eta = (\bar{H}_T - \Delta\bar{P}_{ВНА} - \Delta\bar{P}_K - \Delta\bar{P}_{CA} - \Delta\bar{P}_{\text{закр}}) / \bar{H}_T. \quad (10)$$

После этого расчет повторяют с уточненным КПД вентилятора. Далее выполняют проверку на отрыв потока в концевых сечениях рабочего колеса и спрямляющего аппарата. Для этого рассчитывают степень диффузорности D_e во втулочном и периферийном сечениях в РК и СА:

$$D_{ePK} = \frac{\sin(\beta_2)}{\sin(\beta_1)} \left[1,12 + 0,61 \frac{\sin(\beta_1)^2}{\tau} [\text{ctg}(\beta_1) - \text{ctg}(\beta_2)] \right], \quad (11)$$

$$D_{eCA} = \frac{\sin(\alpha_3)}{\sin(\alpha_2)} \left[1,12 + 0,61 \frac{\sin(\alpha_2)^2}{\tau} [\text{ctg}(\alpha_2) - \text{ctg}(\alpha_3)] \right]. \quad (12)$$

Полученные значения D_e в спрямляющем аппарате не должны превышать 2 [23]. Степень диффузорности в концевых сечениях рабочего колеса сравнивают со значениями из эмпирических зависимостей $D_{e_{\text{пред}}} = f(\beta_1)$, учитывающих трехмерное течение в концевых областях рабочего колеса [24].

Приведенная выше математическая модель содержит большое число независимых параметров, а наличие нескольких рабочих режимов может приводить к возникновению локальных экстремумов, поэтому оптимизацию выполняли генетическим алгоритмом (ГА). Генетический алгоритм – это эвристический алгоритм поиска, используемый для решения задач оптимизации и моделирования путем случайного подбора, комбинирования и вариации искомого параметров с использованием механизмов, аналогичных естественному отбору в природе [25]. В отличие от большинства математических алгоритмов оптимизации, ГА позволяет искать глобальный оптимум, не останавливаясь на местном экстремуме [26].

Поиск оптимума выполняли в программном комплексе Matlab. Критерием оптимизации являлось среднее

арифметическое значение КПД для всех заданных режимов P_B и Q . При этом «вес» всех режимов был одинаковым, но возможно изменение «весов» рабочих режимов с учетом вклада каждого в энергетические затраты конечного изделия в процессе эксплуатации. На первом шаге оптимизации создают набор из 20 случайных комбинаций варьируемых параметров (начальная популяция). Затем для каждой комбинации параметров вычисляют значение КПД вентилятора (функция приспособленности) и осуществляют отбор. Комбинации параметров с более высоким КПД имеют большие шансы быть отобранными. В результате применения алгоритмов скрещивания и мутации к отобранным комбинациям получаем новый набор комбинаций параметров (популяция). Итерационное повторение алгоритма продолжают до тех пор, пока не будет установлен глобальный максимум целевой функции, т. е. среднее значение КПД для различных режимов работы вентилятора [27].

Полученные результаты и их обсуждение

В качестве примера рассмотрим задачу оптимизации параметров вентиляторов, работающих на двух режимах. Режимы были выбраны из экспериментальных данных работы [28] таким образом, чтобы вентилятор с числом рабочих лопаток $z_k = 12$ имел КПД $\eta = 85\%$, и они максимально отличались по коэффициенту расхода между собой. Для вентилятора с диаметром $D = 0,7$ м и частотой вращения $n = 1000$ мин⁻¹ параметры выбранных режимов составили: $P_{B1} = 346$ Па; $Q_1 = 2,74$ м³/с; $P_{B2} = 467$ Па; $Q_2 = 5,15$ м³/с. Как видно, расход воздуха, а следовательно и коэффициент расхода, изменяются почти в 2 раза с сохранением высокого КПД вентилятора ($\eta = 85\%$) при постоянной частоте вращения и регулировании поворотом лопаток РК.

Оптимизируемые параметры варьировали в следующих диапазонах: $0,5 < v < 0,65$; $800 < n < 1200$; $0,02 < f_{PK}$; $f_{CA} < 0,1$; $0,5 < \tau_K$; $\tau_{CA} < 2$; $10^\circ < \alpha_{CA} < 80^\circ$. В данном расчете не изменяли диаметр вентилятора $D = 0,7$, относительную толщину профилей и удлинение лопаток. В результате оптимизации были получены следующие параметры вентилятора, регулируемого поворотом рабочих лопаток: $v = 0,65$; $n = 1200$; $f_{PK} = 0,052$; $f_{CA} = 0,09$; $\tau_{PK} = 0,545$; $\tau_{CA} = 1,02$; $\alpha_{CA} = 78^\circ$; угол α_K составил $26,7^\circ$ для первого режима и $45,7^\circ$ для второго. Оптимальный диаметр втулки v и частота вращения n оказались максимально возможными. Это привело к снижению коэффициенту напора и увеличенному коэффициенту расхода. Это, в свою очередь, обусловило то, что густота решетки РК оказалась близка к минимальному ограничению.

Аналогичная оптимизация была выполнена для вентилятора, регулируемого изменением частоты вращения. В результате оптимизации были получены следующие параметры: $v = 0,65$; $f_{PK} = 0,052$; $f_{CA} = 0,0987$; $\tau_{PK} = 0,55$; $\tau_{CA} = 0,923$; $\alpha_{PK} = 33,6^\circ$; $\alpha_{CA} = 75^\circ$; частота вращения составила 1040 мин⁻¹ на первом режиме и 1464 мин⁻¹ на втором. Как видно, геометрические параметры рабочего колеса, полученные для разных способов регулирования, практически не отличаются друг от друга.

По закону постоянной циркуляции были спроектированы два вентилятора с параметрами, полученными в результате

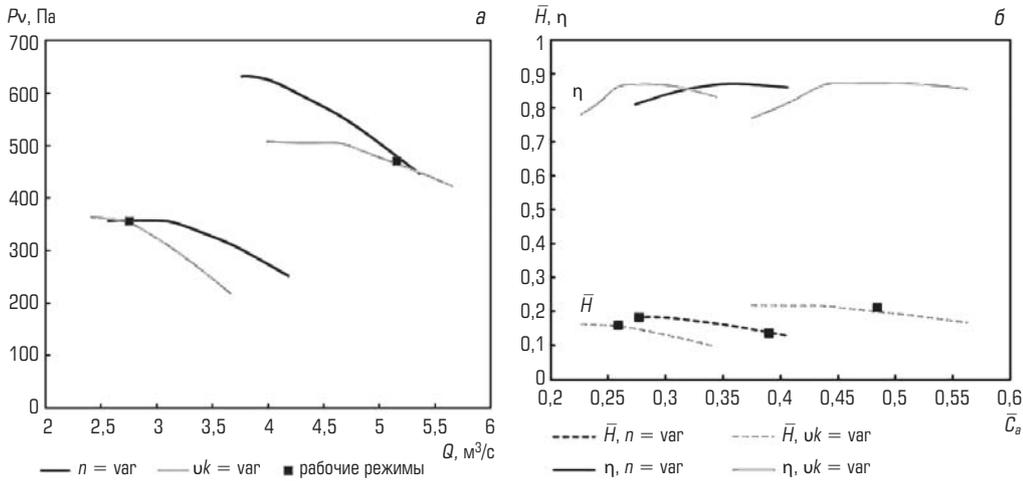


Рис. 3. Характеристики осевых вентиляторов по схеме РК + СА при различных способах регулирования в координатах: $P_v - Q$ (а) и $\bar{H} - \bar{C}_g$ (б)

оптимизации для разных способов регулирования. Данные вентиляторы были исследованы методом численного моделирования на заданных режимах ($P_{в1} = 346$ Па; $Q_1 = 2,74$ м³/с; $P_{в2} = 467$ Па; $Q_2 = 5,15$ м³/с) и в их окрестностях. Характеристики вентиляторов, регулируемых различными способами, полученные расчетным методом [29, 30], изображены на рис. 3. Вентилятор, регулируемый поворотом рабочих лопаток, имел КПД на заданных режимах 86 и 87 %, а регулируемый изменением частоты вращения – 82 и 86 %.

Вентилятор, регулируемый поворотом рабочих лопаток, имеет более высокую эффективность на заданных режимах, чем вентилятор, регулируемый изменением частоты вращения. Это объясняется тем, что рабочие режимы почти в 2 раза отличаются по расходу и примерно в 1,5 раза по давлению, не совпадают с оптимальным изменением параметров сети, меняющихся по параболической зависимости $P_b = kQ^2$ при регулировании вентиляторов изменением частоты вращения.

Выводы

Разработанный метод позволяет выбрать наиболее экономичный способ регулирования вентилятора, работающего на нескольких заданных рабочих режимах, а также определить его

оптимальные геометрические параметры. Программа основывается на расчете потока элементарной ступени вентилятора на средней поверхности тока вентилятора, выполненного по схеме ВНА + РК + СА с постоянной циркуляцией скорости по радиусу и неизменной осевой составляющей скорости потока по длине проточной части.

В качестве примера были определены оптимальные параметры вентиляторов для двух заданных расчетных режимов: $P_{в1} = 346$ Па; $Q_1 = 2,74$ м³/с; $P_{в2} = 467$ Па; $Q_2 = 5,15$ м³/с. Геометрические параметры вентиляторов определяли на среднем радиусе для двух способов регулирования: поворотом рабочих лопаток и изменением частоты вращения.

На основе полученных геометрических параметров на среднем радиусе по закону постоянной циркуляции по радиусу были спроектированы вентиляторы, которые были исследованы методом численного моделирования с использованием программы CFX. Показано, что если расход воздуха на рабочих режимах отличается существенно, а давление – нет, то целесообразно регулировать вентилятор поворотом рабочих лопаток. Вентилятор, регулируемый поворотом рабочих лопаток, имел КПД на заданных рабочих режимах 85 %, оптимизированный – 86 и 87 %, а регулируемый изменением частоты вращения – 82 и 86 %.

Библиографический список

1. Sirový M., Peroutka Z., Byrtus M., Michalík J. Medium-Voltage Drive Fan Save: Energy Efficient Fan Systems in Power Engineering Part 2: Variable Pitch Flow Control versus Variable Speed Flow Control // Proceedings IECON 2013 – 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – Vienna, 2013. P. 2093–2098.
2. Bonanni T., Corsini A., Delibra G., Volponi D., Sheard A. G. et al. Design of a Single Stage Variable Pitch Axial Fan // Proceedings of the Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. – Charlotte, 2017. Vol. 1. DOI: 10.1115/GT2017-64517
3. Матвеев Ю. В. Улучшение энергоэффективности вентиляционных установок, работающих в сложных условиях эксплуатации // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2021. № 23-1. С. 73–76.
4. Костин В. И., Должиков В. Н. Регулирование насосов и вентиляторов в системах инженерного обеспечения зданий и сооружений // Известия вузов. Строительство. 2019. № 9(729). С. 52–59.
5. Брусиловский И. В. Аэродинамика и акустика осевых вентиляторов : тр. Центрального аэрогидродинамического института им. проф. Н. Е. Жуковского. – М. : Изд-во ЦАГИ, 2004. Вып. 2650. – 275 с.
6. Таузер В. М. Сравнительная оценка надежности механизмов регулирования шахтных осевых вентиляторов // Известия вузов. Горный журнал. 2011. № 3. С. 30–38.
7. Giberti H., Prato L., Resta F. Design of an Actuation System for a Variable Pitch Axial Fan // Proceedings of the 4th International Multi-Conference on Engineering and Technological Innovation: IMETI 2011. – Orlando, 2011.
8. Кузнецов С. В. Механизм поворота лопаток шахтного осевого вентилятора на основе термогидропривода // Технические науки – от теории к практике. 2013. № 17-1. С. 120–125.
9. Sheard A. G., Tortora C., Corsini A., Bianchi S. The role of variable pitch in motion blades and variable rotational speed in an industrial fan stall // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. 2014. Vol. 228. Iss. 3. P. 272–284.
10. Bianchi S. A., Corsini A. A., Sheard A. G. B. Stall Control and Recovery in a Low-Speed Axial Fan Through the Use of Variable Pitch in Motion Blades // ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition. – Copenhagen, 2012. Vol. 3. P. 705–716.
11. Bianchi S. A., Corsini A. A., Mazzucco L. A., Monteleone L. A., Sheard A. G. Stall Inception, Evolution and Control in a Low Speed Axial Fan With Variable Pitch in Motion //

- Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2012. Vol. 134. Iss. 4. 042602. DOI: 10.1115/1.4004726
12. Xuemin Ye, Fuwei Fan, Ruixing Zhang, Chunxi Li. Prediction of Performance of a Variable-Pitch Axial Fan with Forward-Skewed Blades // *Energies*. 2019. Vol. 12. Iss. 12. 2353. DOI: 10.3390/en12122353
 13. Дзидзигури А. А. Работа шахтных вентиляторов в сложных сетях. – Тбилиси : Изд-во АН Грузинской ССР, 1958. – 165 с.
 14. Неежмаков С. В., Ткаченко А. Е., Немов Г. Ю. Натурная модель вентиляционной сети шахты для реализации системы автоматизированного управления технологическим процессом проветривания шахты // *Информатика и кибернетика*. 2021. № 1-2(23-24). С. 45–52.
 15. Алыменко Н. И., Алыменко Д. Н., Трапезников И. И., Ковалев А. В. Требования к современным осевым вентиляторам местного проветривания // *ГИАБ*. 2003. № 10. С. 168–170.
 16. Smith L. H., Arthur D. C. Mine ventilation: Waste heat recovery // *CIM Bulletin*. 1996. Vol. 89. No. 998. P. 126–130.
 17. Il-Hak Song, Jong-Ho Lee, Jae-Weon Jeong. Energy efficiency and economic analysis of variable frequency drive and variable pitch system: A case study of axial fan in hospital // *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 43. 103213. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.103213
 18. Брусиловский И. В. Аэродинамика осевых вентиляторов. – М. : Машиностроение, 1984. – 240 с.
 19. Белоцерковский С. М., Ништ М. И. Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью. – М. : Наука, 1978. – 351 с.
 20. Брусиловский И. В. Аэродинамический расчет осевых вентиляторов. – М. : Машиностроение, 1986. – 288 с.
 21. Дожик С. А. Исследования по аэродинамике осевого дозвукового компрессора : тр. Центрального аэрогидродинамического института им. проф. Н. Е. Жуковского. – М. : Изд-во ЦАГИ, 1968. Вып. 1099. – 281 с.
 22. Брусиловский И. В. О динамическом давлении осевого вентилятора, определенном по тангенциальной скорости потока // *Промышленная аэродинамика : сб. ст. – М. : Машиностроение, 1975. № 32. С. 149–157.*
 23. Lieblein S. Loss and Stall Analysis of Compressor Cascades // *Journal of Basic Engineering*. 1959. Vol. 81. No. 3. P. 387–400.
 24. Брусиловский И. В. Определение предельных расчетных параметров осевых вентиляторов // *Промышленная аэродинамика*. 1975. № 32. С. 125–148.
 25. Holland J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. – Cambridge : A Bradford Book, 1992. – 232 p.
 26. Вороновский Г. К., Махотило К. В., Петрашев С. Н., Сергеев С. А. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности. – Харьков : Основа, 1997. – 112 с.
 27. Ke Yang, Shuiqing Zhou, Yinjie Hu, Huaxin Zhou, Weiya Jin. Energy Efficiency Optimization Design of a Forward-Swept Axial Flow Fan for Heat Pump // *Frontiers in Energy Research*. 2021. Vol. 9. 700365. DOI: 10.3389/fenrg.2021.700365
 28. Замолодчиков Г. И., Тумашев П. З., Щезелев Н. Л., Фурашов А. С., Семилет Н. А. Повышение эффективности промышленных вентиляторов при работе на нерасчетных режимах // *Безопасность в техносфере*. 2018. Т. 7. № 3. С. 43–51.
 29. Замолодчиков Г. И., Тумашев П. З. Повышение эффективности вентилятора на различных рабочих режимах путем изменения формы лопатки направляющего аппарата // *Машиностроение и компьютерные технологии*. 2017. № 1. С. 20–36.
 30. Комаров О. В., Седунин В. А., Блинов В. Л., Серков С. А. Верификация задачи численного моделирования течения воздуха в осевой компрессорной ступени // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия «Машиностроение»*. 2016. № 1(106). С. 54–67. [PDF](#)

«GORNYY ZHURNAL», 2022, № 3, pp. 43–49
 DOI: 10.17580/gzh.2022.03.06

Optimal adjustment of mine fan geometry and operation

Information about authors

G. I. Zamolodchikov¹, Junior Researcher, Candidate of Engineering Sciences, gleb.zamolodchikov@gmail.com

A. S. Furashov¹, Engineer

R. Z. Tumashev², Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences

¹Zhukovsky Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovskiy, Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Abstract

Mine fans consume significant electrical power, so it is important to ensure high efficiency of their operation. The aim of this study is to develop a method to determine the most economically efficient method to adjust axial fan geometry and operation at the maximum average efficiency in all operating modes. The method includes a developed mathematical model of the single-stage axial fan duty and a genetic algorithm for optimizing the fan parameters. The initial data for the mathematical model were the geometry of the fan blades of the average radius and the parameters of the fan operating mode. The result of the calculation was the fan efficiency in a preset operating mode. Two adjustment scenarios are modeled: fans with variable pitch blades and fans with variable rotation speed. The fan efficiency was determined by calculating the total pressure loss at the unit stage at the middle radius with regard to the loss at the blade tips. Since the mathematical model contains a large number of independent parameters, and there exists the possibility of local extrema, the optimization is performed using the genetic algorithm. The mathematical model of the fan with variable pitch blades was tested using experimental data. The error of the mathematical model in continuous modes at high efficiency (>75%) never exceeds 1.5%. As a case-study, the optimal fan parameters are determined for two preset operating modes and for two adjustment scenarios of fans with variable pitch blades and with variable rotation speed. On the basis of the obtained geometric parameters at the average radius of blades, using the constant circulation law, the fan designs were developed and then investigated by numerical simulation in CFX program. It is shown that if the air flow rate in operating modes differs significantly and the pressure is not, it is advisable to use fans with variable pitch blades.

Keywords: axial fan, variable pitch blade, mine ventilation, fan adjustment, fan efficiency.

References

1. Sirovy M., Peroutka Z., Byrtus M., Michalik J. Medium-Voltage Drive Fan Save: Energy Efficient Fan Systems in Power Engineering Part 2: Variable Pitch Flow Control versus Variable Speed Flow

Control. Proceedings IECON 2013—The 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Vienna, 2013. pp. 2093–2098.

2. Bonanni T., Corsini A., Delibra G., Volponi D., Sheard A. G. et al. Design of a Single Stage Variable Pitch Axial Fan. *Proceedings of the Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. Charlotte, 2017. Vol. 1. DOI: 10.1115/GT2017-64517
3. Matveev Yu. V. Improving energy efficiency ventilation systems operating in difficult operating conditions. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2021. No. 23-1. pp. 73–76.
4. Kostin V. I., Dolzhiikov V. N. Regulation of pumps and fans in engineering systems of buildings and structures. *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo*. 2019. No. 9(729). pp. 52–59.
5. Brusilovskiy I. V. *Aerodynamics and acoustics of axial fans : Transactions of the Zhukovsky Central Aerohydrodynamic Institute*. Moscow : Izdatelstvo TsAGI, 2004. Vol. 2650. 275 p.
6. Tauger V. M. Comparative assessment of adjustment reliability of axial mine fans. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2011. No. 3. pp. 30–38.
7. Giberti H., Prato L., Resta F. Design of an Actuation System for a Variable Pitch Axial Fan. *Proceedings of the 4th International Multi-Conference on Engineering and Technological Innovation: IMETI 2011*. Orlando, 2011.
8. Kuznetsov S. V. Turning mechanism blades mine axial fan based thermohydrdrive. *Tekhnicheskije nauki – ot teorii k praktike*. 2013. No. 17-1. pp. 120–125.
9. Sheard A. G., Tortora C., Corsini A., Bianchi S. The role of variable pitch in motion blades and variable rotational speed in an industrial fan stall. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 2014. Vol. 228, Iss. 3. pp. 272–284.
10. Bianchi S. A., Corsini A. A., Sheard A. G. B. Stall Control and Recovery in a Low-Speed Axial Fan Through the Use of Variable Pitch in Motion Blades. *ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition*. Copenhagen, 2012. Vol. 3. pp. 705–716.
11. Bianchi S. A., Corsini A. A., Mazzucco L. A., Monteleone L. A., Sheard A. G. Stall Inception, Evolution and Control in a Low Speed Axial Fan with Variable Pitch in Motion. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2012. Vol. 134, Iss. 4. 042602. DOI: 10.1115/1.4004726
12. Xuemin Ye, Fuwei Fan, Ruixing Zhang, Chunxi Li. Prediction of Performance of a Variable-Pitch Axial Fan with Forward-Skewed Blades. *Energies*. 2019. Vol. 12, Iss. 12. 2353. DOI: 10.3390/en12122353
13. Dzidzigiuri A. A. Operation of mine fans in complex networks. Tbilisi : Izdatelstvo AN Gruzinskoy SSR, 1958. 165 p.
14. Neezhmakov S. V., Tkachenko A. E., Nemov G. Yu. Full-scale model of the mine ventilation network for the implementation of the automated control system for the technological process of mine ventilation. *Informatika i kibernetika*. 2021. No. 1-2(23-24). pp. 45–52.
15. Alymenko N. I., Alymenko D. N., Trapeznikov I. I., Kovalev A. V. Standards of modern axial fans of local ventilation. *GIAB*. 2003. No. 10. pp. 168–170.
16. Smith L. H., Arthur D. C. Mine ventilation: Waste heat recovery. *CIM Bulletin*. 1996. Vol. 89, No. 998. pp. 126–130.

17. Il-Hak Song, Jong-Ho Lhee, Jae-Weon Jeong. Energy efficiency and economic analysis of variable frequency drive and variable pitch system: A case study of axial fan in hospital. *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 43. 103213. DOI: 10.1016/j.jobte.2021.103213
18. Brusilovskiy I. V. Aerodynamics of axial fans. Moscow : Mashinostroenie, 1984. 240 p.
19. Belotserkovskiy S. M., Nisht M. I. Detached and nondetached flow of perfect fluid around thin wings. Moscow : Nauka, 1978. 351 p.
20. Brusilovskiy I. V. Aerodynamic design of axial fans. Moscow : Mashinostroenie, 1986. 288 p.
21. Dovzhik S. A. *Aerodynamic studies of axial subsonic compressor : Transactions of the Zhukovsky Central Aerohydrodynamic Institute*. Moscow : Izdatelstvo TsAGI, 1968. Vol. 1099. 281 p.
22. Brusilovskiy I. V. Axial fan impact pressure found from tangential flow velocity. *Industrial Aerodynamics : Collected Works*. Moscow : Mashinostroenie, 1975. No. 32. pp. 149–157.
23. Lieblein S. Loss and Stall Analysis of Compressor Cascades. *Journal of Basic Engineering*. 1959. Vol. 81, No. 3. pp. 387–400.
24. Brusilovskiy I. V. Limit design parameters of axial fans. *Promyshlennaya aerodinamika*. 1975. No. 32. pp. 125–148.
25. Holland J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. Cambridge : A Bradford Book, 1992. 232 p.
26. Voronovskiy G. K., Makhotilo K. V., Petrashev S. N., Sergeev S. A. Genetic algorithms, artificial neural networks and virtual reality problems. Kharkov : Osнова, 1997. 112 p.
27. Ke Yang, Shuiqing Zhou, Yinjie Hu, Huaxin Zhou, Weiya Jin. Energy Efficiency Optimization Design of a Forward-Swept Axial Flow Fan for Heat Pump. *Frontiers in Energy Research*. 2021. Vol. 9. 700365. DOI: 10.3389/fenrg.2021.700365
28. Zamolodchikov G. I., Tumashev R. Z., Shchegolev N. L., Furashov A. S., Semilet N. A. Efficiency improvement of industrial fans if operating at off-design modes. *Bezopasnost v tekhnosfere*. 2018. Vol. 7, No. 3. pp. 43–51.
29. Zamolodchikov G. I., Tumashev R. Z. Fan efficiency improvement via changing guide blade shape under various operating conditions. *Mashinostroenie i kompyuternye tekhnologii*. 2017. No. 1. pp. 20–36.
30. Komarov O. V., Sedunin V. A., Blinov V. L., Serkov S. A. Verification of numerical simulation of air flow in axial compressor stage. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Baubana. Seriya Mashinostroenie*. 2016. No. 1(106). pp. 54–67.

УДК 622.24

БУРОВОЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ БУРЕНИЯ СКВАЖИН В МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

И. Г. МАРТЮЧЕНКО, проф., д-р техн. наук
М. И. ЗЕНИН, ассистент, Zenin-1995@mail.ru
А. Ю. КОЛЕСНИКОВ, доцент, канд. техн. наук
С. В. ИВАНОВ, доцент, канд. техн. наук

Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина, Саратов, Россия

Приведены результаты выполненных теоретических исследований по созданию нового бурового инструмента с винтовым рабочим органом. Показано, что использование такого инструмента весьма эффективно для бурения скважин в мерзлых породах при разрабoтке месторождений в Арктической зоне.

Ключевые слова: буровой инструмент, винтовой рабочий орган, мерзлый грунт, бурение, тяговое усилие, разрушение
DOI: 10.17580/gzh.2022.03.07

Введение

Добыча полезных ископаемых имеет важнейшее народно-хозяйственное значение [1]. Более 80 % всех промышленных запасов полезных ископаемых сосредоточено в северных регионах России, в том числе подавляющая часть никеля и платиноидов (треть мировых запасов), кобальта (15 % мировых запасов), все российские месторождения алмазов, около 80 % нефти и почти весь объем добываемого газа, 90 % олова, а также золото, слюда, апатит и многие другие виды сырья. Перспективы разведки и добычи полезных ископаемых в Арктической зоне обусловлены необходимостью пополнения запасов и развития экономического потенциала страны [2–4].

Ввиду суровых природно-климатических условий возникает множество проблем при проведении разведочных работ в Арктической зоне России [5]. Мерзлые грунты обладают высокой прочностью. Это приводит к большим энергозатратам при осуществлении процесса бурения. Также для мерзлых грунтов характерна высокая абразивность. При этом происходит быстрый износ рабочей поверхности бурового инструмента. Помимо этого, мерзлый грунт представляет собой сложную неоднородную среду,

в которой встречаются талые породы. При взаимодействии бурового инструмента с мерзлым грунтом происходит хрупкое разрушение породы за счет физико-механических свойств грунта. Однако этот же инструмент при контакте с пластичными грунтами теряет свою работоспособность из-за невозможности реализации деформационного процесса.

Целью работы является обоснование эффективности процесса разрушения грунта предлагаемым буровым инструментом. Показано результирующее разрушающее воздействие на мерзлый грунт посредством реализации деформации отрыва. Определены геометрические параметры бурового инструмента, которые влияют на результаты бурения.

Теоретические аспекты исследований

Бурение массива горных пород осуществляют в процессе как открытого, так и подземного способа разработки полезных ископаемых [6–13].

Рассмотрим более подробно открытый способ горных работ. Контакт рабочей поверхности бурового инструмента с грунтом

приводит к разрушению породы. При этом каждый буровой инструмент реализует соответствующий ему характер деформаций [14, 15].

На сегодня наиболее распространенным и часто используемым буровым инструментом является долото режущего типа. В процессе бурения происходит деформация массива за счет резания грунта. Такой вид деформации является энергоемким, характер деформации мерзлого грунта соответствует среднему значению относительного показателя, равного 7 [15]. Также из-за постоянного контакта рабочей поверхности с грунтом происходит износ бурового инструмента, что приводит к уменьшению размеров скважины.

Для разведочных работ используют шарошечное долото. При взаимодействии с грунтом рабочая поверхность шарошки выполняет перекатывания, что соответствует деформации грунта по типу сжатия (показатель 3). Такой характер разрушения является менее энергоемким по сравнению с лопастными долотами. Однако при контакте с пластичными грунтами отсутствует хрупкое разрушение, происходят налипание грунта на рабочую поверхность и блокирование рабочего процесса.

Также в процессе разведочных работ используют комбинированное режуще-шарошечное долото. Такой буровой инструмент эффективнее, так как осуществляет два типа деформации грунта. При взаимодействии с твердыми мерзлыми грунтами работает шарошечная часть и осуществляет деформацию грунта дроблением: при взаимодействии рабочего органа с пластичными тальми грунтами в процесс бурения включаются лопасти и осуществляют деформацию породы резанием. Помимо достоинств, такой буровой инструмент имеет и недостатки, обусловленные работой сначала с тальми грунтами, а затем с мерзлыми. Возникает это из-за того, что талый грунт налипает на рабочую поверхность шарошечной части, после попадания в мерзлые грунты происходит замерзание породы, и рабочий инструмент теряет свою эффективность.

Совершенствование горных работ чрезвычайно важно для нашей страны, так как Россия входит в число ведущих мировых держав по запасам и объемам добычи полезных ископаемых [16, 17].

На сегодняшний день известны буровые инструменты, реализующие принцип деформации грунта сдвигом и отрывом (показатель 1,7) [14] на базе винтовых буровых инструментов. Такой процесс бурения является менее энергоемким по сравнению с другими. Каждый подобный буровой инструмент состоит из сердечника с размещенной на нем винтовой лопастью сложной геометрии. К таковым относится винтовой рабочий орган для разработки мерзлых грунтов (пат. 1078004 СССР) [18]. Особенностью данного инструмента является увеличенный шаг винтовой лопасти. В процессе бурения реализуется деформация грунта сдвигом.

Подобный характер деформации грунта при бурении реализует винтовой рабочий орган, описанный в полезной модели № 49844 [19]. Помимо увеличенного шага, такой буровой инструмент имеет увеличенный радиус винтовой лопасти, что при взаимодействии с грунтом приводит к отрыву породы.

Похожий принцип разрушения грунта, но более эффективный осуществляет винтовой рабочий орган, представленный на **рис. 1**. Данный буровой инструмент состоит из сердечника конической формы, на котором размещена непрерывная винтовая лопасть, состоящая из конического тягового и цилиндрического разрушающего участков. Буровой инструмент также имеет увеличенные шаг и радиус винтовой лопасти. При этом на разрушающей части угол наклона верхней и нижней поверхностей увеличен, что способствует большей эффективности при отрыве грунта в процессе бурения.

Методика исследований

Рассмотрим более подробно процесс образования скважины при работе винтового рабочего органа (см. рис. 1). Разрушающую часть можно условно разделить на два участка. Первый имеет увеличенный радиус и предназначен для отрыва массива грунта, а второй обладает увеличенным шагом и предназначен для окончательного формирования ствола скважины.

Первый участок начинается в конце тяговой части при максимальном значении радиуса тяговой лопасти. В сечении винтовая лопасть имеет форму треугольника с углом наклона образующей верхней поверхности α_1 и углом наклона образующей нижней поверхности δ_1 . За счет увеличенного радиуса и углов α_1 и δ_1 винтовая лопасть внедряется в грунт и создает расклинивающее усилие, что приводит к образованию трещины в грунте и дальнейшему отрыву породы.

Второй участок начинается в месте максимального значения радиуса винтовой лопасти на первом участке при работе разрушающей части винтового рабочего органа. За счет увеличенных радиуса, шага и углов α_2 и δ_2 происходит процесс окончательного формирования ствола скважины деформацией сдвига грунта. Этот участок необходим для того, чтобы формировалось расстояние h_2 для эффективной работы разрушающего органа на первом участке.

При работе винтовой лопастью на первом участке создаются усилия, которые воздействуют на грунт. При этом на поверхности винтовой лопасти создается результирующее усилие. Таким образом, результирующее расклинивающее усилие складывается из двух усилий, возникающих на верхней и нижней поверхностях винтовой лопасти, которые необходимы для отрыва грунта:

$$P_{1y} = P_1 \cos \alpha_1 + P_2 \cos \delta_1, \quad (1)$$

где P_1 – составляющая сила, возникающая на верхней поверхности, кН; P_2 – усилие, возникающее на нижней поверхности, кН.

Каждое усилие представляет собой силу воздействия на грунт. Ее величина зависит от приращения и угла поворота, за который произойдет приращение винтовой лопасти. Тогда выражение для усилия будет иметь вид

- для верхней поверхности:

$$P_1 = \int_{r_{\text{гр}}}^{r_1} \int_0^{\psi} dP_1 = \int_{r_{\text{гр}}}^{r_1} \int_0^{\psi} \sigma_{\text{сж}} dS_1 = \int_{r_{\text{гр}}}^{r_1} \int_0^{\psi} \frac{p_0(\Delta)^{\mu} dr r d\psi}{\cos(\varphi_1)}; \quad (2)$$

- для нижней поверхности:

$$P_2 = \int_{r_{\text{гр}}}^{r_1} \int_0^{\psi} dP_2 = \int_{r_{\text{гр}}}^{r_1} \int_0^{\psi} \sigma_{\text{сж}} dS_2 = \int_{r_{\text{гр}}}^{r_1} \int_0^{\psi} \frac{p_0(\Delta)^{\mu} dr r d\psi}{\cos(\varphi_2)}; \quad (3)$$

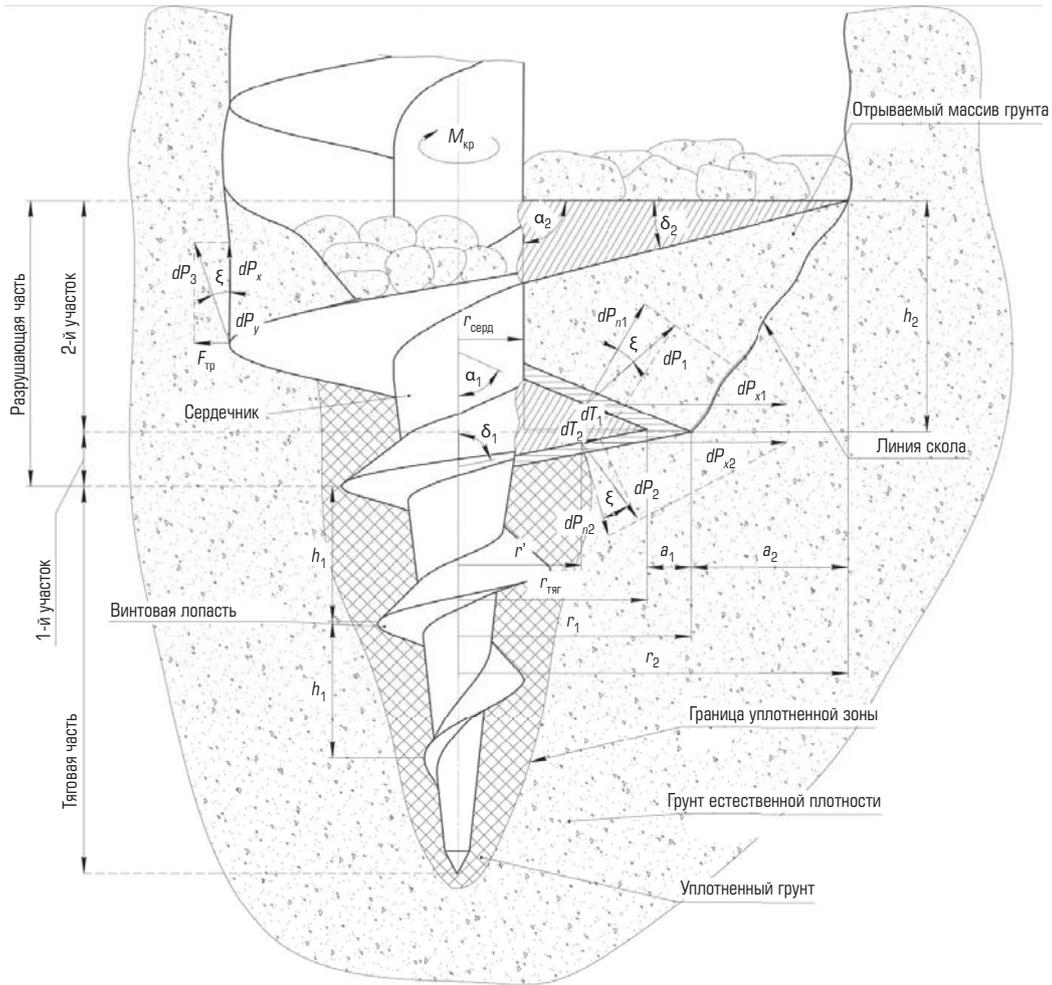


Рис. 1. Схема взаимодействия винтового рабочего органа с грунтом:

$M_{кр}$ – крутящий момент при работе бурового инструмента; dP_3 – элементарное усилие воздействия на грунт верхней поверхностью винтовой лопасти на втором участке; dP_{x1} – вертикальная составляющая элементарного усилия воздействия на грунт верхней поверхности винтовой лопасти на втором участке; dP_y – элементарные усилия воздействия на грунт верхней поверхности винтовой лопасти на втором участке; $F_{тр}$ – сила трения при взаимодействии винтовой лопасти второго участка с грунтом; $r_{серд}$ – радиус сердечника бурового инструмента; r_2 – радиус винтовой лопасти на втором участке; dP_{n1} , dP_{n2} – элементарное усилие воздействия на грунт верхней и нижней поверхностью винтовой лопасти на первом участке соответственно; dP_{x1} , dP_{x2} – горизонтальные составляющие элементарных усилий воздействия на грунт верхней и нижней поверхностей винтовой лопасти на первом участке соответственно; h_1 – шаг винтовой линии на первом участке; h_2 – шаг винтовой линии на втором участке; dT_1 , dT_2 – сила трения при взаимодействии верхней и нижней поверхности винтовой лопасти первого участка с грунтом соответственно; α_2 – угол наклона образующей верхней поверхности винтовой лопасти к оси вращения на втором участке; δ_2 – угол наклона образующей нижней поверхности винтовой лопасти к оси вращения на втором участке; a_1 , a_2 – относительное приращение радиуса винтовой лопасти на первом и втором участках соответственно

где r_1 – цилиндрическая координата точки приложения элементарного усилия при взаимодействии с грунтом винтовой лопасти после первого приращения; $r_{тяг}$ – цилиндрическая координата точки приложения элементарного усилия при взаимодействии с грунтом винтовой лопасти в конце тяговой части; ψ – угол поворота винтового бура, соответствующий числу витков заданной разрушающей части винтовой лопасти; dP_1 , dP_2 – элементарное усилие воздействия на грунт верхней и нижней поверхностью винтовой лопасти на первом участке соответственно; $\sigma_{сж}$ – напряжение

сжатия грунта; dS_1 , dS_2 – площадь элементарной площадки верхней и нижней поверхности винтовой лопасти соответственно; p_0 – параметр, характеризующий сопротивление грунта вдавливанию [20]; Δ – относительное приращение винтовой лопасти; μ – параметр, характеризующий возрастание сопротивления грунта смятию с увеличением деформации [20]; dr – ширина элементарной площадки dS ; r – цилиндрическая координата точки приложения элементарного усилия при взаимодействии с грунтом винтовой лопасти разрушающей части; $d\psi$ – угол, ограничивающий

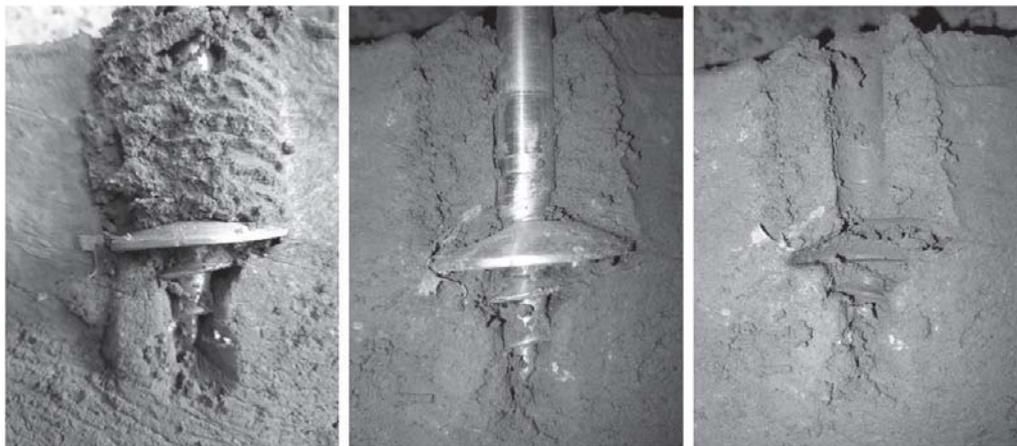


Рис. 2. Разведочный эксперимент по взаимодействию винтового рабочего органа с грунтом

элементарную площадку dS ; φ_1, φ_2 – текущее значение угла наклона линии наибольшего ската верхней и нижней поверхности винтовой лопасти соответственно.

С учетом зависимостей (2) и (3) и действия силы трения формула для определения результирующего усилия будет иметь вид

$$P_{1y} = \int_{r_{\text{тр}}}^{r_1} \int_0^{\psi} \frac{\rho_0(\Delta)^{\mu} \cos(\alpha_1)}{\cos(\varphi_1) \cos(\xi)} dr r d\psi + \int_{r_{\text{тр}}}^{r_1} \int_0^{\psi} \frac{\rho_0(\Delta)^{\mu} \cos(\delta_1)}{\cos(\varphi_2) \cos(\xi)} dr r d\psi, \quad (4)$$

где α_1 – угол наклона образующей верхней поверхности винтовой лопасти к оси вращения на первом участке; ξ – угол трения грунта о буровой инструмент; δ_1 – угол наклона образующей нижней поверхности винтовой лопасти к оси вращения на первом участке.

Эффективность процесса бурения скважины методом отрыва грунта винтовой лопастью зависит от усилия (4), реализующего отрыв грунта. Рациональное значение результирующей силы будет определяться взаимным влиянием следующих параметров: угла поворота винтовой лопасти ψ , при котором происходит увеличение радиуса лопасти; приращения радиуса винтовой лопасти Δ на первом участке и угла наклона образующей верхней поверхности винтовой лопасти к оси вращения α_1 . Угол поворота винтовой лопасти ψ , при котором происходит увеличение радиуса лопасти, влияет на скорость внедрения лопасти в грунт и, соответственно, на эффективность действия расклинивающей силы. Приращение радиуса винтовой лопасти Δ на первом участке определяет глубину погружения лопасти, при которой происходит отрыв грунта. Угол наклона образующей верхней поверхности винтовой лопасти к оси вращения α_1 оказывает воздействие на значение результирующего усилия P_{1y} и на объем отрываемого грунта.

Обсуждение результатов

Целью экспериментов являлось доказательство выдвинутой гипотезы о физических процессах разрушения грунта при

образовании ствола скважины винтовым рабочим органом с изменяемой геометрией. Эксперименты проводили в лабораторных условиях на суглинистых грунтах влажностью 10–12 %. Завинчивание осуществляли в разъемные формы с грунтом. После выполнения эксперимента форму разъединяли на две части для изучения процесса взаимодействия винтового бура с грунтом. Для экспериментов использовали винтовой рабочий орган с тяговой и разрушающей частями, выполненными с переменным радиусом (от r – радиус на тяговой части до $r_1 = 1,7r$).

При завинчивании винтовой рабочий орган погружается в грунт под действием крутящего момента и тяговой способности тяговой части. Вокруг тяговой части наблюдается уплотненное ядро грунта. При этом разрушающая часть осуществляет хрупкое разрушение грунта за счет отрыва и сдвига породы. Такой процесс разрушения наглядно прослеживается на **рис. 2**.

Проведенные разведочные эксперименты подтвердили правомерность выдвинутой гипотезы о влиянии геометрических параметров на эффективность работы буровым инструментом.

Рациональное сочетание геометрических параметров – угла поворота винтовой лопасти ψ при увеличении радиуса лопасти, приращения винтовой лопасти Δ на первом участке и угла наклона образующей верхней поверхности винтовой лопасти к оси вращения α_1 – позволит выявить эффективное значение силы воздействия на грунт и сократить энергоемкость процесса отрыва грунта на первом участке.

Выводы

Установлено, что предлагаемый буровой инструмент осуществляет процесс бурения за счет реализации деформации отрыва и сдвига грунта. Такой характер деформации грунта является менее энергоемким и наиболее эффективным по сравнению с другими существующими способами бурения.

Библиографический список

1. Салихов В. А., Марченко В. А. Разведка и разработка полезных ископаемых : учеб. пособие. – М. – Берлин : Директ-Медиа, 2017. – 159 с.
2. Ларичкин Ф. Д., Фадеев А. М., Череповицын А. Е. Проблемы изучения и освоения минерально-сырьевых ресурсов арктического региона // Арктика: экология и экономика. 2012. № 1(5). С. 8–15.
3. Kulkova M. S., Zemtsovsky A. V. Optimizing parameters of stopes and pillars for the Zhdanov deposit mining // Eurasian Mining. 2019. No. 1. P. 13–15. DOI: 10.17580/em.2019.01.03
4. Федотов П. К., Сенченко А. Е., Федотов К. В., Бурдонов А. Е. Исследование обогатимости полиметаллической руды месторождения Забайкальского края // Обогащение руд. 2019. № 3. С. 3–9. DOI: 10.17580/or.2019.03.01

5. Яковлев В. Л., Яковлев В. А. Особенности методологического подхода к оценке минерально-сырьевого потенциала регионов Арктической зоны // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2018. Т. 24. № 2. С. 49–57.
6. Ломоносов Г. Г. Производственные процессы подземной разработки рудных месторождений. – 2-е изд. – М.: Горная книга, 2013. – 517 с.
7. Kuntala Lahiri-Dutt. Between the Plough and the Pick: Informal, artisanal and small-scale mining in the contemporary world. – Acton: ANU Press, 2018. – 374 p.
8. Jakubec J., Woodward R., Boggis B., Clark L., Lewis P. Underground diamond mining at Ekati and Diavik diamond mines // Proceedings of the 11th International Kimberlite Conference. – Gaborone, 2017. Vol. 11. DOI: <https://doi.org/10.29173/ikc4009>
9. Мартышов Л. Н., Сенина Э. Э. Основные технологии уральской промышленности: учеб. пособие. – Екатеринбург, 2017. – 156 с.
10. Yongqi Ma, Jin Yang, Pengtian Feng, Can Zhang. The Challenges and Key Technology of Drilling Safety in the Area of the Arctic // Proceedings of the International Field Exploration and Development Conference 2018. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. – Singapore: Springer, 2018. P. 522–532.
11. Northcote B. Exploration and mining in the South Central Region, British Columbia // Provincial Overview of Exploration and Mining in British Columbia, 2017: Information Circular 2018-1. – Victoria: Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources, 2017. P. 105–119.
12. Ческидов В. И., Бобыльский А. С., Резник А. В. Проблемы и перспективы открытой добычи твердых полезных ископаемых на месторождениях Сибири // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2016. № 3. С. 70–76.
13. Янкевский А. В., Кулибали Мусса. Комплекс мероприятий по повышению эффективности добычи золотосодержащих руд // Интернет-журнал «Науковедение». 2017. Т. 9. № 6. 86EВN617.
14. Мартюченко И. Г. Винтовые рабочие органы машин для разработки мерзлых грунтов. Сер.: Научная мысль. – М.: Инфа-М, 2014. – 200 с.
15. Федоров Б. В. Бурение скважин: учебник. – Алматы: КазНУТУ, 2002. – 284 с.
16. Рудаков В. В. Необходимость совершенствования технологии добычи драгоценных металлов и общей организации развития горной промышленности // ГИАБ. 2011. № 7. С. 294–301.
17. Шеховцов В. С., Власкин Ю. К. Перспективные способы разработки месторождений: учеб. пособие. – Новокузнецк: СибГИУ, 2004. – 257 с.
18. Пат. 1078004 СССР. Винтовой рабочий орган для разработки мерзлого грунта / Г. Е. Макашев, П. Г. Ташлыков, А. Б. Солодовников; заявл. 09.07.1982; опубл. 07.03.1984, Бюл. № 9.
19. Пат. 49844 РФ. Винтовой бур для проходки скважин в прочных и мерзлых грунтах / И. Г. Мартюченко, Р. В. Южаков, В. В. Борисов; заявл. 29.06.2005; опубл. 10.12.2005.
20. Цытович Н. А. Механика мерзлых грунтов: общая и прикладная: учеб. пособие. – М.: URSS, 2013. – 448 с. **ТЖ**

«GORNYY ZHURNAL», 2022, № 3, pp. 49–53
DOI: 10.17580/gzh.2022.03.07

Drilling tool for frozen ground

Information about authors

I. G. Martyuchenko¹, Professor, Doctor of Engineering Sciences

M. I. Zenin¹, Assistant, Zenin-1995@mail.ru

A. Yu. Kolesnikov¹, Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences

S. V. Ivanov¹, Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences

¹Gagarin Saratov State Technical University, Saratov, Russia

Abstract

The importance and immediacy of mineral exploration and extraction in the Arctic zone using drilling tools are highlighted. The problems connected with frozen ground exploration with drilling tools are discussed. Hardness and abrasivity of frozen ground lead to fast wear of drilling tools. The further research objective is identified. The current methods of mining are reviewed, and the open pit method is selected for the case study. The existing drilling tools in mineral exploration and mining are examined. Their advantages and disadvantages are listed, and the mechanism and type of deformation in frozen ground in interaction with different drilling tools are discussed. The specificity of each drilling tool is taken into account to find the least energy-intensive and more universal tool both for frozen and thawed rocks. It is required to design a drilling tool which consumes less energy and operates safely for the structure of solid minerals. New promising design solutions are found, and improvability of traditional tools is assessed. The design and mode of the proposed tool are discussed more comprehensively, including the rock-breaking tool interaction and the resultant mechanism of rock fracture. The relation is driven for the resultant force applied to ground in operation of the drilling tool. The resultant force is correlated with the geometry of a screw drill. It is found that screw drilling is implemented through tearing and shearing in soil. Such deformation mechanisms are less energy-consuming, and the fracture mechanism is thus more efficient.

Keywords: drilling tool, screw drill, frozen ground, drilling, pulling force, fracture.

References

1. Salikhov V. A., Marchenko V. A. Mineral exploration and mining: Tutorial. Moscow – Berlin: Direkt-Media, 2017. 159 p.
2. Larichkin F. D., Fadeev A. M., Cherepovitsin A. E. Problems of study and development of raw materials resource of the Arctic. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. 2012. No. 1(5). pp. 8–15.
3. Kulkova M. S., Zemtsovskiy A. V. Optimizing parameters of stopes and pillars for the Zhdanov deposit mining. *Eurasian Mining*. 2019. No. 1. pp. 13–15. DOI: 10.17580/em.2019.01.03

4. Fedotov P. K., Senchenko A. E., Fedotov K. V., Burdonov A. E. Dressability study for polymetallic ore deposits of the Zabaikalye Territory. *Obogashchenie Rud*. 2019. No. 3. pp. 3–9. DOI: 10.17580/or.2019.03.01
5. Yakovlev V. L., Yakovlev V. A. Features of methodological approach to assessment of mineral and raw material potential of Arctic regions. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktki*. 2018. Vol. 24. No. 2. pp. 49–57.
6. Lomonosov G. G. Industrial processes of underground ore deposit mining. 2nd ed. Moscow: Gornaya kniga, 2013. 517 p.
7. Kuntala Lahiri-Dutt. Between the Plough and the Pick: Informal, artisanal and small-scale mining in the contemporary world. Acton: ANU Press, 2018. 374 p.
8. Jakubec J., Woodward R., Boggis B., Clark L., Lewis P. Underground diamond mining at Ekati and Diavik diamond mines. *Proceedings of the 11th International Kimberlite Conference*. Gaborone, 2017. Vol. 11. DOI: 10.29173/ikc4009
9. Martyushov L. N., Senina E. E. Basic technologies of the Ural industry: Tutorial. Yekaterinburg, 2017. 156 p.
10. Yongqi Ma, Jin Yang, Pengtian Feng, Can Zhang. The Challenges and Key Technology of Drilling Safety in the Area of the Arctic. *Proceedings of the International Field Exploration and Development Conference 2018. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*. Singapore: Springer, 2018. pp. 522–532.
11. Northcote B. Exploration and mining in the South Central Region, British Columbia. *Provincial Overview of Exploration and Mining in British Columbia, 2017: Information Circular 2018-1*. Victoria: Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources, 2017. pp. 105–119.
12. Cheskidov V. I., Bobyl'skiy A. S., Reznik A. V. Open pit solid mineral mining in Siberia: Problems and prospects. *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispolzovaniya mineralnykh resursov*. 2016. No. 3. pp. 70–76.
13. Yankevskiy A. V., Kulibali Mussa. Complex of measures to increase the efficiency of gold-bearing ore mining. *Internet zhurnal Naukovedenie*. 2017. Vol. 9, No. 6. 86EВN617.
14. Martyuchenko I. G. Screw the working bodies of machines for the development of frozen soils. *Seriya: Nauchnaya mysl*. Moscow: Infra-M, 2014. 200 p.
15. Fedorov B. V. Drilling: Textbook. Almaty: KazNITU, 2002. 284 p.
16. Rudakov V. V. Required improvement of mining technologies for precious metals and overall development management in the mining industry. *GIAB*. 2011. No. 7. pp. 294–301.
17. Shekhovtsov V. S., Vlasikin Yu. K. Promising methods of mineral mining: Tutorial. Novokuznetsk: SibGIU, 2004. 257 p.
18. Makashev G. E., Tashlykov P. G., Solodovnikov A. B. Screw-type working member for handling frozen soil. Patent SSSR, No. 1078004. Applied: 09.07.1982. Published: 07.03.1984. Bulletin No. 9.
19. Martyuchenko I. G., Yuzhakov R. V., Borisov V. V. Tree Burays on the One Hand in Strong and Sustainable Air Systems. Patent RF, No. 49844. Applied: 29.06.2005. Published: 10.12.2005.
20. Tsytovich N. A. Frozen soils: General and applied mechanics: Tutorial. Moscow: URSS, 2013. 448 p.

УДК 622:621.833.6

ОБОСНОВАНИЕ СТРАТЕГИИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ И ПАРАМЕТРОВ МНОГОСАТЕЛЛИТНОЙ ПЛАНЕТАРНОЙ ПЕРЕДАЧИ ГОРНОЙ МАШИНЫ

А. А. ГРАБСКИЙ¹, проф., д-р техн. наук
Ф. И. ПЛЕХАНОВ², проф., д-р техн. наук, fplehanov@list.ru
Е. П. ГРАБСКАЯ³, доцент, канд. экон. наук
Е. Ф. ВЫЧУЖАНИНА², доцент, канд. экон. наук

¹Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, Москва, Россия

²Ижевский государственный технический университет им. М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

³НИТУ «МИСиС», Москва, Россия

Введение

Зубчатые планетарные передачи широко распространены в народном хозяйстве благодаря хорошим технико-экономическим показателям [1–5]. Многосателлитные (многопоточные) планетарные передачи хорошо зарекомендовали себя в буровых установках, в электромеханической трансмиссии карьерных самосвалов (планетарный редуктор мотор-колеса) и многих других машинах [6, 7]. Наибольшее применение находят конструкции с минимальным числом избыточных связей, в которых сателлиты установлены на сферические подшипники, а одно из основных звеньев выполнено безопорным («плавающим») и имеет возможность за счет радиального его смещения самоустанавливаться, что позволяет приблизиться к равномерному распределению нагрузки как по отдельным потокам мощности (сателлитам), так и по ширине зубчатых венцов колес [8–10]. В качестве «плавающего» звена обычно принимают солнечную шестерню, связанную с быстроходным валом двойной зубчатой муфтой. Однако такое конструктивное исполнение требует большого объема зуборезных работ и ведет к увеличению осевого размера передачи. Разработка новых, более совершенных конструкций передач указанного типа позволяет улучшить их технико-экономические показатели, но требует исследования показателей прочности и жесткости и на основе его результатов – определения рациональных параметров привода.

Конструкция передачи, методика и результаты ее исследования

Эффективной по нагрузочной способности и уровню технологичности является конструкция многосателлитной планетарной передачи со сборным водилом, одна щека которого выполнена в виде «плавающего» диска с установленными в нем неподвижно осями сателлитов, а вторая жестко соединена с выходным валом и имеет отверстия, в которых расположены с зазором противоположные концы осей сателлитов (рис. 1)

Предложена новая конструкция многосателлитной планетарной передачи, в которой водило выполнено сборным с «плавающей» щекой. Приведен метод определения законов распределения нагрузки в зонах сопряжения оси сателлита со щеками сборного водила, что позволяет выполнять расчет передачи на прочность и жесткость и устанавливать рациональные значения ее параметров. Задачу решали с использованием дифференциальных уравнений изогнутой оси сателлита с учетом контактной деформации сопрягаемых элементов и деформации изгиба оси.

Ключевые слова: планетарная передача, конструкция, ось сателлита, распределение нагрузки, рациональные параметры

DOI: 10.17580/gzh.2022.03.08

[11]. Для снижения динамических нагрузок между отверстиями в щеке водила, жестко соединенной с выходным валом, и осями сателлитов могут быть установлены резиновые кольца. Данная передача не требует использования дополнительного механизма в виде двойной зубчатой или угловой муфты либо другого устройства для выравнивания нагрузки по потокам мощности, что существенно упрощает конструкцию механического привода.

Для расчета указанной рациональной конструкции многопоточной планетарной передачи на прочность и жесткость важно установить законы распределения нагрузок в сопряжениях оси сателлита со щеками водила в зависимости от параметров этих элементов (рис. 2). При этом следует учесть, что в конструкции с самоустанавливающимися сателлитами распределение

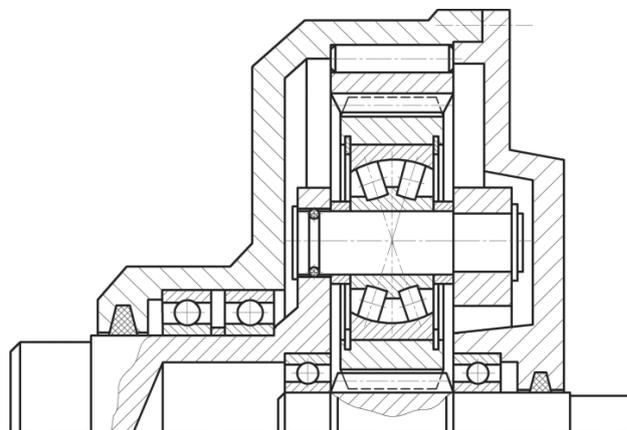


Рис. 1. Многосателлитная планетарная передача со сборным самоустанавливающимся водилом [11]

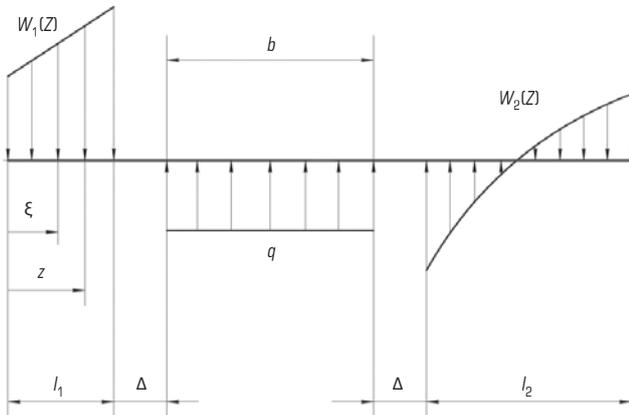


Рис. 2. Схема нагружения оси сателлита планетарной передачи

нагрузки по ширине кольца подшипника в зоне его сопряжения с осью близко к равномерному.

Ось сателлита в местах ее сопряжения со щеками водила можно представить в виде балки на упругом основании. Дифференциальные уравнения изгиба оси запишем с учетом контактной деформации и деформации, вызванной поперечной силой и изгибающим моментом:

$$\delta_1 W_1''(z) - 1,1 \frac{W_1(z)}{SG} - \frac{M_1(z)}{IE} = 0; \quad (1)$$

$$\delta_2 W_2''(z) - 1,1 \frac{W_2(z)}{SG} - \frac{M_2(z)}{IE} = 0, \quad (2)$$

где S – площадь поперечного сечения оси; G, E – модули упругости материала колес; I – осевой момент инерции сечения ($I = \pi d^4/64$, d – диаметр оси). Коэффициенты удельной контактной податливости сопрягаемых элементов δ_1, δ_2 определяли экспериментальным путем на машине INSTRON (рис. 3), что позволило установить зависимость деформации от нагрузки (для щеки водила, жестко соединенной с выходным валом, при наличии радиального зазора между щекой и осью сателлита, равного $0,01d$, $\delta_1 \cong 2,4/E$; для «плавающей» щеки при отсутствии зазора между сопрягаемыми элементами $\delta_2 \cong 1,2/E$). Моменты изгиба оси на участках 1, 2 (участки l_1, l_2) (см. рис. 2) определяли из уравнений

$$M_1(z) = \int_0^z W_1(\xi)(\xi - z)d\xi;$$

$$M_2(z) = \int_0^z W_2(\xi)(\xi - z)d\xi,$$

где ξ – промежуточная координата (см. рис. 2).

Подставляя эти выражения в равенства (1), (2) и дважды дифференцируя уравнения с использованием правила дифференцирования под знаком интеграла (формула Лейбница), получим

$$\delta_1 W_1^{IV}(z) - 1,1 \frac{W_1''(z)}{SG} + \frac{W_1(z)}{IE} = 0; \quad (3)$$



Рис. 3. Экспериментальное определение деформативности элементов планетарной передачи

$$\delta_2 W_2^{IV}(z) - 1,1 \frac{W_2''(z)}{SG} + \frac{W_2(z)}{IE} = 0. \quad (4)$$

Решая дифференциальные уравнения изогнутой оси (3), (4) по методу Эйлера, имеем

$$\begin{aligned} W_1(z) &= C_1 \sinh(\gamma_1 z) \sin(\beta_1 z) + C_2 \sinh(\gamma_1 z) \cos(\beta_1 z) + \\ &+ C_3 \cosh(\gamma_1 z) \sin(\beta_1 z) + C_4 \cosh(\gamma_1 z) \cos(\beta_1 z), \\ W_2(z) &= C_5 \sinh(\gamma_2 z) \sin(\beta_2 z) + C_6 \sinh(\gamma_2 z) \cos(\beta_2 z) + \\ &+ C_7 \cosh(\gamma_2 z) \sin(\beta_2 z) + C_8 \cosh(\gamma_2 z) \cos(\beta_2 z), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{где } \gamma_1 = \sqrt[4]{\frac{1}{\delta_1 IE} \cos \left[0,5a \cos \left(1,1 \frac{\sqrt{IE/\delta_1}}{2GS} \right) \right]},$$

$$\gamma_2 = \sqrt[4]{\frac{1}{\delta_2 IE} \cos \left[0,5a \cos \left(1,1 \frac{\sqrt{IE/\delta_2}}{2GS} \right) \right]},$$

$$\beta_1 = \sqrt[4]{\frac{1}{\delta_1 IE} \sin \left[0,5a \cos \left(1,1 \frac{\sqrt{IE/\delta_1}}{2GS} \right) \right]},$$

$$\beta_2 = \sqrt[4]{\frac{1}{\delta_2 IE} \sin \left[0,5a \cos \left(1,1 \frac{\sqrt{IE/\delta_2}}{2GS} \right) \right]}.$$

Постоянные интегрирования $C_1 \div C_2$ определяются из уравнений статики и граничных условий.

Путем численного решения уравнения (5) построены графики изменения погонной нагрузки в местах сопряжения оси сателлита со щеками сборного самоустанавливающегося водила (рис. 4), позволяющие осуществить корректный расчет деталей передачи на прочность и жесткость и установить рациональные параметры планетарного механизма. Из них следует, что при $l_1 \geq 0,3d$, $b = 0,5d \div 0,8d$ и отношении суммарной длины оси

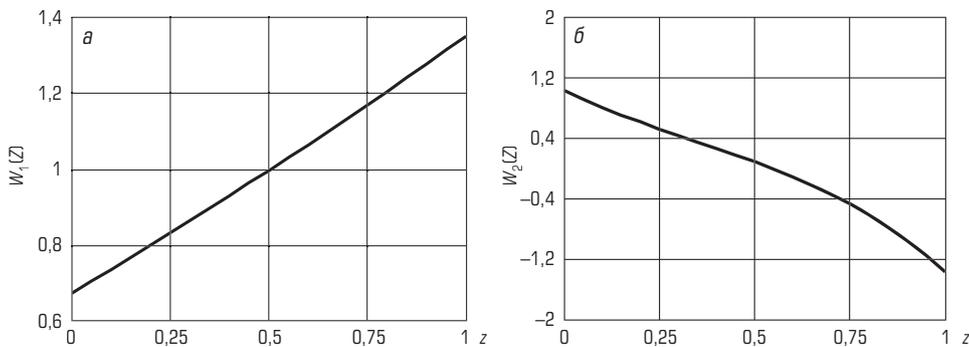


Рис. 4. Зависимость относительной погонной нагрузки $W_1(z) = W_1(z)/W$ (а) и $W_2(z) = W_2(z)/W$ (б) от координаты z , отнесенной к длине соответствующего участка оси при $b/d = 0,8$; $l_1/d = 0,3$; $l_2/d = 1,1$; $\Delta/b = 0,25$

сателлита L к ширине безопорной («плавающей») щеки водила l_2 , превышающем 2,4, неравномерность распределения нагрузки может оказаться недопустимо большой (коэффициент неравномерности $K \geq 1,5$).

Для подтверждения правильности полученных по приведенным выше зависимостям результатов расчета осуществлен конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния мест контакта элементов исследуемой передачи в среде Solid Works. На **рис. 5** представлена компьютерная модель «плавающей» щеки водила в месте ее соединения с осью сателлита. Из этой модели следует, что погонная нагрузка и напряжения сжатия изменяются по ширине щеки неравномерно, но при рациональных параметрах узла сателлита максимальные значения этих силовых факторов незначительно превышают средние значения указанных величин в месте контакта оси сателлита и щеки водила, жестко связанной с выходным валом передачи.

В исследуемой конструкции планетарной передачи при трехсателлитном ее исполнении избыточные связи полностью отсутствуют, и распределение нагрузки в зацеплениях колес близко к равномерному. Однако при большем числе сателлитов нагрузка по ним распределяется неравномерно даже при наличии самоустанавливающихся звеньев. Деформативность элементов конструкции, прежде всего осей сателлитов, позволяет частично компенсировать погрешности изготовления и снизить указанную неравномерность [12, 13]. Приведенные выше зависимости дают возможность установить необходимую для таких расчетов податливость осей сателлитов многопоточной конструкции передачи со сборным самоустанавливающимся водилом.

Используя метод Мора для определения деформации оси и учитывая влияние на нее контактной податливости в зоне сопряжения со щекой водила, определим обусловленное указанной деформацией смещение центра сателлита:

$$y = \delta_1 \left[W_1(z) + (\Delta + 0,5b) \frac{dW_1(z)}{dz} \right]_{z=l_1} + \frac{P}{IE} \left[\frac{b^3}{23} + \frac{\Delta b^2}{4} + \frac{\Delta^2 b}{2} + \frac{\Delta^3}{3} - \frac{M_2(l_2)}{2P} (\Delta + 0,5b)^2 \right] + \frac{1,1P}{GS} \left(\Delta + \frac{3b}{8} \right). \quad (6)$$

где Δ – расстояние между щекой водила и внутренним кольцом подшипника сателлита; b – ширина внутреннего кольца подшипника сателлита; $P = Wl_1 = qb$; W – среднее значение погонной

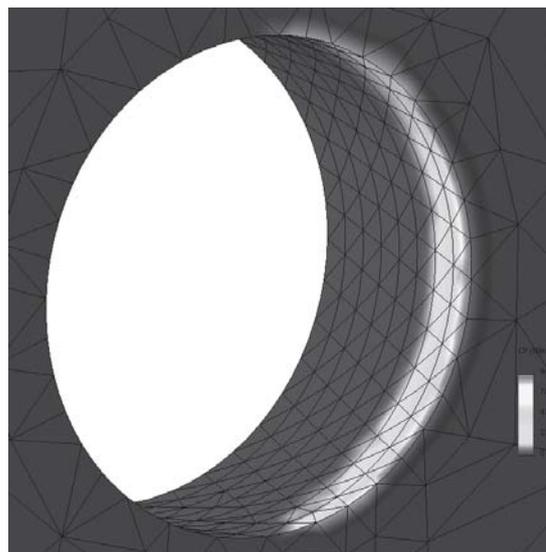


Рис. 5. Компьютерная модель «плавающей» щеки водила при $b/d = 0,8$; $l_1/d = 0,3$; $l_2/d = 1,5$; $\Delta/b = 0,25$

нагрузки на участке 1; q – равномерно распределенная нагрузка в зоне сопряжения внутреннего кольца подшипника с осью сателлита.

Податливость оси сателлита, рассчитанная по выражению (6), наряду с деформациями других элементов передачи (зубьев колес, подшипников качения) входит в систему уравнений, решение которых позволяет установить распределение нагрузки по потокам мощности, что является важным показателем прочности, долговечности и надежности механизма [10].

Заключение

Исходя из вышеприведенных положений и результатов выполненного на базе полученных зависимостей исследования, можно обосновать стратегию совершенствования конструкции и параметров многосателлитной планетарной передачи горной машины и сделать следующие выводы:

- использование рациональной конструкции многосателлитной планетарной передачи, содержащей сборное водило с «плавающей» щекой, позволяет уменьшить число ее избыточных связей без дополнительного механизма самоустановки, что положительно сказывается на показателях работы привода;

• рациональными являются следующие значения параметров узла сателлита планетарной передачи со сборным самоустанавливающимся водилом: отношение ширины щеки, жестко соединенной с выходным валом, к диаметру оси $l_1/d \cong 0,3$, отношение общей длины оси сателлита к ширине «плавающей» щеки водила $L/l_2 \leq 2,4$;

• полученные зависимости позволяют выполнить расчет эффективной конструкции планетарной передачи на прочность и жесткость;

• многосателлитная планетарная передача со сборным водилом и результаты ее исследования могут быть использованы в приводах буровых установок, карьерных самосвалов и других горных машин.

Библиографический список

1. *Drewniak J., Kądziołka T., Zawislak S.* Kinematics of Bevel Biplanetary Gear // *Advanced Gear Engineering. Series: Mechanisms and Machine Science.* – Cham : Springer, 2018. Vol. 51. P. 289–303.
2. *Ан И-Кан.* Распределение усилий между звеньями планетарного механизма типа k-h-v // *Вестник машиностроения.* 2016. № 5. С. 60–63.
3. *Ражигов В. Н., Беляев А. Н.* Методика ускоренных ресурсных испытаний планетарной зубчатой передачи К-Н-V, работающей с небольшой частотой вращения // *Вестник машиностроения.* 2017. № 1. С. 40–43.
4. *Захаров М. Н., Ермолаев М. М., Зайцева А. В.* Оценка распределения нагрузки между сателлитами планетарно-цепочного редуктора // *Вестник машиностроения.* 2020. № 6. С. 34–39.
5. *Concli F., Maccioni L., Gorla C.* Development of a computational fluid dynamics simulation tool for lubrication studies on cycloidal gear sets // *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements.* 2020. Vol. 8. Iss. 3. P. 220–232.
6. *Волков Г. Ю., Курасов Д. А., Горбунов М. В.* Инженерный метод геометрического синтеза планетарного механизма роторной гидромашин // *Вестник машиностроения.* 2017. № 10. С. 10–15.
7. *Приходько А. А.* Силовой анализ планетарного механизма возвратно-вращательного движения с эллиптическими зубчатыми колесами // *Вестник машиностроения.* 2021. № 2. С. 14–18.
8. *Гончаров Ю. А., Гончаров О. Ю., Баранова И. А.* Рациональное проектирование планетарных передач // *Вестник машиностроения.* 2019. № 7. С. 3–7.
9. *Drewniak J., Kopec J., Zawislak S.* Kinematical and Efficiency Analysis of Planetary Gear Trains by Means of Various Graph-Based Approaches // *Theory and Practice of Gearing and Transmissions. Series: Mechanisms and Machine Science.* – Cham : Springer, 2016. Vol. 34. P. 263–284.
10. *Plekhanov F., Goldfarb V., Vychuzhanina E.* Load Distribution in Meshing of Planetary Gearwheels and Its Influence on the Technical and Economic Performance of the Mechanism // *Advanced Gear Engineering. Series: Mechanisms and Machine Science.* – Cham : Springer, 2018. Vol. 51. P. 117–137.
11. Пат. 2673584 РФ. Многосателлитная планетарная передача / Ф. И. Плеханов, Г. Н. Первушин, А. В. Суслин ; заявл. 10.07.2017 ; опубл. 28.11.2018, Бюл. № 34.
12. *Leque N., Kahraman A.* A Three-Dimensional Load Sharing Model of Planetary Gear Sets Having Manufacturing Errors // *Journal of Mechanical Design.* 2017. Vol. 139. Iss. 3. 033302. DOI: 10.1115/1.4035554
13. *Hu Y., Talbot D., Kahraman A.* A Load Distribution Model for Planetary Gear Sets // *Journal of Mechanical Design.* 2018. Vol. 140. Iss. 5. 053302. DOI: 10.1115/1.4039337

«GORNYI ZHURNAL», 2022, № 3, pp. 54–57
DOI: 10.17580/gzh.2022.03.08

Strategy of structural and parametric improvement of multisatellite planetary gears in mining machines

Information about authors

A. A. Grabsky¹, Professor, Doctor of Engineering Sciences
F. I. Plekhanov², Professor, Doctor of Engineering Sciences, fplehanov@list.ru
E. P. Grabskaya³, Associate Professor, Candidate of Economic Sciences
E. F. Vychuzhanina², Associate Professor, Candidate of Economic Sciences
¹Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University, Moscow, Russia
²Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia
³NUST MISIS, Moscow, Russia

Abstract

Multisatellite planetary gears have good technical and economic indicators and a high degree of reliability, thanks to which they are widely used in many areas of the national economy. Possessing relatively small dimensions and mass at high load capacity, they have proven themselves in lifting, transport and mining machines. Most often constructions with self-aligning (“floating”) links are used, which have a relatively low uneven distribution of the load in the wheel engagement. However, to ensure self-alignment requires the presence of a special mechanism in the form of a double-toothed or angular clutch, which complicates the design of the drive. In the presented article, a new design of a multi-satellite planetary gear was proposed, in which the carrier was made assembled, with a floating cheek. A method is proposed for determining the distribution laws of the load in the zones of junction of the satellite axis with the jaws of the modular carrier, which makes it possible to calculate the transmission for strength and rigidity and establish rational values of its parameters. The solution of the problem was carried out using the differential equations of the curved axis of the satellite, recorded taking into account the contact deformation of the mating elements and the bending deformation of the axis. In this case, the contact compliance was determined experimentally using an INSTRON machine. The differential equations of the curved axis were solved by the Euler method.

Keywords: planetary gear, design, satellite axis, load distribution, rational parameters.

References

1. *Drewniak J., Kądziołka T., Zawislak S.* Kinematics of Bevel Biplanetary Gear. *Advanced Gear Engineering. Series: Mechanisms and Machine Science.* Cham : Springer, 2018. Vol. 51. pp. 289–303.
2. *An I-Kan.* Force Distribution within a KHV Planetary Mechanism. *Russian Engineering Research.* 2016. Vol. 36, No. 8. pp. 640–642.
3. *Razhikov V. N., Belyaev A. N.* Accelerated Endurance Tests of K-H-V Planetary Gears at Low Speed. *Russian Engineering Research.* 2017. Vol. 37, No. 4. pp. 296–299.
4. *Zakharov M. N., Ermolaev M. M., Zaytseva A. V.* Nonuniform Load Distribution between the Satellites of a Cycloid Gear. *Russian Engineering Research.* 2020. Vol. 40, No. 9. pp. 720–725.
5. *Concli F., Maccioni L., Gorla C.* Development of a computational fluid dynamics simulation tool for lubrication studies on cycloidal gear sets. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements.* 2020. Vol. 8, Iss. 3. pp. 220–232.
6. *Volkov G. Yu., Kurasov D. A., Gorbunov M. V.* Geometric Synthesis of the Planetary Mechanism for a Rotary Hydraulic Machine. *Russian Engineering Research.* 2018. Vol. 38, No. 1. pp. 1–6.
7. *Prikhodko A. A.* Force Analysis of Reciprocating Rotary Planetary Mechanism with Elliptical Gears. *Russian Engineering Research.* 2021. Vol. 41, No. 5. pp. 387–391.
8. *Goncharov Yu. A., Goncharov O. Yu., Baranova I. A.* Rational design of planetary gears. *Russian Engineering Research.* 2019. No. 7. pp. 3–7.
9. *Drewniak J., Kopec J., Zawislak S.* Kinematical and Efficiency Analysis of Planetary Gear Trains by Means of Various Graph-Based Approaches. *Theory and Practice of Gearing and Transmissions. Series: Mechanisms and Machine Science.* Cham : Springer, 2016. Vol. 34. pp. 263–284.
10. *Plekhanov F., Goldfarb V., Vychuzhanina E.* Load Distribution in Meshing of Planetary Gearwheels and Its Influence on the Technical and Economic Performance of the Mechanism. *Advanced Gear Engineering. Series: Mechanisms and Machine Science.* Cham : Springer, 2018. Vol. 51. pp. 117–137.
11. *Plekhanov F. I., Pervushin G. N., Suslin A. V.* Multi-satellite planetary train. Patent RF, No. 2673584. Applied: 10.07.2017. Published: 28.11.2018. Bulletin No. 34.
12. *Leque N., Kahraman A.* A Three-Dimensional Load Sharing Model of Planetary Gear Sets Having Manufacturing Errors. *Journal of Mechanical Design.* 2017. Vol. 139, Iss. 3. 033302. DOI: 10.1115/1.4035554
13. *Hu Y., Talbot D., Kahraman A.* A Load Distribution Model for Planetary Gear Sets. *Journal of Mechanical Design.* 2018. Vol. 140, Iss. 5. 053302. DOI: 10.1115/1.4039337

УДК 622.81

МЕТАНОВАЯ ОПАСНОСТЬ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

В. С. ЗАБУРДЯЕВ, ведущий научный сотрудник, д-р техн. наук
А. В. ХАРЧЕНКО, старший научный сотрудник, канд. техн. наук,
av-kharchenko@yandex.ru

Институт проблем комплексного освоения недр
им. академика Н. В. Мельникова РАН, Москва, Россия

Введение

Высокопроизводительные угольные шахты — это предприятия с нагрузками на очистной забой 5000 т угля в сутки и более в условиях метанообильных выемочных участков со сложным газовым балансом и интенсивностью метановыделения до 80–90 м³/мин, где выполнение горных работ по проходке горных выработок и ведению очистной выемки угля связано с газовой опасностью. В этих условиях требуются прогноз метанообильности, выбор способов и средств ее снижения с учетом геологических и горнотехнических факторов разработки метаноносных пластов угля. Решением данных вопросов занимаются как за рубежом [1–4], так и в России [5–7].

При составлении проектной документации на ведение горных работ следует ориентироваться на научно обоснованные данные как по объемам добычи угля, так и по средствам обеспечения газовой безопасности. В ней необходимо использовать рациональные для конкретных горнотехнических условий системы разработки и механизированные комплексы, а также способы, схемы и средства подготовки к безопасной по газу разработке газоносных пластов угля, так как объемы выделения метана в газовых шахтах достигают 100–150 м³/мин.

Принятую согласно нормативным документам [8] метановую опасность шахты по величине относительной метанообильности в условиях применения высокопроизводительной угледобывающей подземной техники следует считать косвенным и, возможно, даже ошибочным показателем, а основным — абсолютную метанообильность, по которой необходимо устанавливать категорию шахты по метану [9], тем более что взрывы метана случаются в шахтах и с низкой абсолютной метанообильностью.

Необходимость пересмотра установленного в нормативных документах порядка отнесения шахт к категории опасности по метану актуальна, поскольку показатель относительного метановыделения при высоких нагрузках на лавы не отражает фактической опасности ведения горных работ на метаноносных пластах угля. Рекомендуется категории опасности высокопроизводительных угольных шахт устанавливать по их абсолютной метанообильности.

Отмечено, что интенсивная добыча угля подземным способом осуществляется в основном на шахтах Кузнецкого и Печорского бассейнов, где пласты обладают значительной метанообильностью. Показано влияние мощности междупластья на интенсивность выделения метана при отработке сближенных пластов. Установлено, что существующий в настоящее время порядок определения категории опасности шахт по выделению метана исходя из величины относительной метанообильности горных выработок при применении высокопроизводительной техники не отвечает безопасному ведению горных работ по газовому фактору. Рекомендовано категорию опасности по метану мощных угольных шахт устанавливать по величине абсолютного метановыделения.

Ключевые слова: шахта, пласт, добыча угля, метаноносность, очистной забой, метановая опасность, категорийность шахт

DOI: 10.17580/gzh.2022.03.09

Проведенные исследования и их результаты

Основными источниками метана в пределах выемочного участка являются: разрабатываемый пласт угля, сближенные угольные пласты и выработанные пространства как действующего очистного забоя, так и ранее отработанных пространств на выемочном поле.

Метаноносность разрабатываемого пласта и сближенных с ним пластов и объемы добычи угля предопределяют уровень метановыделения на выемочном участке. При этом метаноносность угольных пластов принимают по данным геологов или рассчитывают с учетом глубины залегания. Метаноносность угольного массива в зоне его выемки очистным комбайном определяют экспериментально путем отбора проб угля, а содержание метана в отбитом угле — проведением газозвушных съемок в выработках по пути его транспортирования.

Процессы высокопроизводительной работы очистных забоев и обеспечения безопасных по газу условий труда шахтеров являются многофакторными, причем чаще всего взаимно увязанными между собой, поскольку чем больше производительность очистной техники, тем выше интенсивность метановыделения в призабойное пространство лавы и на выемочном участке в целом. Определяющим фактором здесь следует считать метаноносность разрабатываемого и сближенных с ним пластов угля, которая, как правило, возрастает с глубиной их залегания и зависит от вещественного состава углей [9, 10].

По данным геологов и в соответствии с положениями определения метаноносности по Инструкции [10], на шахтных полях отбирали пробы угля (керны) на различных глубинах от земной поверхности и устанавливали метаноносность угольных пластов. Используя установленную метаноносность для основных

Таблица 1. Зависимость метаноносности пластов угля от глубины залегания

Шахта	Угольные пласты	Глубина залегания, м	Зависимость метаноносности X ($\text{м}^3/\text{т}$) от глубины H (м)
Им. С. М. Кирова	24, 25	140–600	$X = 0,038 H$
Им. В. Д. Ялевского (бывш. «Котинская»)	52	105–500	$X = 0,037 H$
«Абашевская»	14, 16	210–550	$X = 4,3 + 0,0386 (H - 100)$
«Алардинская»	1, 3-3а	240–725	$X = 12 + 0,012 H$
«Осинниковская»	$E_1 - E_6$ $K_1 - K_5$	490–755	$X = 0,0242 (H - 150)$
«Распадская»	6 – 11	230–550	$X = 13,8 + 0,042 (H - 230)$

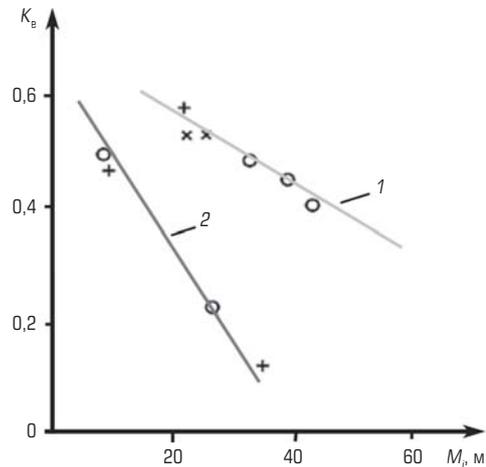
углегазовых месторождений Кузбасса и Воркуты, определены зависимости содержания в угольных пластах метана от глубины их залегания. В табл. 1 показаны зависимости метаноносности пластов для шахт Кузбасса.

Скорость продвижения фронта очистных работ существенно влияет на границы зон разгрузки подрабатываемых и надрабатываемых углепородных массивов и, естественно, на интенсивность выделения метана в выработки выемочных участков. Помимо метаноносности сближенных пластов угля, основными факторами здесь становятся расстояния между разрабатываемым пластом угля и сближенными с ним пластами, скорость продвижения лавы, а также степень разгрузочного влияния очистных работ, т. е. степень их естественной дегазации.

Влияние междупластья и скорости продвижения очистных работ в пределах отдельных пластов угля показано в табл. 2, а степень естественной дегазации сближенных пластов от величины междупластья M_i – на рисунке. Воздействие двух основных факторов на местоположение в сближенных пластах максимального уровня их разгрузки оценено величиной коэффициента K , характеризующего угол наклона соответствующих прямых к оси абсцисс (мощность междупластья) в углепородном массиве, подверженном разгрузочному воздействию очистных работ (см. табл. 2).

Таблица 2. Условия и результаты исследования зависимости $L_{\max} = f(M_i)$ на угольных шахтах

Шахта	Пласт		Расстояние между отработываемым и сближенными пластами M_i , м	Скорость продвижения очистного забоя, м/сут	Расстояние до зоны максимальной разгрузки L_{\max} , м	Показатель K (тангенс угла наклона прямой $L_{\max} = f(M_i)$)
	разрабатываемый	сближенный				
<i>Подработка</i>						
«Абайская» (Карагандинский бассейн)	K_{10}	K_{11}	35	2,5	22	0,63
Им. С. М. Кирова (Кузбасс)	24	Брусицынский Майеровский	30 35	9,5	28	0,87
Им. В. Д. Ялевского (Кузбасс)	52	53	53	13,8	50	0,96
<i>Надрработка</i>						
Группа метанообильных шахт Кузбасса и Караганды (6 шахт)	–	Группа сближенных пластов (15 пластов)	25–30 (среднее)	8,6 (среднее)	35 (среднее)	1,28



Зависимость коэффициента естественной дегазации угольных пластов K_e в кровле (1) и почве (2) от мощности междупластья M_i

Аналогично оценена степень естественной дегазации подрабатываемых и надрабатываемых пластов угля K_e в зависимости от величины междупластья M_i .

Двухфакторная зависимость местоположения максимального уровня разгрузки пород кровли и почвы $K_p = f(M_i)$ при $V_{оч}$ на пластах угля с различной скоростью продвижения очистных забоев представлена формулами

$$K_p = L_{\max}/M_i; \tag{1}$$

$$K_e = K_{пл} - cM_i, \tag{2}$$

где K_p – коэффициент, характеризующий степень разгрузки подрабатываемых сближенных пластов угля в зависимости от M_i , доли ед.; L_{\max} – расстояние в горизонтальной плоскости от линии очистного забоя до местоположения зоны максимальной разгрузки сближенного пласта от горного давления, м; M_i – величина междупластья по нормали от разрабатываемого пласта до i -го сближенного, залегающего в кровле или почве рабочего пласта, м; K_e – коэффициент естественной дегазации угольных пластов; $K_{пл}$ – степень естественной дегазации разрабатываемого пласта впереди очистного забоя, доли ед.; c – коэффициент уравнения, м^{-1} .

Показатели, входящие в формулы (1) и (2), установлены по результатам исследований на шахтах Кузбасса, Воркуты и Караганды (см. табл. 2) в интервалах междупластий от разрабатываемого пласта при подработке до 50 м, скорости подвигания очистных забоев 2,5–13,8 м/сут, зон максимальной разгрузки сближенных пластов угля L_{\max} до 50 м в горизонтальной плоскости при надработке $M_i^n = 20\div 50$ м, степени естественной дегазации разрабатываемых пластов 0,67–0,70, сближенных подрабатываемых 0,4–0,6 и надрабатываемых пластов угля 0,1–0,5. При этом величина коэффициента c в формуле (2) составила 0,0053 при подработке сближенных пластов угля и 0,0156 – при их надработке.

Коэффициент естественной дегазации сближенных пластов угля определяют по формуле (2) при средних показателях $K_{\text{пл}}^n = 0,7$ при подработке сближенных пластов и $K_{\text{пл}}^n = 0,67$ – при их надработке в интервале глубин 5–35 м.

При разработке свиты газоносных пластов на глубоких горизонтах с применением высокопроизводительной техники газовая ситуация на выемочных участках осложняется обильными до 90 м³/мин выделениями метана на выемочном участке (поле), в том числе до 60 м³/мин из выработанных пространств действующего участка и ранее отработанных пространств. В таких условиях возрастает опасность загазирования горных выработок и повышается вероятность формирования взрывоопасных ситуаций [11].

Применение за прошедшие 15 лет комплекса способов и схем дегазации сближенных пластов угля и выработанного пространства и эффективных схем проветривания выемочных участков способствовало снижению числа аварий по фактору метана соответственно до 44, 23 и 22 случаев. Однако тяжесть аварий существенно возросла из-за использования на выемочных участках и полях комбинированных схем проветривания с применением газоотсасывающих вентиляторных установок или за счет использования общешахтной депрессии. К числу таких наиболее катастрофических аварий отнесены аварии на бывшей шахте «Ульяновская» (2007 г.) и на шахте «Распадская» (2010 г.), информация о которых частично приведена в статье [12].

Опасность ведения очистных работ в значительной степени зависит от метанообильности и концентрации метана в выработанных пространствах. На выемочных участках происходит разбавление метана, находящегося в обрушенном пространстве пород, утечками воздуха из призабойного пространства лавы, зачастую до взрывоопасных концентраций. В таких условиях возможны вспышки или взрывы метана.

Рекомендуемые технологические решения для предотвращения опасных ситуаций основаны на снижении объемов выделения метана средствами дегазации сближенных пластов угля или путем обеспечения необходимого расхода воздуха через выработанное пространство. При этом надо учитывать возможное присутствие в рудничной атмосфере гибридных смесей, например: метан – воздух, тонкодисперсная угольная пыль – воздух, угольная и пиритная пыль – воздух, метан – водород – воздух, метан – сероводород – воздух или различных их комбинаций. Такие смеси изменяют диапазон взрывчатости и повышают опасность взрыва,

в отличие от наличия отдельных составляющих взрывоопасных компонентов, например метан – воздух и пр. [11].

Важная роль отводится также петрографическому составу углей, предопределяющему интенсивность выделения метана, процессам пылеобразования и отложения тонкодисперсной пыли в выработанном пространстве действующего выемочного участка. Особая опасность формирования предпосылок к воспламенению взрывоопасных смесей создается при термическом разложении пиритной пыли и выделении сероводорода, температура воспламенения которых 290–320 °С, что существенно ниже температуры воспламенения метана (650–750 °С).

Активизация метановыделения в выработанное пространство приурочена ко времени посадки пород основной углевлещающей кровли. Обрушение пород кровли вызывает разгрузку сближенных пластов угля и «поршневое» вытеснение из выработанного пространства в лаву и горные выработки опасных метановоздушных смесей. Процесс посадки пород кровли способствует также разлому крепких пород почвы, в полостях которых скапливается метан, выделяющийся из надрабатываемых пластов угля. Эти случаи наблюдаются при наличии между разрабатываемым угольным пластом и надрабатываемыми сближенными пластами угля слоя крепких пород мощностью 3–5 м и более. Слой таких пород может прогибаться, а затем обламываться блоками и по образованным трещинам разлома метан из межслоевых полостей интенсивно выделяется в призабойное пространство лавы, что может привести к загазированию выработок. Такой случай произошел, например, на бывшей шахте «Зырянская» с обильным выделением метана из почвы, с последующим катастрофическим взрывом метановоздушной смеси и гибелью 67 шахтеров в 1997 г.

Эффективным способом управления газовой выделением в выработанных пространствах является прежде всего дегазация подрабатываемых и надрабатываемых пластов угля скважинами, которая существенно снижает объемы метановыделения в призабойное пространство лавы. При этом важным обстоятельством является интенсивность выделения метана из его источников и обоснованное установление категории опасности шахт по величине абсолютной метанообильности (табл. 3).

Применение комплекса способов и схем дегазации сближенных пластов угля и выработанного пространства способствовало снижению числа аварий по газовому фактору. При этом изменяется структура газового баланса в сети горных выработок.

Высокопроизводительная работа угольных шахт также влияет на структуру газового баланса (табл. 4), причем со значительным смещением в направлении усиления роли дегазации, перераспределения метановых потоков в сети горных выработок и долевого участия средств управления газовой выделением на перспективных высокопроизводительных шахтах.

Существующий ныне порядок отнесения угольных шахт по метановой опасности, когда за критерий принимают величину относительной метанообильности [8], следует считать не соответствующим условиям высокопроизводительных очистных забоев, поскольку уровень метановой опасности в этом случае занижается (см. табл. 3).

Таблица 3. Сравнение методов установления категорий шахт по метану

Шахта	Пласт	Мощность пласта, м	Метаноносность пласта, м ³ /т	Среднесуточная добыча угля, т	Производительность комбайна, т/мин	Метановыделение				Категория опасности шахты по метану
						абсолютное, м ³ /мин			Относительное по действующей Инструкции и ПБ, м ³ /т	
						Разрабатываемый пласт	Сближенные пласты и породы	Выемочный участок		
«Воргашорская 2»	Мощный	3,1	15,5	10465	9,8	16,7	20,4	35,15	14,1	Сверхкатегорийная/III*
«Полысаевская»	Полысаевский 1	2,6	16,5	5320	7	19,6	24	38,35	22	Сверхкатегорийная
«Полосухинская»	29а	3	15,7	4100	7,4	22,2	33,3	51,75	25,4	Сверхкатегорийная
«Талдинская-Западная 1»	67	4,3	8,0	13075	12	10,8	8,8	17,95	1,8	II/I*
«Северная» (АО «Воркутауголь»)	Четвертый	1,5	23,2	1660	5,3	10,4	63,2	69,5	57,6	Сверхкатегорийная
				2500	8	15,7	97,4	113,1	65,1	То же
«Алардинская»	1	1,75	17,1	1000	3,3	5,1	0,9	5,2	7,5	I/II*
	3-3а	4,5	18	2000	8	8	2,8	10,1	7,3	II/II*
Им. С. М. Кирова	24	2,2	15,2	6630	7,4	12,7	76,3	85	17,6	Сверхкатегорийная
	25	1,7	16,8	4500	7,4	13,9	38,7	45,9	12,5	Сверхкатегорийная/III*
Им. В. Д. Ялевского	52	4,4	9,8	10800	10	3,3	15,5	18,4	2,4	II/I*
				17600	16,3	5,4	37,0	38	2,7	Сверхкатегорийная/I*
				23000	21,3	7	47,9	53,2	3,2	То же
				32400	30	9,9	84,1	94	4,2	– " –

* В числителе – по абсолютной метанообильности, в знаменателе – по относительной метанообильности.

Таблица 4. Структура газового баланса угольных шахт с дегазацией и газоотсосом

Шахта	Добыча угля, т/сут	Метановыделение, м ³ /мин					Всего
		Вентиляция			Дегазация	Газоотсос с использованием газоотсасывающих вентиляторов	
		Подготовительные забой	Выемочные участки	Шахта			
Им. С. М. Кирова	16685	6,3	23,1	30,6	82	37	109,6* 170,2
Им. В. Д. Ялевского	15080	6,5	16,1	32,6	34,5	–	61,1* 85,4

* В числителе – фактическое среднее метановыделение, в знаменателе – расчетное по газоносности.

В качестве критерия отнесения угольной шахты к определенной категории метановой опасности целесообразно использовать величину абсолютной метанообильности и категорию шахты устанавливать с интервалом 10 м³/мин, т. е. до 10 м³/мин – I категория, 10,1–20 м³/мин – II категория, 20,1–30 м³/мин – III категория и свыше 30 м³/мин – IV категория или сверхкатегорийная [9]. К сверхкатегорийной по метану следует относить также выбросоопасные шахты и шахты, опасные по суфлярным выделениям газов. Так, например, метанообильная шахта «Воргашорская» (АО «Воркутауголь») по абсолютной метанообильности (см. табл. 3) должна быть отнесена к сверхкатегорийной по метану, а по относительной – к III категории, т. е. менее опасной. Шахта «Талдинская-Западная 1», напротив, более опасная по абсолютному выделению метана (19,6 м³/мин), чем по относительной метанообильности, равной 1,8 м³/т.

Еще более показательны результаты метановыделения на выемочных участках высокопроизводительной шахты

им. В. Д. Ялевского: среднесуточная добыча угля в пределах 10800–32400 т/сут по пласту 52, метаноносность угля 9,8 м³/т (см. табл. 3).

При среднесуточной добыче угля в очистном забое 17600 т/сут и более шахту следует считать сверхкатегорийной по абсолютному метановыделению и I категории – по относительной метанообильности, что абсурдно, если за критерий опасности принимать величину относительной метанообильности, размерность которой кубометр на тонну.

Частота аварийных ситуаций по критерию абсолютного выделения метана в шахтах РФ приведена в табл. 5, ее повышение обусловлено, как правило, отсутствием дегазации, применение которой снижает объемы выделения метана в горные выработки, следовательно, число возможных их загазирования и частоту аварийных по газу ситуаций. При этом необходимо учитывать, что процессы высокопроизводительной работы очистных забоев и обеспечения безопасных по газу условий

труда шахтеров являются многофакторными и взаимосвязанными. Определяющим показателем такой взаимосвязи является концентрация метана в воздушных потоках, исходящих из лавы и выемочного участка [13].

Взрывоопасные ситуации обусловлены в основном загазированием горных выработок при стечении ряда обстоятельств и воспламенением метановоздушных смесей, которые связаны, как правило, с нарушением технологических режимов (фрикционное искрение, взрывные работы и др.) и правил техники безопасности, трудовой дисциплины (эксплуатация электрооборудования, сварочные работы, курение и т. д.). Установление категории опасности шахт по метану зависит от абсолютной метанообильности и соблюдения требований Правил безопасности по газовому фактору [14–16].

При исследовании условий и причин возникновения аварийных по газу ситуаций в шахтах установлены зависимости, определяющие вероятность загазирования выработок и воспламенения метановоздушных смесей. Произведение этих двух вероятностей определяет вероятность взрыва газовых смесей. Так, по данным изучения условий возникновения взрывоопасных по газу ситуаций на 146 шахтах в период 1985–1994 гг., вероятность загазирования выработок составила 0,047, вероятность воспламенения метановоздушных смесей – $2,43 \cdot 10^{-4}$, взрыва – $1,11 \cdot 10^{-5}$. Аналогичные исследования взрывоопасных ситуаций на 46 шахтах Кузбасса в период 2011–2013 гг. свидетельствовали о том, что вероятность взрыва газовых смесей составила $7,8 \cdot 10^{-7}$. Более благоприятный показатель вероятности взрыва газовых смесей во втором случае частично обусловлен меньшим числом шахт и трехлетним периодом наблюдений.

Выводы

1. Абсолютная метанообильность при среднесуточной добыче угля по шахте 5–10,5 тыс. т в условиях шахт АО «Воркутауголь»

Таблица 5. Частота аварийных по метану ситуаций на метанообильных шахтах

Метанообильность шахты, м ³ /мин	Частота, %	
	вспышек	взрывов
Менее 10	2,4	0,8
10–20	7,7	3,3
21–30	13,9	3,3
31–40	8,2	2,7
41–50	20	3,3
51–60	20	3,3
61–70	10	5
71–80	10	5
81–100	10	5
101–290 (шахты АО «Воркутауголь»)	10	0,9

достигает 90–150 м³/мин, а в условиях шахт Кузбасса – 60–110 м³/мин при суточной добыче угля на выемочном поле шахты 5,3–13 тыс. т.

2. Принятые Правила безопасности категории метановой опасности шахт по величине относительной газообильности в условиях применения высокопроизводительной угледобывающей подземной техники следует считать необоснованными показателями, поскольку они не отражают фактической опасности по газу при интенсивном ведении подземных горных работ на метаноносных пластах угля.

3. Категорию угольной шахты по степени ее метановой опасности необходимо устанавливать по величине абсолютной метанообильности горных выработок, показывающей, какие фактические объемы метана выделяются в горные выработки в единицу времени, т. е. по показателю интенсивности выделения метана в минуту.

Библиографический список

- Zhengdong Liu, Yuanping Cheng, Jingyu Jiang, Wei Li, Kan Jin. Interactions between coal seam gas drainage boreholes and the impact of such on borehole patterns // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2017. Vol. 38. P. 597–607.
- Yankui Li, Shiyue Wu, Baisheng Nie, Yankun Ma. A new pattern of underground space-time tridimensional gas drainage: A case study in Yuwu coal mine, China // Energy Science & Engineering. 2019. Vol. 7. Iss. 2. P. 399–410.
- Kędzior S., Dreger M. Methane occurrence, emissions and hazards in the Upper Silesian Coal Basin, Poland // International Journal of Coal Geology. 2019. Vol. 211. 103226. DOI: 10.1016/j.coal.2019.103226
- Karacan C. Ö., Warwick P. D. Assessment of coal mine methane (CMM) and abandoned mine methane (AMM) resource potential of longwall mine panels: Example from Northern Appalachian Basin, USA // International Journal of Coal Geology. 2019. Vol. 208. P. 37–53.
- Артемова В. Б. АО «СУЭК». Подземные горные работы, динамика развития // ГИАБ. 2018. Спец. выпуск 48. Подземная угледобыча XXI век-1. С. 13–22.
- Денисенко В. П. Некоторые вопросы возможности снятия ограничения нагрузки на очистной забой по газовому фактору // ГИАБ. 2018. № 10. С. 100–109.
- Федоров Е. В. Экспериментальная оценка газоносности пласта Болдыревский на шахте им. С. М. Кирова // ГИАБ. 2018. Спец. выпуск 49. Подземная угледобыча XXI век-2. С. 158–164.
- Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах». – 5-е изд., испр. и доп. – М. : ЗАО «НТЦ исследований проблем промышленной безопасности», 2017. Сер. 05. Документы по безопасности, надзорной и разрешительной деятельности в угольной промышленности. Вып. 40. – 198 с.
- Харченко А. В., Забурдяев В. С. Метанообильность шахт и категории их опасности по метану // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках : матер. XXVI Междунар. науч. школы им. акад. С. А. Христиановича. – Симферополь : Крымский федеральный ун-т им. В. И. Вернадского, 2016. С. 201–204.
- Инструкция по определению и прогнозу газоносности угольных пластов и вмещающих пород при геологоразведочных работах. – М. : Недра, 1977. – 96 с.
- Забурдяев Г. С. Природные причины взрывов гибридных смесей в шахтах // Охрана труда и социальное страхование. 2000. № 4. С. 39–42.
- Забурдяев В. С. Прогноз и предотвращение рисков формирования взрывоопасных смесей в угольных шахтах // Безопасность труда в промышленности. 2019. № 6. С. 65–69.
- Забурдяев Г. С. О предупреждении взрывов метано- и пылевоздушных смесей в угольных шахтах // Уголь. 2003. № 10. С. 36–41.
- Забурдяев Г. С. Фрикционное искрение как источник воспламенения метана и способы его предотвращения // ГИАБ. 2005. Тематическое приложение. Аэрология. С. 206–213.
- Clark J. Far East Energy pressing big CBM schemes in China // Oil & Gas Journal. 2004. Vol. 102. No. 33. P. 24–26.
- Petzet A. Coal gas down under // Oil and Gas Journal. 2003. Vol. 101. No. 8. P. 17. 

«GORNYI ZHURNAL», 2022, № 3, pp. 58–63
DOI: 10.17580/gzh.2022.03.09

Methane hazard in high-productive coal mine

Information about authors

V. S. Ziburdyayev¹, Leading Researcher, Doctor of Engineering Sciences

A. V. Kharchenko¹, Senior Researcher, Candidate of Engineering Sciences, av-kharchenko@yandex.ru

¹Academician Melnikov Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract

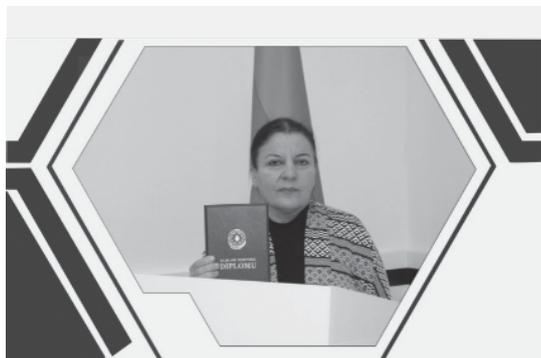
Extensive underground mining of gas-bearing coal seams is carried out mainly in the Kuznetsk Coal Basin and the Vorkuta deposit of the Pechora Basin, where the coal seam methane content is from 8 to 21.2 m³/t. At the average daily longwall productivity of 4100–13075 tons, methane emission in the longwalls varies from 18.8 to 113.1 m³/min. The influence of partings and longwall advance velocity in coal seams on the degree of natural degassing of contiguous seams is shown. The use of a package of gas drainage methods and schemes in contiguous coal seams and in mined-out areas changes the structure of the gas balance in a mine. An increase in the rate of methane release into the mined-out void is associated with the main coal roof subsidence, which causes stress relaxation in contiguous coal seams and also contributes to fracture of strong floor rocks and to liberation of methane accumulated in the voids in the floor rocks. The current assessment procedure of methane hazard category of a mine based on the methane emission rate longwalls with high-performance coal mining equipment fails to meet mining safety by gas criterion. At high longwall outputs, methane content in longwalls decreases and, according to the accepted assessment procedure of methane hazard, puts them on a lower hazard level, which leads to the underestimation of the role of the gas factor in underground mining. It is recommended to classify methane hazard of high-productive coal mines by the absolute methane emission value.

Keywords: mines, seam, coal mining, methane content, longwall, methane hazard, mine category.

References

- Zhengdong Liu, Yuanping Cheng, Jingyu Jiang, Wei Li, Kan Jin. Interactions between coal seam gas drainage boreholes and the impact of such on borehole patterns. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2017. Vol. 38. pp. 597–607.
- Yankui Li, Shiyue Wu, Baisheng Nie, Yankun Ma. A new pattern of underground space-time tridimensional gas drainage: A case study in Yuwu coal mine, China. *Energy Science & Engineering*. 2019. Vol. 7, Iss. 2. pp. 399–410.
- Kędzior S., Dreger M. Methane occurrence, emissions and hazards in the Upper Silesian Coal Basin, Poland. *International Journal of Coal Geology*. 2019. Vol. 211. 103226. DOI: 10.1016/j.coal.2019.103226
- Karacan C. Ö., Warwick P. D. Assessment of coal mine methane (CMM) and abandoned mine methane (AMM) resource potential of longwall mine panels: Example from Northern Appalachian Basin, USA. *International Journal of Coal Geology*. 2019. Vol. 208. pp. 37–53.
- Artemev V. B. JSC SUEK. Underground mining, dynamics of development. *GIAB*. 2018. Special issue 48. Underground coal mining in the 21st century-1. pp. 13–22.
- Denisenko V. P. Some aspects of removability of face output constraint with respect to gas criterion. *GIAB*. 2018. No. 10. pp. 100–109.
- Fedorov E. V. Experimental assessment of gas content of Boldyrevsky seam in Kirov Mine. *GIAB*. 2018. Special issue 49. Underground coal mining in the 21st century-2. pp. 158–164.
- Federal Rules and Regulations in industrial safety: Coal Mine Safety Regulations. 5th enlarged and revised edition. Moscow : Nauchno-tehnicheskiiy tsentr issledovaniy problem promyshlennoy bezopasnosti, 2017. Series 05. Documents for safety, permitting and supervisory actions in coal industry. Iss. 40. 198 p.
- Kharchenko A. V., Ziburdyayev V. S. Methane content and methane hazard category of mines. *Deformation and Fracture of Defective Materials and Dynamic Phenomena in Rocks and in Underground Openings: XXVI Academician Khristianovch School Proceedings*. Simferopol : Krymskiy federalnyi universitet im. V. I. Vernadskogo, 2016. pp. 201–204.
- Guidance on Gas Content Assessment Prediction in Coal Seams and Enclosing Rock Mass during Geological Exploration. Moscow : Nedra, 1977. 96 p.
- Ziburdyayev G. S. Natural causes of explosions of hybrid mixtures in mines. *Okhrana truda i sotsialnoe strakhovanie*. 2000. No. 4. pp. 39–42.
- Ziburdyayev V. S. Predicting and preventing origination of explosive mixtures in coal mines. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*. 2019. No. 6. pp. 65–69.
- Ziburdyayev G. S. Prevention of explosions of methane– and dust–air mixtures in coal mines. *Ugol*. 2003. No. 10. pp. 36–41.
- Ziburdyayev G. S. Frictional sparking as a methane inflammation source and the prevention activities. *GIAB*. 2005. Special Topic Auxiliary Book. Aerology. pp. 206–213.
- Clark J. Far East Energy pressing big CBM schemes in China. *Oil & Gas Journal*. 2004. Vol. 102, No. 33. pp. 24–26.
- Petzelt A. Coal gas down under. *Oil and Gas Journal*. 2003. Vol. 101, No. 8. p. 17.

ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ



В 2021 г. член редакционной коллегии «Горного журнала» **З. Дж. Эфендиева** в Азербайджанском государственном университете нефти и промышленности **успешно защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук** по теме «Создание классификационных моделей горных пород для рациональной разработки месторождений полезных ископаемых Азербайджана», специальность 2524.01 «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр». 28 января 2022 г. Высшей аттестационной комиссией при Президенте Азербайджанской Республики ей выдан диплом о присвоении ученой степени доктора технических наук.

Редакционная коллегия и редакция «Горного журнала» от всей души поздравляют Зарифу Джahanqир кызы с этим знаменательным событием и желают ей дальнейших творческих поисков, новых научных достижений и высокой востребованности идей и разработок.

ЗАЩИЩЕННОСТЬ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ОТ ГЛУБИННОГО ИСТОЧНИКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИ ОТРАБОТКЕ УРАНОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДОБРОВОЛЬНОЕ СЕРНОКИСЛОТНЫМ СКВАЖИНЫМ ПОДЗЕМНЫМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕМ

И. Н. СОЛОДОВ, директор программ инновационного и технологического развития, д-р геол.-минерал. наук, INSolodov@armz.ru

АО «Атомредметзолото», Москва, Россия

Введение

АО «Далур» осуществляет разработку идентичных по геологическому строению и гидрогеологическим условиям гидрогенных месторождений урана Далматовское (Далматовский р-н), Хохловское (Шумихинский р-н) и Добровольное (Звериноголовский р-н) в Курганской обл. [1]. Месторождение Далматовское находится на завершающей стадии отработки методом скважинного подземного выщелачивания (СПВ). Хохловское месторождение обрабатывают СПВ на активной стадии процесса. На месторождении Добровольное в 2020 г. завершены геологоразведочные работы по переводу ресурсов и запасов в промышленные категории C_1 и C_2 . Начаты обустройство полигона СПВ для опытно-промышленных геотехнологических испытаний и строительство локальной установки переработки продуктивных растворов.

Освоение месторождения Добровольное методом СПВ вызвало пристальный интерес населения Звериноголовского района Курганской области. Появилось множество антинаучных версий масштабного загрязнения водоносных горизонтов, смежных с рудоносным водоносным горизонтом, вплоть до загрязнения подземных вод в подрусовых отложениях р. Тобол. В связи с этим доказательство экологической безопасности отработки этого месторождения методом СПВ – весьма актуальная проблема [2, 3].

Геозкологические аспекты исследований

Защищенность подземных вод при отработке вышеуказанных месторождений (**рис. 1**) обеспечивается двумя группами факторов – природных и техногенных. Среди природных факторов главными являются геофильтрационные (интенсивность

Приведены доказательства геофильтрационной и геохимической природной защищенности подземных вод от глубинного (550–600 м) источника загрязнения, формирующегося в процессе отработки рудных залежей гидрогенного уранового месторождения Добровольное (Курганская область) сернокислотным скважинным подземным выщелачиванием. Описаны способы защиты подземных вод путем применения надежной конструкции технологических скважин.

Ключевые слова: урановое месторождение, геозкология, геологическая среда, защитные свойства, техногенная защищенность, скважинное подземное выщелачивание, уранодобывающее предприятие

DOI: 10.17580/gzh.2022.03.10

водообмена в эксплуатируемом водоносном горизонте, водоупорность пород, отделяющих этот горизонт от смежных с ним в разрезе водоносных горизонтов), геохимические (нейтрализационная, восстановительная и сорбционная емкости пород) и биогеохимические (естественная подземная микрофлора) защитные свойства геологической среды, а к техногенным относятся сохранение природного фона радиоактивности в недрах, а также надежность конструкции технологических скважин и наземной трубопроводной системы, исключающие утечки технологических растворов в недрах и на поверхности земли. Далее приводятся количественные оценки перечисленных факторов.

Геозкологические исследования на урановых месторождениях Зауральяского рудного района (см. рис. 1) проводят на всех стадиях освоения: в период геологоразведочных работ, во время отработки и завершения эксплуатации месторождений урана методом СПВ. Их целью является обоснование экологической безопасности и предотвращение опасных экологических последствий при применении данной технологии отработки месторождений. В этих исследованиях в разное время принимали участие специалисты ИГЕМ РАН, ВСЕГИНГЕО, ВИМС и ФГБУ «Гидроспецгеология».

Обоснованию защищенности геологической среды от подземного источника загрязнения, формирующегося в ходе извлечения урана из руд на месте залегания в рудоносном водоносном горизонте, и посвящена данная статья.

Урановое месторождение Добровольное – локальная геозкологическая система

Опасения в части негативного воздействия разработок на состояние Тобольского артезианского бассейна не соответствуют 50-летнему опыту промышленного применения СПВ для добычи урана из руд гидрогенных месторождений в России, Австралии, Казахстане, США, Узбекистане и Украине [4–6].

Площадь месторождения Добровольное (32,1 км²), расположенного в южной части Тобольского артезианского бассейна (370 тыс. км²), занимает от его территории всего лишь $8,7 \cdot 10^{-5}$ часть. Многолетними наблюдениями в скважинах экологического мониторинга и в результате применения метода бурения контрольных скважин с керном в процессе отработки урановых рудных залежей сернокислотным СПВ в Узбекистане и Казахстане [4, 7, 8], а также при отработке месторождений Далматовское [9] и Хохловское [10], доказано, что в процессе добычи урана растекание технологических растворов за контуры эксплуатируемых залежей не превышает 150 м. Растекание растворов в основном обусловлено нарушением баланса закачиваемых-откачиваемых растворов. Его трудно выявить редкой сетью наблюдательных скважин [11]. Поэтому на помощь экологами приходит компьютерное геозкологическое моделирование [12, 13], с помощью которого надежно выявляют и устраняют утечки растворов за контуры балансовых руд урановых залежей.

Защитные геофильтрационные свойства геологической среды

В гидрогеологическом разрезе месторождения снизу вверх залегают шесть водоносных горизонтов [9]: палеозойский в трещиноватых породах скального основания; рудоносный средневерхнеюрский, мысовский, камышловский, серовский и олигоцен-четвертичный.

Геофильтрационная защищенность от локального техногенного источника загрязнения по латерали эксплуатируемого средневерхнеюрского водоносного горизонта зависит от интенсивности водообмена, а защищенность четырех вышележащих водоносных горизонтов – от надежности разделяющих их водоупорных толщ, которую оценивают коэффициентом перетока подземных вод через водоупор (отношение коэффициента фильтрации водоупора к его мощности).

По интенсивности водообмена, которая оценена по величине уклона пьезометрической поверхности подземных вод, в рассматриваемой водонапорной системе выделены зоны: активного (0,0л, серовский и олигоцен-четвертичный горизонты); замедленного (0,00л, камышловский и мысовский горизонты) и весьма замедленного (0,000л, палеозойский и средневерхнеюрский горизонты) водообмена (табл. 1). По аналогии с месторождением Далматовское [9] действительная скорость фильтрации подземных вод в естественных условиях составляет первые сантиметры в год и не способствует миграции техногенных загрязнителей от локального источника загрязнения на значительное расстояние. При

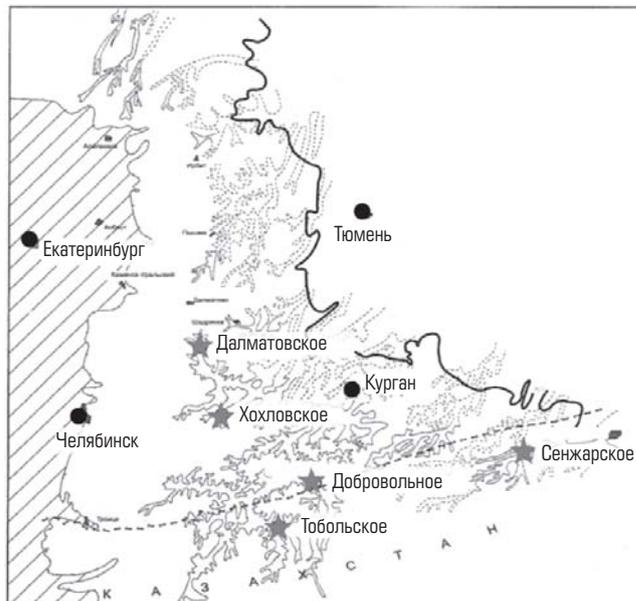


Рис. 1. Гидрогенные месторождения урана палеодолиного типа в Зауральском ураново-рудном районе [4]

продолжительности отработки месторождения 25 лет смещение техногенных сернокислых растворов естественным потоком подземных вод во время эксплуатации месторождения не превысит нескольких метров. После завершения процесса СПВ линза остаточных сернокислых растворов, как будет обсуждено далее, подвергается автоочистке под действием защитных геохимических свойств, которая длится до 80 лет. И даже в этом случае перемещение этой линзы произойдет не более чем на десятки метров. Ни о каком масштабном загрязнении эксплуатируемого водоносного горизонта не может быть и речи.

Все водоносные горизонты изолированы водоупорными толщами, основные характеристики которых приведены в табл. 1. Оценка коэффициента перетока, изменяющегося от 10^{-3} до 10^{-7} сут⁻¹, выполнена исходя из их фацциально-литологических особенностей пород, а для водоупора, перекрывающего рудоносный горизонт, осуществлены дополнительные расчеты с использованием результатов опытно-фильтрационных работ.

О надежности изолирующих свойств водоупорных толщ также свидетельствует четко выраженная вертикальная гидрогеохимическая зональность (табл. 2), которая проявляется в возрастании с глубиной: минерализации подземных вод от 1,1 г/л в олигоцен-четвертичном водоносном горизонте до 12,9 г/л в рудоносном средневерхнеюрском горизонте; в смене в этом направлении окислительной (Eh +150 мВ) и восстановительной (Eh –240 мВ) обстановки; в изменении химического состава от гидрокарбонатно-кальциевого до хлоридно-натриевого.

Таблица 1. Геофильтрационные свойства и параметры водоносных горизонтов и водоупорных толщ в районе месторождения Добровольное

Водообмен	Геологический индекс	Водоносный горизонт	Кoeffициент фильтрации, м/сут	Водоупорная толща	Кoeffициент перетока, сут ⁻¹	Литологический состав толщи	Мощность, м		
Активный	Q	Аллювиальный четвертичный	6	0,1–20,0			Пески, галечники, суглинки, глины	5–50	
	N ₂ -Q	Озерно-аллювиальный плиоцен-четвертичный					0,01–1	Пески, глины, опоки, мергели	2–10
	P _{3тгр}	Олигоценый					0,01–5	Пески, глины, реже – алевролиты и галечники	2–20
	P _{2-3сг}			Чеганская свита	V	10 ⁻⁵ –10 ⁻⁷	Глины листовато-слоистые	10–25	
	P _{2ir}			Ирбитская свита		10 ⁻³ –10 ⁻⁶	Глины, опоквидные диатомиты	15–25	
Активный	P _{2сг}	Серовский	5	0,1–5			Опоки, реже песчаники	15–25	
	P _{2tl}				Талицкая свита	IV	Глины запесоченные	3–10	
	K _{2gn}				Ганькинская свита		Мергели	40–60	
Замедленный	K _{2zk-km}	Зайковский и Камышовский	4	0,2–0,7			Песчаники, реже – пески, опоки	10–50	
	K _{2kz}				Кузнецовская свита	III	10 ⁻⁵ –10 ⁻⁷	Глины	15–50
Замедленный	K _{2msv}	Мысовский	3	0,5–10			Пески, гравелиты	15–60	
	J _{3ks}				Коскольская свита	II	10 ⁻⁵ –10 ⁻⁷	Глины, алевриты, прослой песков	30–100
Весьма замедленный (застойный)	J _{2-3tb}	Средневерхнеюрский (рудноносный)	2	3,6–5,7			Песок, песчаники, галечники, прослой глин и алевролитов	30–100	
	Pz	Глинистая кора выветривания скального основания			Глинистая кора выветривания скального основания	I	10 ⁻³ –10 ⁻⁵	Глины, алевриты	50
Весьма замедленный (застойный)	Pz	Палеозойский	1	0,3–1,8			Трещиноватые известняки, песчаники, туфопесчаники, гранитоиды	Вскрытая мощность 50–100	

Наличие вертикальной гидрогеохимической зональности доказывает отсутствие перетоков подземных вод через водоупорные толщи.

Весьма замедленный водообмен в рудоносном средневерхнеюрском водоносном горизонте подтверждает присутствие слабаразбавленных древних морских вод хлоридно-натриевого состава [14].

Защитные геохимические свойства геологической среды

Руды месторождения по содержанию урана бедные – 0,0л % и, соответственно, слаборадиоактивные – 2–5 Бк/г. Подземные воды рудоносного средневерхнеюрского водоносного горизонта не пригодны для питьевого, хозяйственного и технического водоснабжения из-за высокой минерализации

и не используются для этих целей на всей территории Курганской области. Из 18 естественных радиоактивных изотопов, образующихся при распаде урана, наиболее опасными являются ²¹⁰Pb, ²¹⁰Po, ²²⁶Ra, ²²⁷Ac, ²³⁰Th и ²³²Th. Поэтому даже пресные подземные воды в районе урановых рудных залежей не пригодны для водопользования.

При использовании разбавленных растворов серной кислоты (5–25 г/л) при СПВ ее расход на растворение урана незначительный – доли процента, тогда как основная его доля приходится на вмещающие уран терригенные отложения (преимущественно пески). В результате из пород извлекают значительную массу петрогенных элементов, из которых выше ПДК питьевых вод в убывающем порядке по содержанию присутствуют: Al, Fe, Mg, Ca, Na, U, Si, Zn, P, K, Mn, Ti, Sr, Ce, Y, La, V, Li, Cr, Ni, Th, Be, Pb, Sn, Sb, Cd, Zr. В составе остаточных сернокислых

Таблица. 2. Химический состав речных и подземных вод в районе месторождения Добровольное

Гидрогеологический этаж и интенсивность водообмена		Речные и подземные воды. Водоносные горизонты		Химический состав	Cl ⁻ , г/л	pH	
Верхний	Зона активного водообмена	р. Тобол		0,18 $\frac{\text{HCO}_3\text{70Cl19SO}_4\text{11}}{\text{Ca65Mg23Na12}}$	0,017		
		Олигоцен-четвертичный водоносный горизонт		1,1 $\frac{\text{Cl57HCO}_3\text{36SO}_4\text{7}}{\text{Mg57Ca32Na11}}$	0,35	7,2	
		Палеоцен-зоценовый водоносный горизонт		1,5 $\frac{\text{Cl64SO}_4\text{26HCO}_3\text{10}}{\text{Na56Mg26Ca18}}$	0,54	7	
Нижний	Зона замедленного водообмена	Верхнемеловой водоносный комплекс	Водоносный горизонт зайковской и камышовской свит	7,5 $\frac{\text{Cl85SO}_4\text{11HCO}_3\text{4}}{\text{Na60Mg22Ca18}}$	3,5	7,5	
			Мысовский водоносный горизонт				
	Зона весьма замедленного водообмена	Средневерхнеюрский комплекс	Средневерхнеюрский водоносный горизонт		12,9 $\frac{\text{Cl95SO}_4\text{4HCO}_3\text{1}}{\text{Na85Ca8Mg7}}$	7,4	7,5
			Палеозойский водоносный комплекс		8,9 $\frac{\text{Cl89SO}_4\text{9HCO}_3\text{2}}{\text{Na68Mg19Ca9}}$	4,8	7,5

растворов также отмечены в концентрациях выше ПДК техногенные компоненты SO_4 , NO_3 и NH_4 .

Остающиеся после прекращения СПВ линзы остаточных сернокислых сульфатных железоалюмомагниевого растворов с большим количеством потенциальных загрязнителей незначительно превышают размеры отработанных урановых залежей. Однако их химический состав не остается неизменным на протяжении длительного времени. Происходит их автоочистка как внутри линз, так и при их смещении естественным потоком в область не измененных техногенезом терригенных отложений под действием защитных геохимических свойств геологической среды. Эти свойства включают наличие биоактивной естественной подземной микрофлоры, нейтрализационную, восстановительную и сорбционную емкости горных пород.

Многолетними натурными гидрогеохимическими наблюдениями после отработки методом СПВ рудных залежей месторождений Далматовское, Южный и Северный Букиной [4], Бешкак, Канжуган [7], Ирколь [8] и Учкудук установлено, что под действием нейтрализационной емкости алюмосиликатных и карбонатных минералов происходят нейтрализация серной кислоты от pH = 1,5 до pH = 6÷7 и осаждение сульфата в составе гипса, барита, ярозита и алуниита. Также при нейтрализации переходят в твердую фазу элементы-гидролизаты — Al, Fe(III), Ti, Zn, Cr, Th, Be, Sn, Cd, Zr. Магний и фосфор осаждаются в составе ньюбериита и вивианита. При смещении линзы естественным потоком подземных вод в область техногенно неизмененных песчаных отложений, помимо нейтрализационного геохимического барьера, формируется восстановительный геохимический барьер, в области которого происходит восстановительное осаждение F(II), Cu, Zn, Ga, As, Se, Cd, Sn, Sb, Te, Hg, Pb и Bi.

В автоочистке остаточных сернокислых растворов существенную роль играет естественная подземная микрофлора — денитрифицирующие и сульфатредуцирующие бактерии. Их

высокая биохимическая активность в рудоносном средневерхнеюрском водоносном горизонте доказана микробиологическими исследованиями керна разведочных и контрольных скважин на месторождениях Далматовское и Хохловское [10]. Есть все основания полагать, что они столь же активны на месторождении Добровольное. Денитрифицирующие бактерии полностью перерабатывают техногенный нитрат в газообразный азот, а сульфатредуцирующие превращают сульфат в сероводород, который связывается с Fe(II), Cu, Zn, Cd, Sn, Hg, Pb и осаждается в виде сульфидов.

Техногенная защищенность геологической среды

Еще одним фактором, который исключает загрязнение технологических скважин и наземного оборудования радиоактивным ^{226}Ra , является сохранение основной радиоактивности на месте залегания выщелоченных урановых руд. Радий с сульфатом серной кислоты образует труднорастворимое соединение. Его сульфаты в виде собственных минералов не обнаружены, так как по массе его в подземных водах и растворах выщелачивания крайне мало — до $40,4 \cdot 10^{-11}$ г/л [4]. Однако он постоянно присутствует в составе радиоактивных гипса и барита.

Доказательством того, что основная радиоактивность при СПВ сохраняется в недрах, является сравнение прямого определения остаточного содержания урана в рудах методом каротажа нейтронов мгновенного деления (КНМД) и рассчитанной фиктивной концентрации урана через коэффициент радиоактивного равновесия между ураном и радием ($K_{pp} = 1$) традиционным методом гамма-каротажа (ГК) (рис. 2) [15]. В исходных рудах при равновесии $K_{pp} \approx 1$. Данный метод позволяет реконструировать по ГК исходные концентрации урана в рудах. В выщелоченных рудах в результате выноса урана и сохранения радия на месте залегания равновесие смещается в сторону Ra и K_{pp} и может достигать 190 отн. ед. [15], что и приводит к получению фиктивных содержаний урана в рудах при

оценке по ГК. Гамма-аномалия по интенсивности не меняется до и после выщелачивания урана.

Защищенность подземных вод от глубинного источника загрязнения также зависит от надежности конструкции технологических закачных и откачных скважин. До недавнего времени в качестве материала обсадных труб в этих скважинах применяли полиэтилен низкого давления (ПНД). У этих труб масса недостатков: отсутствие адгезии с цементом, используемым для заколонной гидроизоляции скважин, а также с клеями различных марок для обеспечения гидроизоляции резьбовых соединений; большой коэффициент линейного расширения; короткий срок старения и потеря прочности полиэтилена через 7 лет; наличие его плотности ниже плотности воды. В связи с этим для сооружения гидрогеологических и технологических скважин выбрана надежная конструкция и новый материал обсадных труб – непластифицированный поливинилхлорид [16]. Этот материал лишен недостатков, присущих ПНД.

Техническое состояние технологических скважин регулярно проверяют скважинными геофизическими методами – расходомерией, токовым и индукционным каротажем.

Заключение

В заключение необходимо сформулировать основные принципы обращения с остаточными сернокислыми растворами СПВ и защищенности подземных вод.

1. Линзы остаточных сернокислых растворов, повторяющие контуры рудных залежей, относят к маломасштабным (локальным) геоэкологическим системам.

2. Природные подземные воды на урановых гидрогенных месторождениях изначально загрязнены продуктами радиоактивного распада (^{210}Po , ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{227}Ac , ^{230}Th , ^{232}Th) и стабильными элементами – спутниками урана (сероводород, селен, мышьяк, молибден, ванадий, бром, фтор, железо, марганец и хром), поэтому непригодны для питьевого, хозяйственного и технического водоснабжения.

3. Метод СПВ очищает недра от радиоактивности, так как при этом удаляется длительно существующий источник радиоактивности – уран с периодом полураспада 4,6 млрд лет.

4. Низкая скорость движения подземных вод в рудоносном средневерхнеюрском водоносном горизонте не способствует масштабному загрязнению подземных вод (геофильтрационная защищенность).

5. Наличие верхнего водоупора с весьма низким коэффициентом перетока 10^{-5} – 10^{-7} сут $^{-1}$ препятствует перетеканию техногенных вод в выщелачивающие водоносные горизонты (геофильтрационная защищенность).

6. При использовании СПВ в водоносные горизонты искусственно вносят сульфат, нитрат и аммоний, все остальные компоненты являются петрогенными, извлеченными из горных пород, которые при автоочистке обратно возвращаются в горные породы.

7. Автоочистку линз остаточных растворов начинают с момента прекращения СПВ и осуществляют внутри линз и при

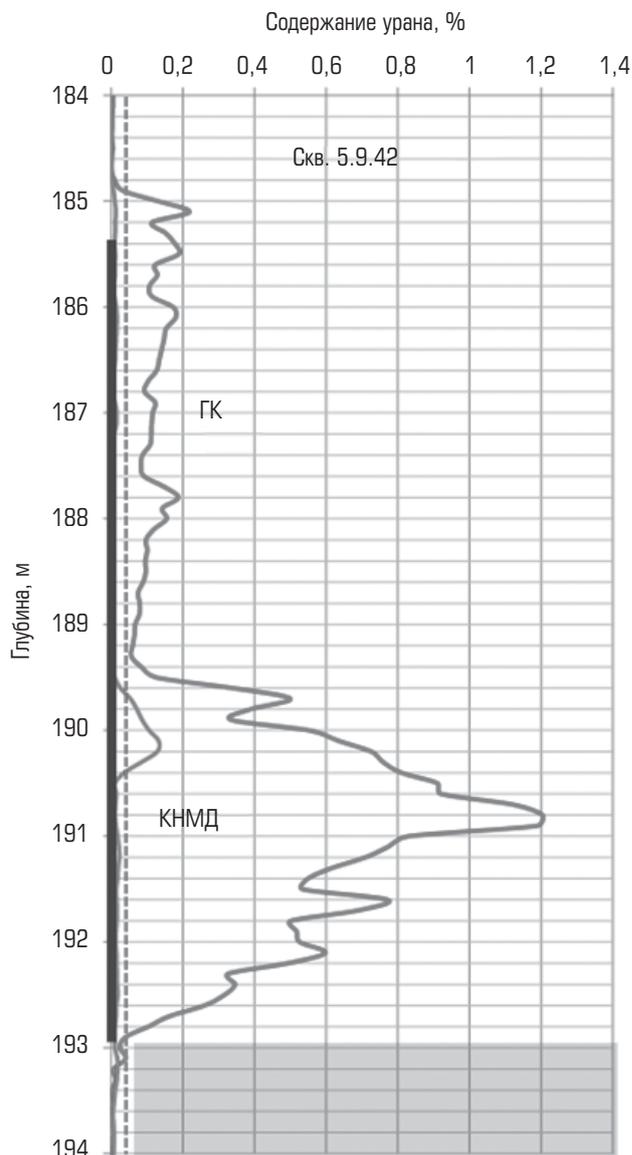


Рис. 2. Сопоставление фактического содержания урана в рудах, определенное методом КНД, с фиктивным содержанием по ГК. Пунктиром показана граница балансовых урановых руд >0,01 %

их смещении естественным потоком подземных вод в область неизменных осадочных пород.

8. Миграции загрязнителей в составе остаточных растворов препятствует комплексный сорбционно-восстановительно-нейтрализационный геохимический барьер.

9. Глубина, масштабы и продолжительность автоочистки растворов оценивают методом экологического мониторинга подземных вод в наблюдательных скважинах;

10. Очистка остаточных растворов от искусственных и петрогенных техногенных веществ на поверхности химическими методами приведет к масштабному загрязнению земной поверхности.

Библиографический список

1. Машковцев Г. А., Константинов А. К., Музута А. К., Шумилин М. В., Щеточкин В. Н. Уран российских недр. – М.: ВИМС, 2010. – 850 с.
2. Uranium Production Cost Study – 2021: Special Report / Ux Consulting, 2021. URL: <https://www.uxc.com/p/products/pdf/Flier-UPCS.pdf> (дата обращения: 15.02.2022).
3. Кононов А. В., Гончаренко С. Н., Асанов Д. А., Масленников О. О. Исследование ультразвукового воздействия на ионообменные процессы при производстве урана методом подземного скважинного выщелачивания // Цветные металлы. 2020. № 4. С. 50–57. DOI: 10.17580/tsm.2020.04.06
4. Подземное выщелачивание полиэлементных руд / под ред. Н. П. Лаверова. – М.: Изд-во Академии горных наук, 1998. – 445 с.
5. In Situ Leach Uranium Mining: An Overview of Operations. IAEA Nuclear Energy Series. No. NF-T-1.4. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2016. – 76 p.
6. Seredkin M. Overview of In-Situ Recovery for non-uranium metals. – Alta, 2019. – 26 p.
7. Oryngozhin E. S., Fedorov E. V., Alisheva Zh. N., Mitishova N. A. In-situ leaching technology for uranium deposits // Eurasian Mining. 2021. No. 2. P. 31–35. DOI: 10.17580/em.2021.02.07
8. Язиков В. Г., Забазнов В. Л. Вопросы геоэкологии при подземном скважинном выщелачивании урана // ГИАБ. 2003. № 7. С. 236–239.
9. Геоэкологический паспорт уранового месторождения Далматовское: отчет. – М., 1993. – 118 с.
10. Величкин В. И., Солодов И. Н., Дойникова О. А., Нестерова М. В., Черток М. Б. и др. Изучение геохимических и минералогических особенностей урановых руд месторождения Хохловское // Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов: информационный сб. – М., 2009. № 154. С. 69–93.
11. Caruso D., Vepsalainen M., McGregor K., Miao Chen, Marley D. et al. Trials at Depth with Vesi™ – A New Ground Water Monitoring Technology for ISR Operations // Alta 2020 Online Conference. – Perth, Australia, 2020. P. 88–99.
12. Носков М. Д., Бабкин А. С., Кеслер А. Г. и др. Экологический мониторинг и прогнозирование состояния недр при добыче урана методом скважинного подземного выщелачивания // Актуальные проблемы урановой промышленности: сб. тр. VII Междунар. науч.-практ. конф. – Алматы, 2014. С. 355–361.
13. Noskov M., Solodov I., Kesler A., Terovskaya T. Groundwater contamination and self-purification at uranium production by the in-situ leaching process // International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environmental Issues (URAM-2018). – Vienna, 2018. P. 307–310.
14. Ковальчук А. И. Особенности структурной гидрогеологии Тобольского артезианского бассейна // Химический состав и ресурсы подземных вод Предуралья и Зауралья: сб. науч. тр. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. С. 79–88.
15. Миносьянц А. Р., Солодов И. Н., Гурьев Е. А. Применение каротажа мгновенных нейтронов на разных стадиях освоения урановых месторождений методом СПВ // Разведка и охрана недр. 2019. № 7. С. 22–30.
16. Арсентьев Ю. А., Назаров А. П., Забайкин Ю. В., Иванов А. Г. О расчете эксплуатационных колонн из полимерных материалов для условий многолетнемерзлых пород // Научное обозрение. Актуальные проблемы и перспективы развития экономики: российский и зарубежный опыт. 2019. № 21. С. 27–32. 

«GORNYI ZHURNAL», 2022, № 3, pp. 64–69
DOI: 10.17580/gzh.2022.03.10

Protection of groundwater from deep pollution source in in situ sulfuric acid uranium leach at Dobrovolnoe deposit

Information about author

I. N. Solodov¹, Director of Innovation and Technological Advance Programs, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, INSolodov@armz.ru

¹Atomredzoloto, Moscow, Russia

Abstract

Dalur develops geologically and hydrogeologically similar uranium deposits Dolmatovskoe, Khokhlovskoe and Dobrovolnoe in the Kurgan Region. In 2020 at Dobrovolnoe deposit, geological exploration was completed, and an in situ leach testing ground construction was started. The activities included geochemical research aimed to analyze safety of groundwater from radioactive pollution. The implemented research proved geological inaccessibility and natural geochemical protection of groundwater from a deep (550–600 m) pollution source generated in the course of in situ sulfuric acid leach of hydrogenous uranium at Dobrovolnoe deposit. The methods of groundwater protection from pollution using full-safe design of process boreholes with casing made of unplasticized polyvinyl chloride resin.

Natural groundwater at hydrogenous uranium deposits are initially polluted with radioactive decomposition products (²¹⁰Po, ²¹⁰Pb, ²²⁶Ra, ²²⁷Ac, ²³⁰Th, ²³²Th) and stable components associated with uranium (hydrogen sulfide, selenium, arsenic, molybdenum, vanadium, bromine, fluorine, iron, manganese and chromium), and are therefore unsuitable for drinking and for domestic / industrial water supply. In situ leach method removes radioactivity by means of extraction of the long-living radioactivity source, namely, uranium which has a half-life period of 4.6 billion years. Low groundwater flow velocity in the ore-bearing middle – and upper Jurassic aquifer prevents from large-scale pollution of groundwater (geological inaccessibility). The upper-lying impervious stratum with a very low cross-flow index of 10^{-5} – 10^{-7} day⁻¹ impedes flow of manmade water in the upper-lying aquifers (geological inaccessibility). In situ leach the aquifers are artificially introduced with sulfate, nitrate and ammonium, the other petrogenic components extracted from rocks are given back to rock mass after auto-purification.

Keywords: uranium deposit, geoecology, geological medium, protective properties, manmade protectiveness, in situ leach, uranium mine.

References

1. Mashkovtsev G. A., Konstantinov A. K., Miguta A. K., Shumilin M. V., Shchetochkin V. N. Uranium Wealth of Russia. Moscow: VIMS, 2010. 850 p.

2. Uranium Production Cost Study – 2021: Special Report. Ux Consulting, 2021. Available at: <https://www.uxc.com/p/products/pdf/Flier-UPCS.pdf> (accessed: 15.02.2022).
3. Kononov A. V., Goncharenko S. N., Assanov D. A., Maslennikov O. O. Research studying of ultrasonic effects on ion-exchange processes in uranium production by the in-situ leaching method. *Tsvetnye Metally*. 2020. No. 4. pp. 50–57. DOI: 10.17580/tsm.2020.04.06
4. Laverov N. P. (Ed.). Underground leaching of poly-element ores. Moscow: Izdatelstvo Akademii gornykh nauk, 1998. 445 p.
5. In Situ Leach Uranium Mining: An Overview of Operations. IAEA Nuclear Energy Series. No. NF-T-1.4. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2016. 76 p.
6. Seredkin M. Overview of In-Situ Recovery for non-uranium metals. Alta, 2019. 26 p.
7. Oryngozhin E. S., Fedorov E. V., Alisheva Zh. N., Mitishova N. A. In-situ leaching technology for uranium deposits. *Eurasian Mining*. 2021. No. 2. pp. 31–35. DOI: 10.17580/em.2021.02.07
8. Yazikov V. G., Zabaznov V. L. Issues of geoecology in in situ uranium leach. *GIAB*. 2003. No. 7. pp. 236–239.
9. Geoecological passport of Dalmatovskoe uranium deposit: Review. Moscow, 1993. 118 p.
10. Velichkin V. I., Solodov I. N., Doynikova O. A., Nesterova M. V., Chertok M. B. et al. Geochemical and mineralogical peculiarities of Khokhlovskoe uranium deposit. *Geology of Deposits of Uranium, Rare and Rare Earth Metals: Information Digest*. Moscow, 2009. No. 154. pp. 69–93.
11. Caruso D., Vepsalainen M., McGregor K., Miao Chen, Marley D. et al. Trials at Depth with Vesi™ – A New Ground Water Monitoring Technology for ISR Operations. *Alta 2020 Online Conference*. Perth, Australia, 2020. pp. 88–99.
12. Noskov M. D., Babkin A. S., Kesler A. G. et al. Ecological monitoring and prediction of subsoil behavior in in situ uranium leach. *Current Challenges of Uranium Industry: VII International Conference Proceedings*. Almaty, 2014. pp. 355–361.
13. Noskov M., Solodov I., Kesler A., Terovskaya T. Groundwater contamination and self-purification at uranium production by the in-situ leaching process. *International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environmental Issues (URAM-2018)*. Vienna, 2018. pp. 307–310.
14. Kovalchuk A. I. Features of structural hydrogeology of the Tobol artesian basin. *Chemical Composition and Resources of Groundwater in the West and East of the Ural: Collection of Scientific Papers*. Sverdlovsk: UNTs AN SSSR, 1986. pp. 79–88.
15. Minosyantz A. R., Solodov I. N., Gurulev E. A. Application of instantaneous fission neutron logging at different stages of in situ uranium mining. *Razvedka i okhrana nedr*. 2019. No. 7. pp. 22–30.
16. Arsentev Yu. A., Nazarov A. P., Zabaykin Yu. V., Ivanov A. G. Design of flow strings made of polymeric materials for permafrost rock mass. *Nauchnoe obozrenie. Aktualnye problemy i perspektivy razvitiya ekonomiki: rossiyskiy i zarubezhnyy opyt*. 2019. No. 21. pp. 27–32.

УДК 519.711.2:502:622.7

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ГОРНОРУДНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ*

В. Ф. СКОРОХОВ, ведущий научный сотрудник, д-р техн. наук

В. В. БИРЮКОВ, научный сотрудник

А. В. АРТЕМЬЕВ, научный сотрудник

Р. М. НИКИТИН, старший научный сотрудник, канд. техн. наук,
remnik@yandex.ru

Горный институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия

Введение

В настоящее время проблема очистки сточных вод горных предприятий является одной из наиболее актуальных. В результате работы этих предприятий ежегодно в природные водоемы сбрасываются большие объемы промышленных сточных вод, содержащие примеси, ухудшающие состояние водных экосистем, что неизбежно влечет за собой не только увеличение экологической нагрузки на окружающую среду, но и дополнительные расходы предприятий на штрафные санкции. Данный факт подтверждается практически неизменным объемом сбрасываемых загрязненных сточных вод при добыче полезных ископаемых в поверхностные водные объекты: 2014 г. – 813,2 млн м³, 2015 г. – 839,1 млн м³, 2016 г. – 801,3 млн м³. В сточных водах горнорудных предприятий присутствуют нефтепродукты, тонкодисперсные минеральные фазы и растворенные химические соединения, диссоциированные катионы металлов и анионы других химических элементов.

Для очистки сточных вод используют различные методы, которые подразделяются на механические, химические, биологические и физико-химические. Механическая очистка является, как правило, предварительным этапом и служит для подготовки сточных вод к биологическому, химическому или другому методу более глубокой очистки. Суть метода химической очистки сточных вод в том, что в резервуар со сточными водами добавляют реагенты, преобразующие смеси в труднорастворимый осадок, отделяемый от воды. Однако такая очистка имеет ряд недостатков, в том числе необходимость точного соблюдения строгой дозировки дорогостоящих реагентов, что делает этот процесс весьма трудоемким и затратным. При биологической очистке сточных вод органические загрязнения полностью окисляются при помощи аэробных бактерий. Основными недостатками данного метода являются необходимость удаления излишней биомассы, сложность поддержания популяции бактерий и сохранение их активности. К недостаткам также следует отнести высокие капитальные затраты, необходимость строгого соблюдения технологического режима очистки, токсичное действие на микроорганизмы некоторых органических соединений

Описываются разработанные в институте математические модели физических процессов, происходящих при очистке загрязненных вод горных предприятий.

Ключевые слова: математическое моделирование, агрегирование, флокуляция, адсорбция примесей, флотация, аэрация, вычислительный эксперимент, радиальный сгуститель

DOI: 10.17580/gzh.2022.03.11

и необходимость дополнительных мер очистки в случае высокой концентрации примесей.

В последние годы расширяется область применения физико-химических методов очистки, доля их среди других методов возрастает. Использование физико-химических методов имеет ряд преимуществ: возможность удаления из сточных вод токсичных, биохимически не окисляемых органических загрязнений; достижение более глубокой и стабильной степени очистки по сравнению с механической; меньшие размеры сооружений (по сравнению с механической очисткой); возможность полной автоматизации; более глубокая изученность кинетики процессов, происходящих при физико-химической очистке, а также вопросов моделирования, математического описания и оптимизации, что важно для правильного выбора и расчета аппаратуры; методы не связаны с контролем над деятельностью живых микроорганизмов, в отличие от биохимической очистки.

К одному из основных способов очистки сточных вод горнорудных предприятий можно отнести удаление взвешенных частиц и сфлуктурированных примесей путем их осаждения в открытых отстойниках, площадь которых рассчитывается по времени их оседания и достигает значительных величин, что затрудняет применение этого способа очистки из-за больших затрат, необходимых для создания очистных сооружений [1]. Применение фильтров из синтетических и природных материалов для очистки сточных вод горнорудных предприятий имеет ограничения, основным из которых является объем очищаемой воды [2]. Кроме того, при использовании сорбционных способов очистки образуются большие объемы отходов, подлежащих утилизации [3]. Достаточно эффективным способом повышения степени очистки сточных вод является флотация сфлуктурированных примесей и взвешенных частиц без предварительного осаждения.

Для очистки сточных вод горнорудных предприятий в Горном институте КНЦ РАН разработан способ очистки сточных вод, который реализуется при концентрировании загрязнений в многофазной системе с заранее сформированными поверхностными свойствами фаз и включает коагуляцию, сорбцию и флотацию [4, 5].

*В работе также принимала участие младший научный сотрудник А. С. Китаева.

В последнее время все более широкое применение находит компьютерное моделирование процессов очистки сточных вод. С его помощью многие, потенциально выполнимые решения могут быть оценены быстро и без большого числа экспериментальных исследований. Оно позволит устранить те решения, которые являются малоэффективными или экономически невыгодными.

Разработка технологического процесса очистки промышленных сточных вод заключается в подборе физических, химических и физико-химических методов в случае каждого конкретного предприятия и настройки их технологических параметров, что требует значительных затрачиваемых ресурсов. Для существенного сокращения стоимости, длительности и трудоемкости процесса разработки целесообразен подход, основанный на использовании методов математического и компьютерного моделирования – разработке виртуальных лабораторных стендов, позволяющих полностью воспроизвести технологические процессы и используемые аппараты. Компьютерное моделирование значительно облегчает модернизацию и контроль существующих способов очистки.

В Горном институте КНЦ РАН разработаны математические модели технологических процессов с использованием различных способов моделирования гидродинамики многофазных сред. Для описания химических реакций используются модели «структуры потоков», решение систем уравнений которых позволяет получить данные об их кинетике в объеме химических реакторов. Процессы разделения компонентов суспензий моделируют с использованием математического аппарата теории многофазного многоскоростного континуума и реализуют с использованием современных САД-, САМ- и САЕ-программных комплексов. В настоящей работе приведены модели некоторых процессов, которые можно использовать в технологии очистки сточных вод.

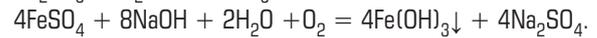
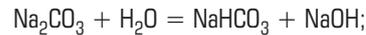
Математическое моделирование процессов агрегирования тонких частиц

Для повышения эффективности очистки сточных вод горнорудных предприятий необходим обоснованный выбор условий коагуляции. В качестве веществ, применяемых для этой цели, больше всего подходят недефицитные неорганические коагулянты, не способные накапливаться в очищаемой воде. Для данной работы в качестве коагулянта был использован железный купорос.

Процесс коагуляции состоит из следующих стадий: подачи воды с растворенными в ней примесями в контактный чан; подготовки, дозирования и смешивания реагентов; подачи подготовленных растворов реагентов в контактный чан; химической реакции между реагентами, приводящей к образованию коллоидных частиц гидроксида железа; сорбции растворенных примесей в очищаемой воде на поверхности образующихся коллоидных частиц; образования коллоидных частиц и формирования флоккул; флокации образованных коллоидных частиц и флоккул в активированных гетерополярными ПАВ газожидкостных смесях.

Модель изменения концентраций реагентов. В контактный чан, представляющий собой цилиндрическую емкость с мешалкой, подают растворы железного купороса FeSO_4 и карбоната натрия Na_2CO_3 . Последовательные химические реакции между

растворами, протекающие в контактном чане при перемешивании и приводящие к образованию дисперсной фазы, описываются уравнениями



При описании структуры гидродинамических потоков в контактном чане использована модель «идеального смешения», для которой изменение концентраций реагентов в реакции диссоциации натрия может быть выражено соотношениями [6, 7]

$$\frac{dc_{\text{Na}_2\text{CO}_3}}{dt} = -k_1 c_{\text{Na}_2\text{CO}_3};$$

$$\frac{dc_{\text{NaOH}}}{dt} = k_1 c_{\text{Na}_2\text{CO}_3},$$

а изменение концентраций реагентов в реакции образования гидроксида железа – соотношениями

$$\frac{dc_{\text{FeSO}_4}}{dt} = -k_2 c_{\text{FeSO}_4} c_{\text{NaOH}}^2;$$

$$\frac{dc_{\text{NaOH}}}{dt} = -2k_2 c_{\text{FeSO}_4} c_{\text{NaOH}}^2;$$

$$\frac{dc_{\text{Fe}(\text{OH})_3}}{dt} = 2k_2 c_{\text{FeSO}_4} c_{\text{NaOH}}^2,$$

где c_{FeSO_4} , c_{NaOH} – концентрации реагентов соответственно FeSO_4 и NaOH ; t – время реакции; $k_{1,2}$ – константы скорости реакции.

Тогда система уравнений концентраций реагентов (моль/с) в контактном чане выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} V \frac{dc_{\text{FeSO}_4}}{dt} = \nu_{\text{FeSO}_4} (c_{\text{FeSO}_4}^{\text{BX}} - c_{\text{FeSO}_4}) + G_{\text{FeSO}_4}; \\ \frac{dc_{\text{Na}_2\text{CO}_3}}{dt} = \nu_{\text{Na}_2\text{CO}_3} (c_{\text{Na}_2\text{CO}_3}^{\text{BX}} - c_{\text{Na}_2\text{CO}_3}) + G_{\text{Na}_2\text{CO}_3}; \\ \frac{dc_{\text{NaOH}}}{dt} = G_{\text{NaOH}}; \\ \frac{dc_{\text{Fe}(\text{OH})_3}}{dt} = G_{\text{Fe}(\text{OH})_3}, \end{cases}$$

где ν – расходы реагентов; c^{BX} – начальные концентрации; G – производительность источника реагента.

При этом оценка сорбционной емкости тонкодисперсного гидроксида железа может быть основана на следующих исходных данных:

$$\mu_{\text{Fe}(\text{OH})_3} = 0,1069 \text{ кг/моль}; \quad d \leq 100 \text{ нм}; \quad \rho_{\text{Fe}(\text{OH})_3} = 3400 \div 3900 \text{ кг/м}^3,$$

где μ – сорбционная емкость; d , ρ – диаметр и плотность частиц образующегося гидроксида железа соответственно.

Модель процесса изменения концентраций компонентов загрязняющих примесей. За основу взята модель идеального смешения структуры потоков:

$$d(Vc_i)/dt = \nu_i c_i^{\text{BX}} - \nu_i^{\text{BЫX}} c_i - G_i \text{ кг/с},$$

где V – объем контактного чана, м^3 ; c_i и c_i^{BX} – текущая и начальная концентрации реагента, кг/м^3 ; ν_i и $\nu_i^{\text{BЫX}}$ – объемные расходы потока реагента на входе и выходе контактного чана, $\text{м}^3/\text{с}$; G_i – массопоток компонента примеси, адсорбируемый поверхностью хлопьев коагулянта, кг/с .

Уравнение характеризует скорость протекания химической реакции между взаимодействующими компонентами и позволяет прогнозировать концентрации загрязняющих веществ в любой момент времени в зависимости от объема контактного чана и расхода реагентов.

Модель процесса сорбции компонентов загрязняющих примесей поверхностью образованных коллоидных частиц гидроксида железа. В соответствии с законом массоотдачи А. Н. Щукарева растворенные примеси адсорбируются поверхностью хлопьев коагулянта с результирующим массопотоком G_i i -го компонента примеси. Тогда $G_i = \beta_i(c_i^{\text{пов}} - c_i^{\text{пред}})dF$, где β_i – коэффициент массоотдачи, м/с; $c_i^{\text{пов}}$ и $c_i^{\text{пред}}$ – концентрации примеси на поверхности хлопьев коагулянта и предельно возможная концентрация соответственно; F – площадь поверхности массоотдачи, м².

Модель изменения размеров коллоидных частиц гидроксида железа с учетом интенсивности гидродинамического режима перемешивания раствора реагента с водой в контактном чане. Модель записана в виде безразмерного уравнения [8, 9]

$$\alpha = 1 - (1 - \alpha_0)\exp(-AG(t)H(t)),$$

где α – степень коагуляции; α_0 – доля осаждающейся некоагулированной взвеси; t – время перемешивания, $H(t)$ – скорость образования активных ядер коагуляции.

$$A = 4\pi/(3V_0),$$

где V_0 – некоторый характеристический объем осадка.

Функция роста коагулы задана уравнением

$$G(t) = k_r t^3,$$

где k_r – кинетическая константа коагуляции (скорость роста объема частицы), зависящая от интенсивности перемешивания, температуры и других технологических параметров, которая может быть представлена в виде зависимости

$$k_r = k_{r0} \left(\exp\left(-\frac{\beta E_A}{\gamma RT + E_G}\right) - \exp\left(-\frac{(1-\beta)E_A}{E_G}\right) \right),$$

где β – параметр, отражающий несимметричность перехода малых частиц из объема на поверхность больших частиц, и наоборот; E_A – энергия активации реакции агрегирования (слипания); γRT – параметр, отражающий вклад броуновского движения в процесс слипания частиц при образовании агрегата; E_G – энергия гидродинамических флуктуаций жидкости. Таким образом, первый член в уравнении $\exp(-\beta E_A/(\gamma RT + E_G))$ отражает интенсивность слипания частиц при образовании агрегатов, второй член $\exp(-(1-\beta)E_A/E_G)$ – интенсивность разрушения агрегатов гидродинамическими флуктуациями потока жидкости. Параметр k_{r0} в соответствии с теорией активных столкновений химической кинетики зависит от частоты столкновений частиц и линейно зависит от температуры и энергии гидродинамических флуктуаций жидкости. Процесс образования и разрушения агрегатов коллоидных частиц и флокул является несимметричным и определяется гидродинамикой флуктуирующего потока жидкости. При малых размерах агрегатов флуктуации потока в большей мере способствуют укрупнению агрегатов и, наоборот, при больших размерах агрегатов – их разрушению. Эту ситуацию отражает параметр β , являющийся функцией размера агрегатов. В качестве оценки β используется зависимость $\beta = \phi t/(1 + \phi t)$, которая отражает увеличение размера агрегата во времени как элементарного акта реакции второго порядка с удельной скоростью реакции ϕ . При малых t размер агрегатов мал и $\beta = 1$, что оценивает энергию активации образования агрегатов как малую величину, а энергию активации разрушения агрегатов как большую величину. Уравнение для k_r отражает

обратимость коагуляции: константа скорости коагуляции может принять отрицательное значение, что приведет к снижению степени коагуляции.

Математическое моделирование процесса седиментации сфлокулированных частиц загрязнений

В практике горно-обогатительных предприятий для очистки сточных вод с целью их дальнейшего применения используют отстойники, где происходит осветление вод под действием гравитационных сил. Однако для достижения равновесия процессов, протекающих в отстойниках, требуются значительное время и большая площадь. Для горнопромышленных предприятий представляет интерес вовлечение в процесс переработки руд предварительно очищенных сточных вод, с обеспечением требуемой эффективности и экологической безопасности реализуемых технологий [10, 11].

В программном комплексе ANSYS Fluent разработан виртуальный лабораторный стенд, моделирующий работу 30-метрового сгустителя компании OUTOTEK (рис. 1).

Для построения геометрии сгустителя использовали сеточный генератор GAMBIT (рис. 2). Модель состоит из двух частей: стационарного объема (корпус сгустителя) и динамического объема (призматический элемент – граблины). Гребковый механизм сгустителя, предназначенный для перемещения осажденных агрегатов коллоидных частиц к разгрузочному отверстию и состоящий из центральной оси и четырех радиальных граблин с лопастями, моделировался с использованием технологии Sliding Mesh. Эта технология позволяет осуществлять прогноз взаимодействия любых вращательно и поступательно движущихся составных частей конструкции с многофазной жидкой средой, и наоборот. В данном случае при вращении лопастей гребкового механизма сгустителя с регулируемой скоростью усилие передается на среду, состоящую из агрегатов коллоидных частиц, представленных несколькими дисперсными фазами.

Подача исходного материала и выпуск в модели осуществляются через верхние и нижние патрубки цилиндрического



Рис. 1. Рабочая зона сгустителя компании OUTOTEK

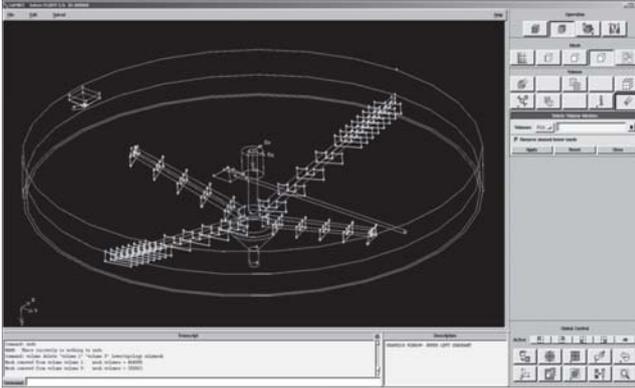


Рис. 2. Модель корпуса сгустителя с вращающимися граблинами и устройствами подачи и слива на панели редактора GAMBIT

корпуса. Предусмотрена возможность управления расходами подачи и выпуска суспензии. Слив очищенной жидкости происходит через верхний срез модели аппарата.

За основу модели исходного питания были взяты качественно-количественные данные о составе сточных вод ООО «Ловозерский ГОК»; для дискретизации фракций частиц по крупности использовали результаты седиментационного анализа, в качестве входных параметров также использовали параметры, характеризующие состояние технологического процесса, и геометрические характеристики сгустителя.

На стенде был поставлен и проведен вычислительный эксперимент по исследованию процесса осаждения сфлуктурированных частиц. В результате эксперимента были получены распределения концентраций объемных фракций частиц (см. таблицу) и скоростей их движения в объеме сгустителя (рис. 3).

Анализ результатов вычислительного эксперимента позволяет сделать вывод, что основная масса фракций исходного материала накапливается на наклонной плоскости дна сгустителя и лишь небольшая часть выходит через разгрузочное отверстие благодаря транспортированию граблинами. Вращающиеся граблины ротора не только облегчают перемещение седиментированных

Распределение объемных фракций слива сгустителя по данным вычислительного эксперимента

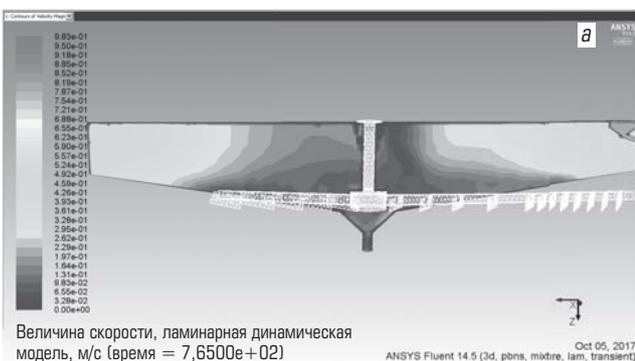
Фракция исходного материала	Концентрация объемных фракций, кг/с		
	Исходное питание	Пески сгустителя	Слив сгустителя
Вода	60,43	3,91	79,99
0–5 мкм	0,232	$5,88 \cdot 10^{-5}$	$4,36 \cdot 10^{-10}$
5–10 мкм	3,121	0,0039	0,0286
10–15 мкм	0,1032	$2,66 \cdot 10^{-5}$	$1,86 \cdot 10^{-10}$
15–30 мкм	0,000258	$3,48 \cdot 10^{-7}$	$1,93 \cdot 10^{-6}$

агрегатов коллоидных частиц к разгрузочному отверстию сгустителя, но и формируют необходимый турбулентный режим работы, который обеспечивает перемешивание и необходимое для формирования флоккул число столкновений частиц.

Исследование распределения тонкодисперсных фаз промышленных сточных вод при их очистке в колонной флотационной машине

Для достижения требуемых предельно допустимых концентраций загрязняющих примесей при очистке сточных вод горнорудных предприятий рассмотрена возможность использования комбинированной технологии их очистки, разработанной в ГоИ КНЦ РАН и включающей концентрирование загрязнений в многофазной системе с заранее сформированными поверхностными свойствами фаз. Технологическая схема включает коагуляцию, сорбцию и флотацию сфлуктурированных загрязняющих веществ в активированных водных дисперсиях воздуха (АВДВ) в колонной флотационной машине – аналоге флотомашины компании Canadian Process Technologies Inc. CETCO, оснащенной водно-воздушными диспергаторами Sparjet.

Исследования в данном направлении предполагают комплексный подход, в основе которого, с одной стороны, лежит разработка математической модели процессов агрегирования тонких частиц, с другой – исследование распределения тонкодисперсных фаз промышленных сточных вод при их очистке в колонной флотационной машине. Разработка математической модели



Величина скорости, ламинарная динамическая модель, м/с (время = 7,6500e+02)



Величина скорости, ламинарная динамическая модель, м/с (время = 7,6500e+02)

Рис. 3. Распределение скоростей движения фракций частиц в объеме сгустителя:

a – поле скоростей суспензии на вертикальном срезе модели сгустителя; *б* – изоповерхности скоростей суспензии в объеме рабочего пространства сгустителя

процессов агрегирования тонких частиц состоит в определении системы уравнений, учитывающих изменение концентраций реагентов, изменение концентраций компонентов загрязняющих примесей, сорбцию компонентов загрязняющих примесей поверхностью образуемых коллоидных частиц и изменение размеров агрегатов коллоидных частиц в зависимости от гидродинамического режима в рабочем объеме [12].

Современные подходы к аналитическому исследованию гидродинамики гетерогенных систем реализуются в построении адекватных и гибких математических моделей и основываются на двух различных областях знаний: эмпирических данных, полученных в экспериментах с физическими моделями, и вычислительной гидродинамике (CFD – Computational Fluid Dynamics). Вычислительная гидродинамика является инструментом, реализованным в численных алгоритмах, позволяющих находить многомерные решения фундаментальных физических уравнений, описывающих гидродинамику гетерогенных систем. Уравнения движения жидкости под действием определенных сил и при определенных граничных условиях можно представить в двух различных формах [13]. Выбор формы уравнений движения жидкости зависит от цели исследований. Если целью является определение для любого момента времени скорости, давления и плотности во всех точках среды, то используемая форма уравнений соответствует так называемому эйлерову подходу.

Представленные в природе и различных технологических процессах потоки, к которым относится и процесс флотационного разделения, представляют собой смесь фаз. Для многофазных систем понятие фазы более широко, чем отождествление ее с одним из агрегатных состояний вещества – газообразным, жидким или твердым. В общем случае число фаз не ограничено, и каждая из них должна отвечать определенным отличительным признакам, являющимся свойствами различной природы, ответственным за характер взаимодействия данной фазы с другими фазами, с потоком в целом и со сторонними воздействиями на поток. В случае флотации мы имеем дело в подавляющем большинстве случаев ее реализации с потоком веществ, представленных тремя агрегатными состояниями. Такой поток является комбинацией трех режимов взаимодействия веществ, находящихся в различных агрегатных состояниях в бинарных потоках: газ–жидкость или жидкость–жидкость, газ–частицы твердого вещества и жидкость–частицы твердого вещества. Имея математическую модель одного из названных режимов, можно описать различные физические процессы. Созданию математической модели предшествует формализация объекта моделирования и выработка ряда аксиоматических допущений о его свойствах в целом или о свойствах его отдельных компонентов.

Поскольку параметры фаз и всей среды меняются в пространстве и во времени, при ее описании вводят субстанциональные производные, связанные с движением дисперсной фазы и с движением среды в целом и оперируют балансовыми соотношениями массы, импульса и энергии для каждой из фаз [14]. При этом, так как фазы гетерогенной среды, заполняя весь ее объем, неограниченно проникают друг в друга и сохраняют свой мгновенный объем, необходимым уточнением и дополнением балансовых

соотношений является введение объемной фракции фазы, которая является функцией пространства и времени; алгебраическая сумма объемных фракций компонентов среды равна единице.

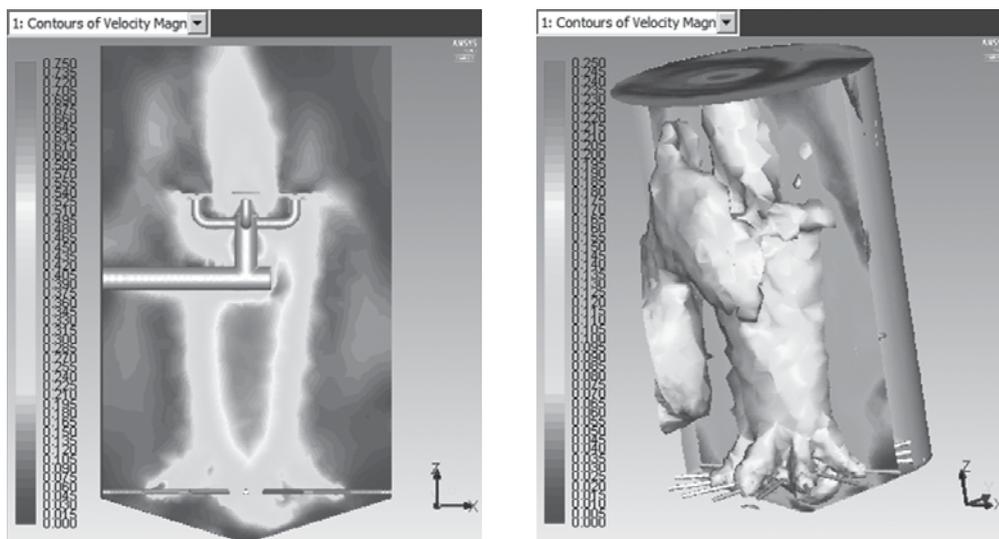
Для выбора модели, соответствующей исследуемой гетерогенной системе, должны быть установлены режим взаимодействия вещества в потоке, объем и размеры включений (вторичных фаз), характер потока (турбулентный или ламинарный) и число Стокса. Объем и размеры вторичных фаз характеризуют поток как разбавленный или как плотный.

Несмотря на сложность явления турбулентности, многообразие и эмпирический характер подходов к ее описанию, в настоящее время при моделировании турбулентности в основном используют две однофазные модели, известные как k - ϵ -стандартная модель и RSM (Reynolds Stress model – модель напряжений Рейнольдса). При этом и та и другая модели напрямую учитывают диссипативные проявления в первичной (основной, несущей) фазе. Однако уравнения этих моделей содержат члены дополнительных условий, учитывающие влияние на турбулизацию потока свойств вторичных фаз. Применимость таких дополнительных условий обусловлена при выполнении следующих ограничений: рассматриваемый поток является разбавленным; отношение плотностей каждой пары фаз, входящих в гетерогенную среду, соизмеримо с единицей.

Применительно к направленности данной работы исследования основывались на применении математического аппарата Eulerian Model Theory, что было обосновано тем, что процесс флотации протекает в многофазном потоке; отношение плотностей фаз отлично от единицы, а частицы, которые их составляют, проявляют и инертные, и поверхностные свойства, что в значительной мере определяет характер и интенсивность межфазного взаимодействия.

Eulerian Model Theory включает замкнутую систему дифференциальных уравнений [15]: для расчета объемной фракции (доли) каждой фазы, которая может быть вычислена из уравнения непрерывности; уравнения сохранения импульса для режима взаимодействия веществ по типу газ–жидкость или жидкость–жидкость; уравнения сохранения импульса для режима взаимодействия веществ по типу газ (жидкость)–частицы твердого вещества, где используется многожидкостная гранулированная модель, описывающая эволюцию потока смеси жидкой и дисперсной твердой фаз [16–19]; уравнения сохранения энергии для каждой из фаз.

Особое значение при рассмотрении уравнений сохранения импульса математической модели гетерогенной среды отводится коэффициенту обмена импульсом между фазами. Для режима взаимодействия пузырек газа–жидкость применима универсальная модель сопротивления [20]; для режима взаимодействия твердая частица–жидкость–модель сопротивления Вена и Ю [21]; для режима взаимодействия твердая частица–пузырек газа–модель сопротивления Шиллера и Науманна [22], определяемая по аналогии с универсальной моделью сопротивления, за исключением вычисления коэффициента сопротивления и числа Рейнольдса для пары вторичных фаз; для режима взаимодействия твердая частица–твердая частица–симметричная модель сопротивления Сиамлала и О’Бриена без учета взаимного трения для разбавленных фаз с коэффициентом обмена.



Величина скорости, ламинарная динамическая модель, м/с (время = 1,0000e+02) (3d, Полная эйлера модель, модель турбулентности)

Рис. 4. Поля и изоповерхности скоростей среды флотации

Режим работы модели переходной (*Transient*). В вычислительном эксперименте использовали многофазную модель Эйлера (*Eulerian Model Theory*). Для учета диссипации потока использована двухпараметрическая k - ϵ -модель. В настройки решателя также были включены свойства фаз и условия их взаимодействия. В эксперименте определяли потоки масс фаз через поверхности ввода питания и выходов камерного и пенного продуктов, а также объемное распределение фаз в расчетной области.

В результате вычислительного эксперимента получены поля скоростей среды флотации (рис. 4), что позволило выявить участки гидродинамической активности, характеризующиеся образованием локальных турбулентных потоков, снижающих вероятность элементарных актов флотации, а также зоны, где гидродинамическая активность низка, что способствует образованию застойных областей с пониженной концентрацией газовой фазы. Также получены поля распределения концентраций фаз, участвующих в процессе.

Заключение

Для успешной реализации различных технологий очистки промышленных сточных вод до уровней ПДК, позволяющих осуществлять их вторичное использование или сброс в близлежащие водоемы, необходимы прогнозные компьютерные модели последовательных физико-химических и химических процессов, содержащих растворенные и взвешенные частицы загрязнений. Очистка включает в себя процессы флокуляции с использованием

неорганических флокулянтов, сорбции растворенных веществ и процессов разделения компонентов образовавшихся суспензий. Формирование малозатратной технологии возможно только лишь при оптимизации затрат на оборудование и расходы реагентов.

Разработанные математические модели процессов очистки позволили выявить закономерности, определяющие крупность образованных флокулов, кинетику и время их жизни. В моделях проводится массовый и стехиометрический анализ баланса химических реагентов и компонентов загрязняющих примесей. Модели позволяют вести расчет процесса сорбции компонентов загрязняющих примесей и выявить зависимость его характеристик от температуры среды, концентраций компонентов примесей и гранулометрического состава образующегося коллоидного раствора.

При компьютерном моделировании процессов разделения компонентов суспензий с низким содержанием твердого в объемах технологических аппаратов используют методы вычислительной гидродинамики. Применение ее аппарата позволяет создавать математические модели, отображающие физические и физико-химические особенности таких процессов, как флотация и осаждение флокулов частиц в радиальном сгустителе и колонной флотационной машине, и вывести расчетные характеристики. Полученные данные будут заложены в основу выбора технологического оборудования. Полнота и степень проработки начальных и граничных условий определяют возможность валидации и верификации вычислительного эксперимента, способного отражать не только текущее состояние системы, но и ее прогнозные характеристики.

Библиографический список

- Mehran Jahanshahi, Mohammad Mehdi Taghizadeh. Pre-sedimentation tank effects on water treatment unit operation // *International Journal of Environmental Quality*. 2018. Vol. 28. P. 35–42.
- Rama Rao Karri, Gobinath Ravindran, Mohammad Hadi Dehghani. *Soft Computing Techniques in Solid Waste and Wastewater Management*. – Amsterdam : Elsevier, 2021. – 522 p.
- De Gisi S., Lofrano G., Grassi M., Notarnicola M. Characteristics and adsorption capacities of low-cost sorbents for wastewater treatment: A review // *Sustainable Materials and Technologies*. 2016. Vol. 9. P. 10–40.
- Скорыходов В. Ф., Месяц С. П., Никитин Р. М. Очистка сточных вод горнорудных предприятий // IX Конгресс обогатителей стран СНГ : сб. тр. конф. – М. : МИСиС, 2013. Т. II. С. 522–524.
- Степанникова А. С., Артемьева О. А. Повышение эффективности очистки сточных вод горнопромышленных предприятий от многокомпонентных примесей // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых : матер. 13-й Междунар. научной школы молодых ученых и специалистов. – М. : ИПКОН РАН, 2016. С. 296–299.
- Syed Ahmad Imtiaz. *Modelling of Chemical Process Systems*. – Amsterdam : Elsevier, 2022. – 312 p.

7. Кафаров В. В., Глебов М. Б. Математическое моделирование основных процессов химических производств : учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Юрайт, 2021. – 403 с.
8. Алексеева Л. П., Драгинский В. Л., Моисеев А. В. Механическое смешение реагентов с обрабатываемой водой // Водоснабжение и санитарная техника. 2001. № 3. С. 16–19.
9. Абасов Т. А., Лысов В. А., Михайлов В. А. Особенности процессов смешения и хлопьеобразования при очистки воды на Кучинском водопроводе в Баку // Проектирование и исследование систем водоснабжения и канализации : сб. ст. – Ростов-на-Дону, 1976. С. 30–34.
10. Vojtesek J., Dostal P., Maslan M. Modeling And Simulation Of Water Tank // Proceedings of the 28th European Conference on Modelling and Simulation. – Brescia, 2014. P. 297–303.
11. Yuxian Hu, Weiyao Zhu, Yabing Guo, Bing Chen. Application of Mathematical Model in Wastewater Treatment Optimal Control // Proceedings of the 2nd International Conference on Information Science and Engineering. – Hangzhou, 2010. P. 4383–4386.
12. Бирюков В. В., Никитин Р. М., Скороходов В. Ф., Степанникова А. С. Использование элементов теории популяционного баланса для интенсификации процессов агрегирования тонкодисперсных частиц // Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плакинские чтения-2017) : матер. Междунар. науч. конф. – Красноярск : Сибирский федеральный ун-т, 2017. С. 234–236.
13. Lamb H. Hydrodynamics. 6th revised ed. – Cambridge : Cambridge University Press, 1993. – 768 p.
14. Рахматуллин Х. А. Основы газодинамики взаимопроницающих движений сжимаемых сред // Прикладная математика и механика. 1956. Т. 20. № 2. С. 184–195.
15. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. Release 12.1. – Canonsburg : ANSYS, Inc., 2009. – 258 p.
16. Alder B. J., Wainwright T. E. Studies in Molecular Dynamics. II. Behavior of a Small Number of Elastic Spheres // The Journal of Chemical Physics. 1960. Vol. 33. Iss. 5. 1439. DOI: 10.1063/1.1731425
17. Heuy Kim. Theoretical and Applied Compressible Fluid Dynamics. – London : Academic Press, 2022. – 550 p.
18. Makogon T. Y. Handbook of Multiphase Flow Assurance. – Amsterdam : Elsevier, 2019. – 479 p.
19. Hassan Khawaja, Mojtaba Moatamedi. Multiphysics Modelling of Fluid-Particulate Systems (Multiphysics: Advances and Applications). – London : Academic Press, 2020. – 438 p.
20. Guan Heng Yeoh. Computational Techniques for Multiphase Flows. 2nd ed. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2019. – 640 p.
21. Wen C.-Y., Yu Y. H. Mechanics of Fluidization // The Chemical Engineering Progress Symposium Series. 1966. Vol. 62. P. 100–111.
22. Schiller L., Naumann Z. A Drag Coefficient Correlation // Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieur. 1935. Vol. 77. P. 318–320. **PK**

«GORNYI ZHURNAL», 2022, № 3, pp. 70–76
DOI: 10.17580/gzh.2022.03.11

Computer simulation application for substantiation of industrial wastewater treatment technology

Information about authors

V. F. Skorokhodov¹, Leading Researcher, Doctor of Engineering Sciences

V. V. Biryukov¹, Researcher

A. V. Artemiev¹, Researcher

R. M. Nikitin¹, Senior Researcher, Candidate of Engineering Sciences, remnik@yandex.ru

¹Mining Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

Abstract

The wastewater treatment of the mining industrial enterprises is implemented using mechanical, chemical, biological and physico-chemical methods. The mechanical treatment is used to prepare wastewater for biological, physicochemical and other methods of the deep treatment. In recent years, the field of the physicochemical treatment methods application has been expanding, and their share among other methods has increased. The Mining Institute of the Kola Science Centre of the RAS has been developed a technology of the industrial wastewater treatment based on the synergetic effect of the pollution concentrating in a multiphase medium with formed surface properties of the phases, tested at the mining enterprises of the Kola MMC (Lovzero GOK LLC and Kovdor GOK) and including coagulation, sorption and flotation in activated water dispersion of air.

To substantially reduce the cost, duration and complexity of the process of the developing wastewater treatment methods at mining enterprises, an approach based on the use of the mathematical and computer simulation methods, the development of the virtual laboratory benches that fully reproduce the technological processes and devices used.

The mathematical simulation of the fine particles coagulation and aggregation in the process of the industrial wastewater treatment from dissolved impurities was carried out. The simulation made it possible to reveal the kinetics of the adsorption process of the contaminants components by the surface of the formed iron hydroxide colloidal particles, which determines the size and lifetime of the flocs. A virtual laboratory stand was created to study the water treatment processes based on the ANSYS Fluent software. This stand simulates the operation of the Outotec radial thickener with a diameter of 30 meters, which made it possible to develop recommendations for the technological regimes optimization for the greater particle aggregation efficiency. The possibility of the application in the technology the column flotation machine – an analogue of the flotation machine of the Canadian Process Technologies Inc. CETCO, was considered.

The authors appreciate participation of Junior Researcher A. S. Kitaeva A. S. in the work on the article's material.

Keywords: mathematical simulation, aggregation, flocculation, ideal mixing model, impurities adsorption, flotation, aeration, activated water dispersion of air, computational experiment, radial thickener.

References

1. Mehran Jahanshahi, Mohammad Mehdi Taghizadeh. Pre-sedimentation tank effects on water treatment unit operation. *International Journal of Environmental Quality*. 2018. Vol. 28. pp. 35–42.

2. Rama Rao Karri, Gobinath Ravindran, Mohammad Hadi Dehghani. Soft Computing Techniques in Solid Waste and Wastewater Management. Amsterdam : Elsevier, 2021. 522 p.
3. De Gisi S., Lofrano G., Grassi M., Notarnicola M. Characteristics and adsorption capacities of low-cost sorbents for wastewater treatment: A review. *Sustainable Materials and Technologies*. 2016. Vol. 9. pp. 10–40.
4. Skorokhodov V. F., Mesyats S. P., Nikitin R. M. Ore mine water treatment. *IX Congress of Dressers from the CIS Countries : Proceedings*. Moscow : MISIS, 2013. Vol. II. pp. 522–524.
5. Stepannikova A. S., Artemyeva O. A. Improving the efficiency of wastewater treatment of mining enterprises from multicomponent impurities. *Problems of subsoil development in the 21st century through the eyes of young people : Materials of the 13th International School of Young Scientists and Specialists*. Moscow : IPKON RAN, 2016. pp. 296–299.
6. Syed Ahmad Imtiaz. Modelling of Chemical Process Systems. Amsterdam : Elsevier, 2022. 312 p.
7. Kafarov V. V., Glebov M. B. Mathematical modeling of the basic processes of chemical industries : tutorial. 2nd enlarged and revised edition. Moscow : Yurayt, 2021. 403 p.
8. Alekseeva L. P., Draginskiy V. L., Moiseev A. V. Mechanical mixing of reagents and treated water. *Vodonasabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 2001. No. 3. pp. 16–19.
9. Abasov T. A., Lysov V. A., Mikhaylov V. A. Peculiarities of mixing and flocculation processes in water treatment at Kuchinsky water pipeline in Baku. *Study and design of water supply and sanitary piping systems : Collected works*. Rostov-on-Don, 1976. pp. 30–34.
10. Vojtesek J., Dostal P., Maslan M. Modeling and Simulation of Water Tank. *Proceedings of the 28th European Conference on Modelling and Simulation*. Brescia, 2014. pp. 297–303.
11. Yuxian Hu, Weiyao Zhu, Yabing Guo, Bing Chen. Application of Mathematical Model in Wastewater Treatment Optimal Control. *Proceedings of the 2nd International Conference on Information Science and Engineering*. Hangzhou, 2010. pp. 4383–4386.
12. Biryukov V. V., Nikitin R. M., Skorokhodov V. F., Stepannikova A. S. Using the population balance theory to intensify aggregation of finely dispersed particles. *Current problems of integral processing of complex ores and technogenic raw materials (Plaksin's Lectures–2017) : Proceedings of the international conference*. Krasnoyarsk : Sibirskiy federalnyi universitet, 2017. pp. 234–236.
13. Lamb H. Hydrodynamics. 6th revised ed. Cambridge : Cambridge University Press, 1993. 768 p.
14. Rakhmatullin Kh. A. Fundamentals of gas dynamics in interpenetrating motion of compressible media. *Soviet Engineering Journal*. 1956. Vol. 20, No. 2. pp. 184–195.
15. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. Release 12.1. Canonsburg : ANSYS, Inc., 2009. 258 p.
16. Alder B. J., Wainwright T. E. Studies in Molecular Dynamics. II. Behavior of a Small Number of Elastic Spheres. *The Journal of Chemical Physics*. 1960. Vol. 33, Iss. 5. 1439. DOI: 10.1063/1.1731425
17. Heuy Kim. Theoretical and Applied Compressible Fluid Dynamics. London : Academic Press, 2022. 550 p.
18. Makogon T. Y. Handbook of Multiphase Flow Assurance. Amsterdam : Elsevier, 2019. 479 p.
19. Hassan Khawaja, Mojtaba Moatamedi. Multiphysics Modelling of Fluid-Particulate Systems (Multiphysics: Advances and Applications). London : Academic Press, 2020. 438 p.
20. Guan Heng Yeoh. Computational Techniques for Multiphase Flows. 2nd ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2019. 640 p.
21. Wen C.-Y., Yu Y. H. Mechanics of Fluidization. *The Chemical Engineering Progress Symposium Series*. 1966. Vol. 62. pp. 100–111.
22. Schiller L., Naumann Z. A Drag Coefficient Correlation. *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieur*. 1935. Vol. 77. pp. 318–320.

УДК 504:622.33:551

УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕРРИТОРИИ К ТЕХНОГЕННОМУ ЗАГРЯЗНЕНИЮ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ЭЛЬГИНСКОГО КАМЕННОУГОЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ*

Л. А. СТРОКОВА, проф., д-р геол.-минерал. наук, strokova@sibmail.com
С. А. ДМИТРИЕВА, аспирант

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, Россия

Введение

Реализация крупных энергопроектов в восточных районах России повысила значимость инженерно-геологической оценки этих территорий. Обозначена необходимость выявления уже на ранних стадиях проектирования тех факторов геологической среды, которые обеспечивают ее устойчивость к техногенной нагрузке, способствуя предотвращению экономического, социального и финансового ущерба.

Одним из крупнейших проектов, реализуемых в последние годы на Дальнем Востоке, является создание Эльгинского угольного комплекса на основе крупнейшего по запасам и качеству Эльгинского месторождения коксующихся и энергетических каменных углей, расположенного в юго-восточной части Республики Саха (Якутия). Проектная мощность угольного разреза составляет 30 млн т угля в год. Запасы угля 2,078 млрд т, срок службы разреза оценивается в 96 лет [1]. Реализация проекта приведет к трансформации геологической среды: изменению рельефа; образованию значительных массивов техногенных отложений; перестройке гидрографической сети; изменению состава и режима поверхностных и подземных вод; возникновению геологических процессов.

Оценке инженерно-геологических условий при реализации различных проектов в сложных условиях, в том числе в условиях криолитозоны, посвящены работы [2–11]. Многочисленные исследования направлены на изучение влияния горных работ на поверхностные и подземные воды [12–15], оценку состояния окружающей среды с помощью ГИС-технологий [16, 17]. Одним из перспективных методов оценки устойчивости геологической среды при освоении месторождения является типологическое инженерно-геологическое районирование территории, технология выполнения которого подробно изложена в работах [18–20]. Этот метод позволяет решать много задач по рациональному использованию территорий, поэтому давно и широко используется в мире.

Целью данного исследования является описание инженерно-геологических условий площадок для размещения

Приведена характеристика инженерно-геологических условий площадок прудов-отстойников Эльгинского угольного комплекса в Республике Саха (Якутия). Разработана карта инженерно-геологического районирования площадок по уязвимости геологической среды к техногенному загрязнению.

Ключевые слова: пруд-отстойник, добыча на карьере, грунт, уголь, геологический процесс, физико-механические свойства, районирование, уязвимость

DOI: 10.17580/gzh.2022.03.12

прудов-отстойников и их районирование по степени уязвимости геологической среды к техногенному загрязнению.

Характеристика объекта

По административному делению район работ расположен в Нерюнгринском районе Республики Саха (Якутия), в 400 км на восток от г. Нерюнгри. Месторождение расположено на юго-восточной окраине Алданского нагорья, в пределах Токинской впадины, являющейся составной частью Южно-Якутского каменноугольного бассейна.

Южно-Якутский каменноугольный бассейн является **природно-технической системой** (ПТС) регионального уровня. ПТС Эльгинского ГОКа относится к системе локального уровня, включающей в себя элементарные ПТС: карьер, обогатительная фабрика, отвалы вскрышных пород, гидротехнические, транспортные сооружения и др. Работы на Эльгинском разрезе приведут к образованию полости в земной коре объемом более 800 млн м³ и площадью в несколько десятков квадратных километров. Отвалы вскрышных пород будут представлены тремя внешними отвалами общим объемом 833,5 млн м³ и внутренним отвалом объемом 579,7 млн м³ [1]. Гидротехнические сооружения представляют собой пруды-отстойники № 1–4, (к) (рис. 1), под которые отведено порядка 80 га. Крупнейшим объектом среди них станет пруд-отстойник карьерных вод (к) площадью 34,6 га. Наполнение данного объекта произойдет после 2021–2023 гг. Основное преобразование природных комплексов при строительстве объектов I очереди связано с частичным перестроением гидрографической сети бассейна р. Укикит, увеличением мутности воды на определенных участках р. Укикит и ее притоков. Пруды-отстойники поверхностного стока и карьерных вод расположены на слабонаклонных участках с отметками поверхности 852–947 м.

*Исследование выполнено в Томском политехническом университете в рамках программы повышения конкурентоспособности данного учебного заведения (средства ВИУ).

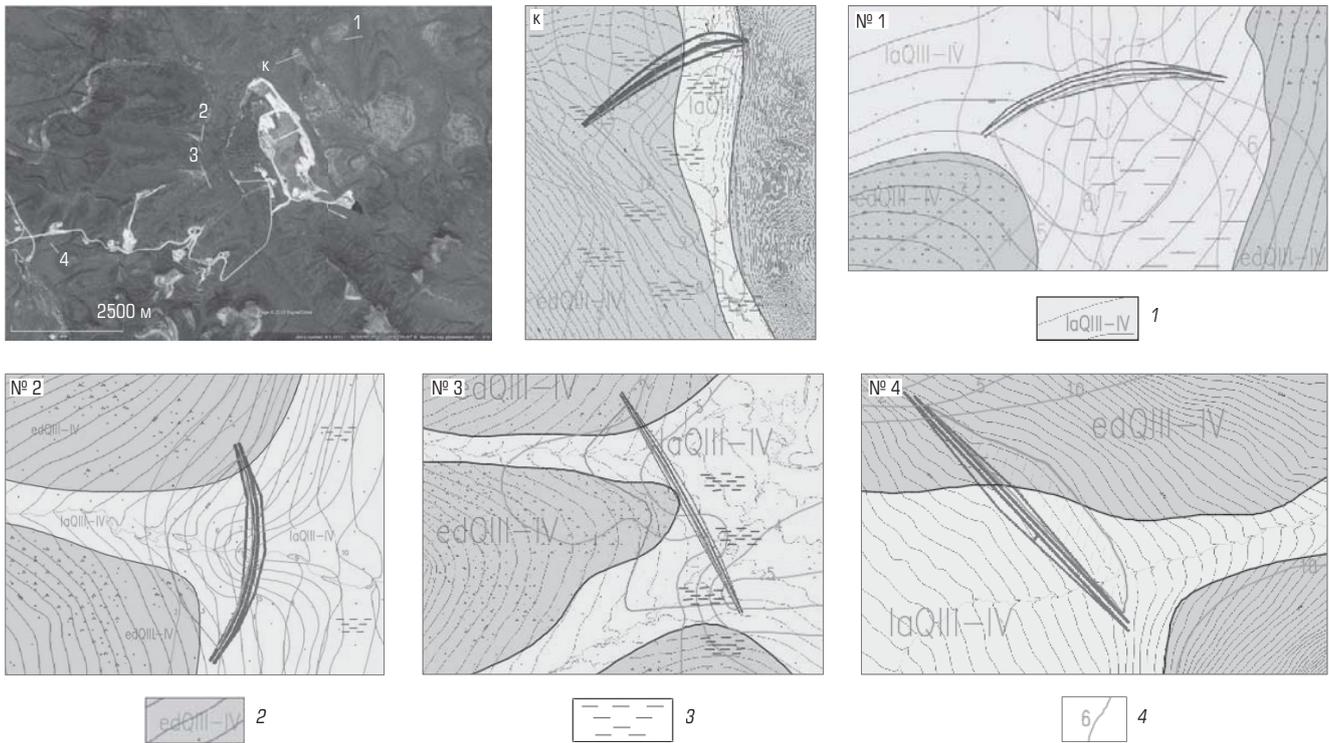


Рис. 1. Местоположение изученных участков на снимке Гугл; схематические геологические карты прудов-накопителей:

1 – озерно-аллювиальные отложения; 2 – элювиально-делювиальные отложения; 3 – заболоченная местность; 4 – изолинии глубины залегания кровли скальных пород

В **тектоническом** строении территории выделяются четыре структурных этажа. Нижний структурный этаж представляет собой жесткий кристаллический фундамент, сложенный дислоцированными архейскими метаморфитами, насыщенными гранитоидами позднеархейско-протерозойского возраста. Второй – платформенный чехол, сложен рифейскими терригенными и вендско-кембрийскими, преимущественно карбонатными отложениями, нижнеюрскими терригенными породами. Третий структурный этаж представлен активизационными структурами мезозойского возраста. Четвертый соответствует этапу неотектонического развития, выраженного глубоким расчленением рельефа, сейсмической активностью района и проявлением трахибазальтового магматизма [17]. По материалам инженерно-геофизических изысканий территория относится к 7-балльной сейсмической зоне.

В **геологическом** строении района принимают участие верхнеюрские отложения нерюнгриканской свиты, перекрытые с поверхности верхнечетвертичными и современными отложениями озерно-аллювиального и элювиально-делювиального генезиса [17].

Верхнечетвертичные и современные отложения озерно-аллювиального генезиса (laQ_{III-IV}) имеют широкое распространение по площади, приурочены к долинам водотоков (см. рис. 1). На площадках прудов-отстойников № 1, 3 и карьерных вод первый от поверхности слой мощностью до 0,4–1,8 м представлен

слабо-, среднезаторфованными пылеватыми песками, супесями и суглинками с дресвой, дресвяными, дресвяными и щебенистыми грунтами с песчаным, супесчаным и суглинистым заполнителем, а также бурым среднеразложившимся торфом, подстилается отложениями преимущественно аллювиального генезиса. Аллювиальные отложения также залегают первыми от поверхности в центральной части площадок прудов-накопителей № 2 и 4. Отложения представлены песками, супестью и суглинками с гравием, гравелистыми, галечниковыми и гравийными грунтами с песчаным, супесчаным и суглинистым заполнителем мощностью 0,5–10,2 м. Обломочный материал характеризуется осадочными, магматическими и метаморфическими породами плохой, средней и хорошей степени окатанности. Благоприятные условия для образования озерно-аллювиальных отложений обусловлены широким распространением многолетней мерзлоты, боковой эрозией и блужданием русел рек в долинах.

Верхнечетвертичные и современные отложения элювиально-делювиального генезиса (edQ_{III-IV}) имеют широкое распространение, вскрыты с поверхности на склонах водотоков мощностью 0,9–3,7 м. Отложения представлены пылеватыми песками, супесями и суглинками с дресвой, дресвяными, а также дресвяными и щебенистыми грунтами с песчаным, супесчаным и суглинистым заполнителем в объеме от 10 до 49 %. Обломочный материал характеризуется осадочными породами различной прочности.

Верхнеюрские отложения нерюнгриканской свиты (J_{3np}) имеют повсеместное распространение, залегают под четвертичными отложениями с глубины 0,5–4 м, характеризуются вскрытой мощностью 0,5–55 м. Породы представлены песчаниками и алевролитами различной прочности с пластами и пропластками углей.

В **геокриологическом** отношении территория расположена в зоне сплошного развития многолетнемерзлых пород. Граница сезонного оттаивания составляет 4 м. Грунты имеют массивную и слоистую криогенную текстуру. Скальные грунты находятся в морозном состоянии. На глубине годовых нулевых амплитуд температура изменяется от $-0,1$ до $-1,5$ °С.

Гидрогеологические условия территории характеризуются развитием надмерзлотных грунтовых вод, вскрытых локально – только на площадке размещения пруда отстойника № 3 в трех шурфах на глубине 1–2 м. Водовмещающими грунтами являются щебенчатые, галечниковые породы с супесчаным заполнителем и алевролиты-«рухляки». Питание грунтовых вод происходит в основном за счет инфильтрации атмосферных осадков и оттаивания сезонно-мерзлых грунтов, водоупором служат многолетнемерзлые грунты. С прекращением питания атмосферными осадками, наступлением отрицательных температур воздуха, перемерзанием русел водотоков надмерзлотный водоносный горизонт истощается, сокращается и к весне в основном прекращает свое существование. В местах отсутствия плотных мерзлых пород вода по трещинам свободно фильтруется вниз, пополняя запасы нижележащего комплекса пород.

В целом инженерно-геологические условия района являются достаточно сложными в связи с высокой сейсмической активностью региона, наличием многолетней мерзлоты и таких геологических процессов, как поверхностное заболачивание площадки, морозное выпучивание каменного материала на склонах водоразделов, морозное пучение несвязных грунтов в зимний период и присутствие в разрезе сильнотрещиноватых углей, алевролитов и песчаников-«рухляков».

Методика выполнения работ

Изучение уязвимости геологической среды к техногенному загрязнению требует оценки соотношения водопроницаемых и водоупорных пород в разрезе. Использовать такие распространенные методики по оценке защищенности подземных вод, как ВСЕГИНГЕО [15], DRASTIC, SINTACS, GOD [19], не представляется возможным из-за спорадического распространения надмерзлотных подземных вод, а также неопределенности конструктивных особенностей дамб-накопителей на момент предпроектного изучения территории. Из имеющихся данных по площадкам, отведенным под пруды-отстойники, следует, что площадки не однородны по мощности покровных отложений, их строению и фильтрационным характеристикам. Анализ и систематизация данных методом последовательного инженерно-геологического районирования площадок размещения прудов-отстойников позволили выделить участки, обладающие определенным набором показателей, оценивающих грунтовую толщу как естественный противофильтрационный барьер.

При типологическом районировании самые крупные подразделения (районы) выделяли по величине мощности покровных пород: А – при мощности до 2 м; Б – от 2 до 5 м; В – от 5 до 10 м и Г – при мощности более 10 м.

Внутри районов выделены подрайоны по величине коэффициента фильтрации (по ГОСТ 25100): а – слабопроницаемые с коэффициентом фильтрации менее 0,3 м/сут; б – водопроницаемые с коэффициентом фильтрации в интервале 0,3–3 м/сут; в – сильнопроницаемые с коэффициентом фильтрации от 3 до 30 м/сут.

Выделенные подрайоны, в свою очередь, подразделяли на участки по литологическому составу грунтовой толщи, физико-механическим свойствам выделенных инженерно-геологических элементов (ИГЭ): 1, 2, 4, 7, 9, 11, 13.

Результаты исследований

Оценка инженерно-геологических условий послужила основой для составления карты районирования по степени уязвимости геологической среды к техногенному загрязнению (**рис. 2**).

По степени уязвимости геологической среды к техногенному загрязнению выделены четыре категории.

I категория характеризуется как *весьма сильноуязвимые* территории. К данной категории относятся участки, сложенные с поверхности элювиально-делювиальным дресвяным грунтом с супесчаным заполнителем объемом до 31–41 % (ИГЭ-7) мощностью до 5,9 м; а также аллювиальными галечниковыми грунтами с супесчаным заполнителем (ИГЭ-13) и гравелистыми песками (ИГЭ-11) мощностью 2,5–5,9 м; подстилаемые песчаниками и алевролитами сильноветрелыми «рухляками» нерюнгриканской свиты (участки А-6-7, Б-6-7, Б-6-13, В-в-11). Время продвижения фронта загрязнения на таких участках составляет менее 5 сут.

II категория – *сильноуязвимые* территории. К данной категории относятся участки А-6-9, Б-6-2, Б-6-9, В-6-7, В-6-13, Г-6-7, Г-6-13, сложенные с поверхности гравелистыми супесями (ИГЭ-9), суглинками с дресвой песчаников в объеме от 2 до 18 % мощностью от 2,9 до 4 м. Эти отложения подстилаются аллювиальными крупнообломочными грунтами мощностью до 2,5 м, залегающими на песчаниках, малопрочных алевролитах и средней прочности. Время продвижения фронта загрязнения на таких участках составляет от 5 до 10 сут.

III категория – *слабоуязвимые* территории. К данной категории относятся участки, сложенные с поверхности среднеразложившимся торфом (ИГЭ-1), заторфованными суглинками с включениями дресвы мелкозернистых песчаников (ИГЭ-2), супестью с дресвой от 1 до 24 % (ИГЭ-4) мощностью до 4,6 м. Грунты подстилаются верхнеюрскими песчаниками, прочными алевролитами и средней прочности (участки А-а-4, А-6-1, Б-а-4, Б-6-1, В-а-4, В-6-1, В-6-2). Время продвижения фронта загрязнения составляет 10–15 сут.

IV категория – *весьма слабоуязвимые* территории (участки Г-а-4, Г-6-1, Г-6-9). К данной категории относятся участки, сложенные с поверхности в основном глинистыми грунтами мощностью свыше 15 м (ИГЭ-4), подстилаемые верхнеюрскими

9. Никифоров А. Г., Бубнова Т. П. Геолого-технологическое картирование промышленных типов мусковитовых руд проявления Восточная Хизоваара (Республика Карелия) // Обогащение руд. 2018. № 5. С. 49–56. DOI: 10.17580/or.2018.05.09
10. Ranängen H., Lindman Å. A path towards sustainability for the Nordic mining industry // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 151. P. 43–52.
11. Dimitrakopoulos R. Advances in Applied Strategic Mine Planning. – Cham : Springer, 2018. – 800 p.
12. Абатурова И. В., Стороженко Л. А., Петрова И. Г., Королева И. А. Прогноз изменения компонентов инженерно-геологических условий при разработке месторождений полезных ископаемых в криолитозоне // Горный журнал. 2015. № 9. С. 22–27. DOI: 10.17580/gzh.2015.09.04
13. Скопинцева О. В., Ганова С. Д., Демин Н. В., Папичев В. И. Комплексный метод снижения пылевой и газовой опасностей в угольных шахтах // Горный журнал. 2018. № 11. С. 97–100. DOI: 10.17580/gzh.2018.11.18
14. Вознесенский Е. А., Латыпов А. И., Жаркова Н. И. Сейсмическая разжижаемость песков основания башни “Казанская ривьера” // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2016. № 4. С. 23–27.
15. Гольдберг В. М. Взаимосвязь загрязнения подземных вод и природной среды. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 248 с.
16. Purgina D., Strokova L., Kuzevanov K. Modeling of changing hydrogeological conditions during construction of pier foundations on the Kama river bank // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2016. Vol. 33. 012046. DOI: 10.1088/1755-1315/33/1/012046
17. Строчкова Л. А., Дмитриева С. А., Осьмушкина Н. В., Осьмушкин А. В. Опыт инженерно-геологического районирования по несущей способности грунтов площадки Эльгинского ГОК в Якутии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 2. С. 175–185.
18. Строчкова Л. А., Ермолаева А. В. Районирование территории по степени опасности оседания земной поверхности при проектировании магистрального газопровода в Южной Якутии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 10. С. 59–68.
19. Balal Oroji. Groundwater vulnerability assessment using GIS-based DRASTIC and GOD in the Asadabad plain // Journal of Materials and Environmental Sciences. 2018. Vol. 9. Iss. 6. P. 1809–1816.
20. Marschalko M., Yilmaz I., Bednárík M., Kubečka K. Variations in the building site categories in the underground mining region of Doubrava (Czech Republic) for land use planning // Engineering Geology. 2011. Vol. 122. Iss. 3-4. P. 169–178. **ПЖ**

«GORNYI ZHURNAL», 2022, № 3, pp. 77–81
DOI: 10.17580/gzh.2022.03.12

Induced pollution resistance of areas during hydrotechnical construction at Elga coal project*

Information about authors

L. A. Strokova¹, Professor, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, strokova@sibmail.com
S. A. Dmitrieva¹, Post-Graduate Student

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Abstract

The study is relevant due to the rapid growth of mining exploration and production activities in the permafrost regions of Russia over the last forty years. This paper presents the characteristics of the soils of the pond-sumps of Elga coal complex in the Republic of Sakha (Yakutia) on vulnerability of the geological environment to contamination. An engineering-geological evaluation is necessary for the decision-making on land planning and land use of the area but also so that necessary industrial and infrastructure development can be carried out with smaller impacts on breakable environments as well as reducing hazards and damage to constructions with consequent savings to people and property.

This study aims to describe the engineering-geological conditions, exogenous geological processes that may be relevant to establish suitability for development.

Object of research is the geological environment. The main natural components, which influence land use planning and development, were considered such as lithology; topography; seismotectonic; geotechnique; hydrology-hydrogeology and permafrost.

This study includes a brief review of relevant literature, and a summary of information obtained from geological survey company files. All information layers about the natural environment were manipulated and combined to produce uniform engineering geological map.

We produced a zoning map of the study area that shows zones with different degree of vulnerability of the geological environment to contamination such as high, moderate, low, negligible vulnerability.

The study was carried out at the Tomsk Polytechnic University within the framework of the Competitive Recovery Program (VIU assets).

Keywords: settling pond, open pit mining, soil, coal, geological process, physical and mechanical properties, zoning, sensibility.

References

1. Nikolaeva N. A., Pinigin D. D. Formation of geotechnical systems while developing the Elga coal deposit. *Fundamentalnye issledovaniya*. 2015. No. 8-1. pp. 153–157.
2. Wei Qiao, Wenping Li, Tao Li, Jinyuan Chang, Qiqing Wang. Effects of Coal Mining on Shallow Water Resources in Semiarid Regions: A Case Study in the Shennan Mining Area, Shaanxi, China. *Mine Water and the Environment*. 2017. Vol. 36, Iss. 1. pp. 104–113.
3. Kang Wang, Zhongbing Lin, Renduo Zhang. Impact of phosphate mining and separation of mined materials on the hydrology and water environment of the Huangbai River basin, China. *Science of The Total Environment*. 2016. Vol. 543. pp. 347–356.
4. Wei Wei Jia, Guang Dao Bao, Xue Wei Wu, Sheng Wei Jiang, Chang Zhai. Research and development of the mine geological environment evaluation system. *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 268-270. pp. 1354–1359.
5. Ganova S. D. Geocological aspects of the creation and functioning of the natural-technic systems under the conditions of the Western Siberia cryolithic zone. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*. 2017. No. 5. pp. 58–64.
6. Kazanin O. I., Sidorenko A. A., Meshkov A. A., Sidorenko S. A. Reproduction of the longwall panels: modern requirements for the technology and organization of the development operations at coal mines. *Eurasian Mining*. 2020. No. 2. pp. 19–23. DOI: 10.17580/em.2020.02.05
7. Dushin A. V., Ignatyeva M. N., Yurak V. V., Ivanov A. N. Economic evaluation of environmental impact of mining: ecosystem approach. *Eurasian Mining*. 2020. No. 1. pp. 30–36. DOI: 10.17580/em.2020.01.06
8. Litvinenko V. S., Tsvetkov P. S., Molodtsov K. V. The social and market mechanism of sustainable development of public companies in the mineral resource sector. *Eurasian Mining*. 2020. No. 1. pp. 36–41. DOI: 10.17580/em.2020.01.07
9. Nikiforov A. G., Bubnova T. P. Geological and technological mapping of industrial types of muscovite ores of Eastern Hizovaara structure (Republic of Karelia). *Obogashchenie Rud*. 2018. No. 5. pp. 49–56. DOI: 10.17580/or.2018.05.09
10. Ranängen H., Lindman Å. A path towards sustainability for the Nordic mining industry. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 151. pp. 43–52.
11. Dimitrakopoulos R. Advances in Applied Strategic Mine Planning. Cham : Springer, 2018. 800 p.
12. Abaturova I. V., Storozhenko L. A., Petrova I. G., Koroleva I. A. The influence of components of engineering-geological conditions on mineral mining in permafrost zone. *Gornyi Zhurnal*. 2015. No. 9. pp. 22–27. DOI: 10.17580/gzh.2015.09.04
13. Skopintseva O. V., Ganova S. D., Demin N. V., Papichev V. I. Integrated method of dust and gas hazard reduction in coal mines. *Gornyi Zhurnal*. 2018. No. 11. pp. 97–100. DOI: 10.17580/gzh.2018.11.18
14. Вознесенский Е. А., Латыпов А. И., Жаркова Н. И. Seismic fluidification of soil in the bed of the Kazanskaya riviera tower. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2016. Vol. 53, No. 4. pp. 257–263.
15. Goldberg V. M. Interconnection of groundwater pollution and natural environment. Leningrad : Gidrometeoizdat, 1987. 248 p.
16. Purgina D., Strokova L., Kuzevanov K. Modeling of changing hydrogeological conditions during construction of pier foundations on the Kama river bank. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2016. Vol. 33. 012046. DOI: 10.1088/1755-1315/33/1/012046
17. Strokova L. A., Dmitrieva S. A., Osmushkina N. V., Osmushkin A. V. Experience of engineering-geological zoning on bearing capacity of soils of the industrial site of Elga coal-preparation plant in Yakutia. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov*. 2019. Vol. 330, No. 2. pp. 175–185.
18. Strokova L. A., Ermolaeva A. V. Zoning according to the hazard level of earth surface subsidence when designing the main gas pipeline in South Yakutia. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov*. 2016. Vol. 327, No. 10. pp. 59–68.
19. Balal Oroji. Groundwater vulnerability assessment using GIS-based DRASTIC and GOD in the Asadabad plain. *Journal of Materials and Environmental Sciences*. 2018. Vol. 9, Iss. 6. pp. 1809–1816.
20. Marschalko M., Yilmaz I., Bednárík M., Kubečka K. Variations in the building site categories in the underground mining region of Doubrava (Czech Republic) for land use planning. *Engineering Geology*. 2011. Vol. 122, Iss. 3-4. pp. 169–178.

Глубокоуважаемые читатели!

Ниже публикуется статья «Горный журнал» в 1825 г.: начало истории издания», которая связана с созданием и становлением «Горного журнала». Как нельзя лучше ее можно представить цитатами из книги Патрика Хаттона «История как искусство памяти» (СПб. 2003).

«Память, как и история, раскрывает перед нами увлекательные стечения обстоятельств».

Началось все с основания по указу Екатерины II от 21 октября 1773 г. Горного училища – первого высшего горного и первого в России высшего технического учебного заведения. В 1804 г. Училище было преобразовано в Горный кадетский корпус, а с 1807 г. приравнено к Университетам. Здесь следует сделать небольшое отступление: «... история является искусством памяти, так как она опосредует столкновение двух моментов памяти: повторения и воспоминания. Повторение связано с присутствием прошлого. Это та сторона памяти, благодаря которой мы переносим в будущее образы прошлого, продолжающие неосознанно формировать наше сегодняшнее понимание. Можно назвать их стереотипами мышления; они являются материалом коллективной памяти, которую мы связываем с живыми традициями. Воспоминание связано с нашими попытками в настоящем пробудить прошлое. Эта та сторона памяти, при помощи которой мы осознанно восстанавливаем образы прошлого, выбирая то, что подходит нуждам нашей сегодняшней ситуации».

3 марта 1825 г. Министр Финансов Генерал-Лейтенант Канкрин направил предписание за № 358 Департаменту Горных и Соляных Дел «для надлежащего исполнения». К этому документу приложен «список» Докладной записки, поднесенной «на Высочайшее Его Императорского Величества благоусмотрение Министром Финансов об издании «Горного Журнала» и «на учреждение Ученого Комитета по Горной и Соляной части при Горном Кадетском Корпусе». Именно эта докладная записка была подписана Александром I 28 февраля 1825 г. Еще один документ приложен к «предписанию» – это «Подробная записка, поднесенная на высочайшее благоусмотрение Г. Министром Финансов, о составлении Ученого Комитета по Горной и Соляной части, и об издании Горного Журнала». Именно эту записку представил Управляющий Департаментом Горных и Соляных Дел «о пользе и надобности издавать от Департамента Журнал, под названием: Горный Журнал, или собрание сведений о Горном и Соляном деле, с присовокуплением новых открытий по Наукам, к сему предмету относящимся». «Предположения Управляющего состоят для издания оного учредить при Горном Кадетском Корпусе особый Комитет под именем Ученый Комитет по Горной и Соляной части». С 1824 г. Управляющим Департаментом горных и соляных дел и одновременно директором Горного кадетского корпуса назначается Егор Васильевич Карнеев. Именно он с «несколькими Горными людьми, соединенными вместе», среди которых первым был Дмитрий Иванович Соколов, будущий редактор журнала, составили этот проект.

Как все современно звучит! Так все начиналось!

«В настоящее время нам приходится говорить скорее о полезности прошлого, чем о его влиянии на нас, и вспоминаем мы о нем часто только тогда, когда приходится подводить черту под делами текущего дня!»

Ю. Ю. Пиотровский,

канд. искусствоведения, Государственный Эрмитаж

УДК 622:001.92(091)

«ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ» В 1825 г.: НАЧАЛО ИСТОРИИ ИЗДАНИЯ

Е. Г. НЕКЛУДОВ, главный научный сотрудник, д-р ист. наук, ntplant9@mail.ru

Институт истории и археологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

Введение

В кабинете Александра I в Зимнем дворце 28 февраля 1825 г. состоялось торжественное событие. На докладной записке министра финансов Егора Францевича Канкрин «Об издании Горного журнала» император собственноручно поставил резолюцию: «Исполнить» [1].

«Двадцать осьмый день Февраля, день, в который положение об Ученом Комитете по горной и соляной части удостоено Высочайшего утверждения – должен быть для нас священным, вечнопамятным... Хвала и благодарение мудрому Самодержцу, Покровителю наук и искусств, достойному незабвенные памяти! Сии чувства к Благословенному да врежутся в сердца наши неизгладимыми чертами, и день сей да будет навсегда днем нашего торжества!» – такими высокими словами оценивал это событие

Показаны события, связанные с основанием первого периодического научно-технического издания в России – «Горного журнала». На основе опубликованных там материалов воспроизведено торжественное заседание 21 марта 1825 г., посвященное открытию Ученого комитета, созданного при Департаменте горных и соляных дел для подготовки и издания журнала, а также торжественное заседание 20 марта 1826 г., посвященное первой годовщине его работы. Представлены организаторы и участники этих заседаний, пояснены провозглашенные там научные подходы к структуре и содержанию ведомственного периодического издания, основы и принципы деятельности редакции, названы авторы статей первых номеров и подведены итоги работы редколлегии и издательства в 1825 г.

Ключевые слова: 1825 г., «Горный журнал», Ученый комитет по горной и соляной части, горные общества, Александр I, Е. Ф. Канкрин, Е. В. Карнеев

DOI: 10.17580/gzh.2022.03.13

директор Департамента горных и соляных дел Министерства финансов Российской Империи Е. В. Карнеев [2].

Созданный тогда под его председательством Ученый комитет был предназначен для подготовки специализированного

периодического издания, получившего название «Горный журнал». Материалы, опубликованные в самом журнале в первые два года его издания, дают основание для реконструкции двух важных событий его начальной истории: торжественного заседания 21 марта 1825 г. об открытии Ученого комитета и прошедшего через год подобного же заседания 20 марта 1826 г., на котором были подведены первые итоги его работы. Эти достоверные материалы погружают нас в атмосферу того времени и показывают пример профессионального отношения к столь серьезному предприятию, как издание научно-технического журнала.

«Послужит драгоценною библиотекою...»

На открытии Ученого комитета 21 марта 1825 г. Е. В. Карнеев выступил с речью, в которой обосновал необходимость создания печатного органа горного ведомства и представил программу работы журнала. «Помышляя об издании Горного Журнала... — говорил директор, — я желал издание сие упрочить, основать на твердых началах учености и опытности, соделать по возможности безошибочным, приспособить к прямой общественной пользе. Надеюсь, что в предприятии моем не ошибся, представив Высшему Начальству об учреждении для издания Горного Журнала Ученого Комитета, коего за честь себе вменяю быть Председательствующим» [3].

Судя по имеющимся биографическим сведениям, Егор Васильевич Карнеев (1773–1849) стал директором Департамента и главноуправляющим Горного кадетского корпуса (с 1834 г. — Институт Корпуса горных инженеров, с 1866 г. — Горный институт) всего за полгода до этого события. Перед назначением главой горного ведомства его работа была связана с Департаментом мануфактур и внутренней торговли Министерства финансов, отвечавшим за другие отрасли российской промышленности [4]. Видимо, собственные представления и влияние коллег на новом месте службы подвигли этого опытного, инициативного и, по выражению современников, образованнейшего человека к идее создания специализированного научно-технического журнала.

В то время в России уже выходили несколько периодических изданий, в которых публиковались статьи по естественным наукам (например, «Технологический журнал», издававшийся Императорской академией наук в 1804–1815 гг., включал «известия» по математике, физике, химии, минералогии, географии, зоологии, медицине и ботанике), но, по мнению специалистов, они не отвечали в полной мере требованиям научного издания: не имели четкой структуры и специализации, не проводили процедуру рецензирования статей и включали ненаучные публикации [5]. Вышеприведенные высказывания директора о характере нового печатного органа свидетельствуют о его твердом намерении основать журнал по тематике возглавляемого им горного ведомства на принципах строгой научности.

Понятно, что единолично справиться с такой трудоемкой задачей не представлялось возможным. «Я полагал, — продолжал он раскрывая свои намерения в торжественной речи, — что по причине обширности и разнообразия предметов, долженствующих входить в состав Горного Журнала, издание онаго одним лицом весьма затруднительно и даже невозможно». Только «несколько

горных людей, соединенных вместе, общими своими сведениями» смогли бы, по мнению директора, «с успехом обнять» разнообразную тематику будущего периодического издания. Эти основания и привели его к предложению возложить подготовку «Горного журнала» «на общество просвещенных чиновников» в виде Ученого комитета, действующего при Горном кадетском корпусе.

«Предместники мои, — подчеркивал Е. В. Карнеев, — неоднократно покушались выполнить сие предприятие», необходимость которого уже давно отмечалась горными деятелями. «Может ли быть благороднее цель и обильнее польза такого издания, где читатель не токмо почерпает удовольствие, не токмо удовлетворяет похвальное любопытство, но руководствуется к познанию сокровенных недр Природы, поучается хитростям Механики и Химии, знакомится с точными Науками», — говорил директор [6]. Практическое значение журнала заключалось, по его мнению, в «распространении новых открытий» и побуждении «деятельности изобретательных умов». Журнал также мог «служить важным пособием для преподавания наук» в Горном кадетском корпусе и способствовать подготовке учебных курсов, «каковых у нас еще не издано». Он необходим и для «горных офицеров», бывших выпускников кадетского корпуса, «на казенных и частных заводах обретающихся». Не имея «достаточного состояния», как свидетельствовал директор, они «не могли выписывать ни книг, ни журналов, которые бы им сообщали новые изобретения и наблюдения, или изоощряли их память и понятия», а потому «по большей части невольным образом забывали почти и то, чему были научены». Журнал, полагал он, должен быть доступен каждому из них и, «наполненный рассуждениями, учеными описаниями, а иногда и полными трактатами, до горного ремесла относящимися», мог служить им «драгоценною библиотекою, которую приобретать они будут за самую умеренную цену, и которая, знакомя их со всею ученою Европою, конечно, не допустит ревностнейших из них терять своих дарований и стремления к дальнейшему образованию ума и сердца». Наконец, издание журнала должно было «споспешествовать и самим Наукам», извлекая «из неизвестности безгласные ныне сведения», порождая «новые известия», вдохновляя «соревнование к распространению всякого рода познаний по всем предметам Горных Наук и Искусств» [7].

В своем выступлении директор представил и обосновал структуру будущего журнала, состоявшую из 10 «отделений», или разделов. Раздел «Горные законоположения» был призван знакомить читателей с «правительственными постановлениями по горной, соляной и монетной части». Раздел «Минералогия» включал «поучительные трактаты... открытия, любопытные опыты и наблюдения», относившиеся к этой научной дисциплине, а также «описания российских минералов, их свойств и местонахождений». Трактаты о разных «химических предметах», новые открытия и опыты, проводимые «для изыскания удобнейших и совершеннейших средств получения полезных продуктов», составляли раздел «Химия». «Горное дело» могло быть представлено «систематическими рассуждениями о горном искусстве, описаниями примечательных рудников, как иноземных, так в особенности российских, различных разработок, крепей, подземных ходов, горных машин и проч.». «Заводское дело» могло включать

«трактаты о примечательнейших... металлургических процессах, изложение новых открытий, усовершенствований и опытов по металлургии», описания иноземных и отечественных заводов «с показанием их совершенств и недостатков». Часть этого «отделения» посвящалась бы российской горной истории. В раздел «Монетное дело» включались описания монетных дворов, где выпускали металлические деньги, «сравнительные показания о пробах и весе монет в разных государствах, разбор монетных систем, вернейшие средства для испытания и отличия настоящих от поддельных монет, процессы получения в чистейшем виде золота, серебра и проч.». «Соляное дело» представляло бы «трактаты о примечательнейших галлургических процессах», описания иностранных и российских солеваренных предприятий, соляных озер и месторождений каменной соли.

Структурный раздел «Всеобщая горная и соляная библиография» знакомил бы читателей с выходящими на всех языках книгами «с замечаниями и рецензиями». Жизнеописания «славных натуралистов и других ученых мужей, оказавших услуги по горной, соляной и монетной части» составляли отделение «Биографические известия и некрология». Наконец, раздел «Смесь» заключал «все, что не имело на себе печати систематического расположения», а также уведомления и объявления об открытиях. Предполагалось, что в каждой «книжке», или номере журнала будут представлены не все, а лишь «известное число отделений, привлекающих наиболее внимание или любопытство». Но в совокупности статьи годового комплекта журнала представляли бы «полную систему Горных Наук и Искусств, из которой каждому читателю останется токмо почерпать частную для себя пользу и наставление» [8].

Убеждение в том, что «в материалах для издания журнала недостатка быть не может», основывалось на уверенности директора в поддержке важного начинания со стороны не только членов Ученого комитета, но и всего сообщества горных специалистов, среди которых, по его словам, «без сомнения найдутся любители наук». Для начала работы Е. В. Карнеев приказал передать Комитету все подходящие для публикации материалы, накопленные в Департаменте горных и соляных дел. А для подготовки новых журнальных статей он предложил учредить «горные общества» под руководством начальников казенных горнозаводских округов и управляющих соляными приисками и из числа «достоинейших горных чиновников» избрать «корреспондентов», которые бы ежемесячно сообщали Комитету «обо всех занятиях таковых обществ» и предоставляли подготовленные и обсужденные там «сочинения». Определенные надежды он возлагал и на «просвещенных владельцев частных заводов», которые «сами ли собою, или посредством управляющих своих, войдут с... Комитетом в ученые по сему предмету сношения» [9].

Был основательно продуман и механизм работы самого Ученого комитета по подготовке номеров журнала. Из числа его членов для каждого из тематических «отделений», «а особливо для важнейших», избирались научные редакторы, которые предварительно просматривали поступившие материалы, представляли их на заседаниях Комитета и вносили в них «перемены или исправления» по сделанным замечаниям. В помощь редакторам директор

Департамента назначал «особых горных офицеров под именем Сотрудников Комитета». Два секретаря имели «особенное смотрение за корректурою и за исправностью печатания и выхода книжек журнала», но не имели права «ничего в них переменять». Особый «рисовальщик» подготавливал к публикации чертежи и рисунки, а «чиновник для переписок» занимался оформлением текстов статей. Предполагалось каждый месяц выпускать «книжку» объемом «от осьми до десяти печатных листов и более, с чертежами и рисунками». Четыре «книжки» составляли одну «часть», а три «части» — годовой комплект. Для поддержания такой периодичности выхода журнала заседания Ученого комитета планировалось проводить один раз в неделю.

За свою работу члены Комитета не получали никакого жалования, секретари и рисовальщик оплачивались «из прибыльной от журнала суммы», а переписчик — из бюджета Департамента. Вместе с тем редакторы и сотрудники могли вознаграждаться в случае получения прибыли от продажи журнала и, кроме того, «имели право ожидать, по мере трудов своих, и других поощрений от Начальства». На издание министр финансов выделял 10 тыс. руб. «из остатков сумм Департамента», которые составляли «навсегда» оборотный капитал Ученого комитета, выступавшего не только в качестве редколлегии, но и своего рода коммерческого издательства. Этот капитал расходовался «для первоначальной выписки иностранных периодических сочинений и книг, а равно для составления запаса в бумаге и других материалов». Впоследствии предполагалось пополнять его из доходов от подписки или свободной продажи журнала. «Для собрания пренумерантов» немедленно открывалась подписка, ориентированная в первую очередь на горных чиновников и заводладельцев. Цена номера устанавливалась Комитетом и утверждалась министром. При этом чиновникам было обещано получение журнала «сколько можно дешевлею ценою» [10].

Все эти предложения, сформулированные в Департаменте горных и соляных дел, уже были «внесены на рассмотрение» министра финансов Е. Ф. Канкрин и безоговорочно одобрены императором. Дополнительно были выделены 5 тыс. руб., которые ежегодно отпускались «в пособие» Ученому комитету из Государственного казначейства для продажи журнала служащим «по горной и соляной части» «вполовину дешевле против той цены, какая за оный с других мест и лиц взимаема будет». Как с восхищением отзывался Е. В. Карнеев в своей речи на открытии Ученого комитета, «выслушав предложенные бумаги об издании Горного Журнала и учреждении Ученого Комитета, кто из нас не удивится, кто не ощутит восторга радости, видя, с какою готовностью, с каким ободрением Верховное Начальство приняло план сего полезного предприятия? Едва план сей был составлен и поднесен на воззрение Начальства, как оно простерло уже руку помощи для получения Чиновниками Журнала за половинную цену, и Всемилоливейший Государь Император, во внимании к представлению г. Министра Финансов, удостоил утверждением Своим не токмо состав Общества нашего, но и все другие по сему предмету предположения». «Остается нам, Почтенные Сочлены, — обращался он к участникам заседания, — приступить к самому делу... принять немедленно все

нужные по сему предмету меры, дабы успеть начать издание Журнала с 1-го Июля сего года, как Начальством предложено». «С моей стороны, — обещал он, — все... пособия Ученому Комитету... не премину я со всею моею охотою приводить в действие, как скоро чего Комитет потребует» [11].

Источники позволяют предположить, к кому обращался председатель со своей проникновенной речью в день открытия Ученого комитета 21 марта 1825 г. Всего за неделю перед этим событием Е. Ф. Канкрин назначил его членами 15 авторитетных горных деятелей и ученых, или, как определил министр, «отличных по Департаменту Горных и Соляных Дел чиновников». Это были вице-директор Департамента Николай Алексеевич Шленёв; командир Горного кадетского корпуса Петр Иванович Медер; начальник чертежной Департамента Евграф Петрович Ковалевский (будущий директор Департамента и министр народного просвещения); начальник Отделения казенных заводов Департамента Иван Афанасьевич Кованько и начальник Отделения по добыче соли и минералов Борис Иванович Иваницкий; горный начальник Олонецких заводов Александр Андреевич Фуллон; вардеин (чиновник, проверяющий работу монетного мастера) Санкт-Петербургского монетного двора Евстафий Иванович Эллерс; чиновник для особых поручений по Министерству финансов, бывший преподаватель металлургии и горного искусства и директор Златоустовской оружейной фабрики Антон Федорович Фурман; служащий лаборатории Монетного двора Василий Иванович Данилов; обер-берг-пробирер Алексей Александрович Яковлев; профессор минералогии Санкт-Петербургского университета Дмитрий Иванович Соколов и профессор химии Михаил Федорович Соловьев; советник столичной Казенной палаты, переводчик и преподаватель красноречия Андрей Афанасьевич Никитин; преподаватель горного и маркшейдерского искусства в кадетском корпусе Иван Григорьевич Гавеловский и преподаватель металлургии и пробирного искусства Василий Васильевич Любарский [12–14]. Таким был первый состав Ученого комитета по горной и соляной части, которому предстояло начать издание ведомственного журнала.

«Станем же с помощью Божиею трудиться, и поколику от нас зависит, соответствовать благотворным намерениям Правительства», — обращался к участникам заседания председательствующий. «Кто знает? — размышлял он. — Может быть, издание Горного Журнала, нами начатое, составит эпоху в Российской Горной истории; может быть, он послужит к важным и благоуспешным по сей части переменам. Но если бы сего и не случилось, то награда наша в том, что мы не тщетно станем трудиться, что цель будем иметь священную: пользу отечества, просвещение современников и благодарность потомства» [15].

«Мы успели токмо проложить стезю...»

Через год после описанного выше события, 20 марта 1826 г., в конференц-зале Горного кадетского корпуса прошло другое торжественное заседание Ученого комитета, посвященное первой годовщине выхода «Горного журнала».

«Быстро протек, почтенные Сочлены, первый год существования нашего Общества, — начал свое выступление председатель

Комитета Е. В. Карнеев. — Мы успели токмо проложить стезю к достижению предположенной цели. Но за всем тем издаваемый нами Горный Журнал приобрел уже благоволение Начальства, привлек внимание просвещенной публики, возбудил соревнование во многих горных чиновниках; словом сказать, начал уже производить то действие, какого от него ожидать надлежало» [2, 16].

Можно представить, что в зале, кроме 15 членов первоначального состава Комитета, назначенных министром, присутствовали и другие его участники. Комитету изначально было разрешено «избирать впредь от себя новых Членов по своему усмотрению». Уже в первом номере «Горного журнала» за июль 1825 г. сообщалось о вновь избранных девяти участниках. Ими оказались соратник знаменитого Чарльза Гаскойна, директор Колпинского машиностроительного завода Александр Яковлевич Вильсон; управляющий Петербургского литейного завода Матвей Егорович Кларк; писатель и публицист, петербургский вице-губернатор Дмитрий Максимович Княжевич, прежде служивший в Министерстве финансов; начальник Отделения по снабжению государства солью Департамента Яков Андреевич Подвысоцкий; художник-медальер, управляющий Технического отделения Экспедиции заготовления государственных бумаг Яков Яковлевич Рейхель; профессор физики Санкт-Петербургского университета Николай Прокофьевич Щеглов и профессор ботаники Яким Григорьевич Зембницкий, вскоре ставший директором Императорского минералогического общества; помощник инспектора Горного кадетского корпуса Валериан Емельянович Клоков, преподававший там законоведение и науку государственного хозяйства, и известный ученый-металлург, бывший управляющий Камско-Воткинского завода Петр Григорьевич Соболевский [13, 14, 17].

К концу 1825 г. этот список увеличился еще на восемь членов, среди которых были начальник алтайских Кольвано-Воскресенских заводов Петр Козьмич Фролов; учитель Горного кадетского корпуса Иван Николаевич Вольгемут, преподававший физику великим князьям Николаю и Михаилу Павловичам; управляющий канцелярии горного начальника Олонецких заводов Платон Антонович Лопатинский; мореплаватель и известный историк Василий Николаевич Берх; драматург и переводчик, одно время служивший библиотекарем в Горном кадетском корпусе Степан Иванович Висковатов; преподаватель грамматики и библиотекарь кадетского корпуса Павел Прокофьевич Баташёв; пробирер и преподаватель химии Иван Матвеевич Мухин и учитель немецкого языка, арифметики и геометрии Петр Борисович Берг. Вместе с председателем в Ученый комитет входили, таким образом, 33 его «действительных члена» из авторитетных горных деятелей и ученых, которые составили костяк редакции «Горного журнала» в первый год его издания [18].

Кроме них, были избраны и члены-корреспонденты из числа начальников региональных ведомственных учреждений. Им по предписанию министра отводилось руководство местными «горными обществами», которые создавались с целью подготовки материалов для журнала чиновниками, работавшими на заводах, рудниках и приисках по всей стране. В перечне таких лиц

были поименованы руководители Московского и Пермского горных правлений – берг-инспекторы Фавет Петрович Макиеровский и Андрей Терентьевич Булгаков, а также горные начальники (руководители казенных горнозаводских округов) Осип Сампоснович Осипов (Екатеринбургские заводы), Николай Родионович Мамышев (Гороблагодатские заводы), Степан Петрович Татаринов (Златоустовские заводы), Михаил Алексеевич Ферефоров (Богословские заводы), Конон Яковлевич Нестеровский (Камско-Воткинский завод), Густаф Густафович Гесс-де-Кальве (Луганский завод) и начальник Горной экспедиции при Верховном грузинском правительстве Алексей Михайлович Карпинский. Членами-корреспондентами значились и управляющие государственных соляных приисков – Григорий Никонорович Струков (Илецкое правление в Оренбургской губернии), Никита Никифорович Самойлов (Крымское), Павел Михайлович Иванов (Онежское – в Вологодской губернии), Андрей Павлович Версилев (Старорусское – в Новгородской губернии), Григорий Васильевич Пиленко (Дедюхинское – в Пермской губернии), Дмитрий Иванович Петров (Камышинское – в Саратовской губернии) и Егор Андреевич Македонский (Астраханское) [19].

Сотрудниками, или помощниками членов Комитета, избранных научными редакторами разделов журнала, начинали свою службу по горной части Илья Петрович Чайковский, впоследствии горный начальник Воткинского завода и директор Технологического института, отец великого русского композитора; Иван Иванович Вейц, будущий директор Екатеринбургской гранильной фабрики; Валериан Александрович Бекман, в то время практикант, впоследствии горный начальник Златоустовских и главный начальник Алтайских заводов, и другие подающие надежды молодые специалисты [20].

Вслед за выступлением председателя скорее всего секретарь Ученого комитета Евгений Алексеевич Шапошников (он был секретарем директора Департамента, а впоследствии дослужился до должности вице-директора) представил участникам торжественного заседания отчет о работе Комитета за 1825 г. Из него следовало, что по восьми основным «отделениям» журнала (не был представлен только раздел «Горные законоположения», начатый только в 1826 г.) были рассмотрены 74 статьи и еще «до 40 различных мелких сочинений и переводов», отнесенных к разделу «Смесь». Больше всего статей поступило в редакцию по разделам «Минералогия» (25 ед.) и «Горное дело» (13 ед.). Из общего числа полученных материалов 46 статей напечатаны в шести ежемесячных номерах, начиная с июльского [21].

Среди этих публикаций в раздел «Минералогия» были включены, например, статья Д. И. Соколова «Успехи геогнозии» (№ 1) и его перевод работы немецкого ученого Леопольда Гмелина «Опыт новой химической системы минералов» (№ 5, 6), исследования «Некоторые минералогические статистические известия о грузинском крае» А. М. Карпинского и «Общее обозрение окаменелостей» Я. Г. Зембницкого (№ 4). В разделе «Химия» были опубликованы переведенная П. Г. Соболевским статья «О соединении железа с углеродом» (из «Archiv Fur Mineralogie, Geognosie, Bergbau und Huttenkunde von C. I. V. Karsten», 1824) (№ 4) и «Химическое исследование грузинского квасцового камня»

А. А. Яковлева (№ 5). Обширная статья И. Г. Гавеловского «О разведке гор, или о средствах отыскания частных месторождений» вошла в раздел «Горное дело» (№ 1, 2, 4). В разделе «Монетное дело» была представлена детальная статья «Описание Санкт-Петербургского монетного двора» В. И. Данилова (№ 1–3, 5), в «Соляном деле» – статья В. В. Любарского «О солеварении на Пермских промыслах» (№ 1, 2, 6), а в «Заводском деле» – статьи П. Г. Соболевского «Об английском способе выделывания железа, посредством самодувных печей и катальных машин» (№ 1) и Г. Г. Гесс-де-Кальве «О горном и заводском производстве древних римлян» (№ 2).

А. А. Яковлев, видимо избранный редактором библиографического раздела, сделал обзор современных французских публикаций по аналитической химии и немецким «журналам по наукам естественным и техническим» (№ 2), а также дал развернутое «обозрение» книги «Минералогия» («Traité élémentaire de minéralogie. Paris, 1824») профессора Парижского университета Франсуа Сьюльпис Бёдана (№ 5). В разделе «Некрология» вспомнили скончавшегося лаборанта Санкт-Петербургского монетного двора Вениамина Вениаминовича Хоппе, который, «управляя разделительными операциями золота от серебра», своим служебным рвением и скромностью заслужил общее уважение и был награжден орденами Св. Владимира и Св. Анны (№ 3). В разделе «Смесь» оказались, в частности, любопытные заметки «О публичном испытании воспитанников Горного Корпуса в 1825 году» (№ 2), «О новых механических изобретениях г. Албана» (перевод с немецкого языка А. Ф. Фурмана) (№ 3) или «сообщение» П. Б. Берга «Наблюдения над электричеством, возбужденным в минералах теплотою» (№ 5).

Оценивая вклад своих сотрудников, председатель Ученого комитета поблагодарил всех без исключения «за примерное участие» и «обогащение Горного Журнала полезными статьями». При этом он особенно отметил «неутомимые труды» профессора Д. И. Соколова, подготовившего более десятка оригинальных статей и переводов, и капитан-лейтенанта В. Н. Берха, обширное сочинение которого об основателе российских горных заводов Виллиме Ивановиче Геннине готовилось к публикации в 1826 г. [22].

В представленном на торжественном заседании отчете были подведены и финансовые итоги первого полугодия работы издательства. Оказалось, что на журнал за это время подписались 1093 «пренумеранта» и поступило 13140 руб. дохода, считая по 10 руб. за месячный экземпляр с горных чиновников и по 20 руб. – «с посторонних особ». Общий бюджет составил 25640 руб., включая 10 тыс. руб. оборотного капитала, переданного из Департамента при открытии Ученого комитета, и 2,5 тыс. руб., полученных «по соизволению Императора» из Государственного казначейства в качестве компенсации за снижение цены подписки для «горных офицеров». Докладчик пояснил, что, как и предполагалось, оборотный капитал расходовался только на первоначальные потребности. К концу года он пополнился «из собранных по подпискам сумм» и был положен в «сохранную казну» (своего рода банк) при Санкт-Петербургском воспитательном доме «для приращения из процентов».

Судя по статьям расхода, всего было отпечатано 7,2 тыс. экземпляров, или 1,2 тыс. полугодовых комплектов, из которых 731 был отправлен подписчикам «через Газетную Экспедицию». Все издательские расходы составили 12139 руб., включая печать и переплет журнала в Военной типографии при Главном штабе, «нарисование виньета» на обложку (300 руб.), жалование секретарям и рисовальщику (1,5 тыс. руб.) и приобретение для Комитета книг и периодических изданий (16 книг на французском и немецком языках, 12 иностранных и российских периодических изданий на 1053 руб.). Доход (вместе с накопившимися процентами) выразился в круглой сумме 3,5 тыс. руб., что свидетельствовало не только о популярности издания, но и о коммерческом успехе издательства. Элементарный подсчет показывал, что полугодовой комплект из шести номеров обошелся в 10 руб. 11 коп. Это было существенно ниже цены, хотя, кроме рассылки подписчикам, журнал успели подарить Александру I, скончавшемуся в декабре 1825 г., и Николаю I, а несколько экземпляров «доставили разным почетным особам, в Университеты и некоторые присутственные места» [23].

Другой отчет, прозвучавший на том заседании, касался организации научных горных обществ, специально создаваемых для подготовки материалов для журнала. Оказалось, что местные «горные деятели» живо откликнулись на это начинание Ученого комитета. В короткие сроки такие общества были открыты на Екатеринбургских, Гороблагодатских, Златоустовских, Камско-Воткинских и Олонецких казенных заводах, при Пермском горном правлении, Старорусском, Дедюхинском, Крымском, Онежском соляных правлениях и при Илецкой защите.

Судя по списку 27 корреспондентов, непосредственно отвечавших за работу обществ и переписку с Ученым комитетом, среди них были тогда еще маркшейдеры (горный чин, равный по Табели о рангах титулярному советнику в гражданской службе или армейскому капитану) Павел Петрович Аносов (впоследствии горный начальник Златоустовский заводов, главный начальник Алтайских горных заводов), Петр Иванович Порозов (горный начальник Богословских заводов и уральский берг-инспектор), Иван Константинович Кокшаров (управляющий Березовскими золотыми промыслами), Федор Федорович Бегер (директор Департамента горных и соляных дел), Роман Адамович Армстронг (горный начальник Олонецких заводов и Петербургского Монетного двора) и др. [19, 24]. Как видно, многие выдающиеся горные деятели начинали свою служебную и научную карьеру в качестве корреспондентов «Горного журнала».

Из краткого отчета следует, что деятельность горных обществ заключалась «в исследовании разных предположений и теорий о происхождении золотоносных песков на Урале... и вообще в изыскании разных средств к усовершенствованию металлургической и технической части по горным заводам», а также в обсуждении разнообразных вопросов «по части соляной». Кроме того, «предметом постоянных занятий» обществ были «разные любопытные сочинения и переводы известных иностранных писателей, для распространения в отечестве нашем полезных сведений по горной и соляной части». В последнем за 1825 г. шестом номере журнала был опубликован более подробный отчет «о занятиях

горных обществ» [25, 26]. В своей же речи на торжественном заседании Комитета Е. В. Карнеев обратил особое внимание на усердие участников этих обществ, которые «стремились к одной и той же цели и одни перед другими соперничали в доставлении материалов для журнала». «Некоторые из Членов сих Обществ неоднократно уже восхищали нас превосходными своими произведениями», — отметил председатель, пообещав «доставить обо всем до сведения высшего Начальства, которое без всякого сомнения отдаст в свое время справедливость всем и каждому по мере заслуг» [22].

«Мы еще только вступили на предназначенное нам поприще, — говорил он. — Много еще предложит нам понести трудов и употребить усилий, доколе, наконец, подвиги наши на сем поприще увенчаны будут совершенным успехом. Нет, однакож, повода в том сомневаться. Напротив того, каждый из нас одушевлен уверенностью, что доброе начало будет иметь и последствия столь же благие. Общее усердие и деятельность служат тому порукою» [22].

Заключение

Как уже неоднократно отмечали исследователи [27–30], «Горный журнал» вполне оправдал надежды его учредителей и стал, по выражению Е. Ф. Канкринна, «ближайшим и вернейшим средством к распространению всякого рода познаний, не только казенным местам, но и частным заводам, для усовершенствования всех частей Горного и Соляного производства» [31]. Более того, примеру горного ведомства последовали другие государственные организации, учредив собственные научно-технические журналы. Так, в 1826 г. при Институте Корпуса путей сообщения стали издавать «Журнал путей сообщения», в 1826–1827 гг. Ученый комитет при Военном министерстве начал издание «Инженерных записок» и «Военного журнала». Этими ведомствами были восприняты и общенаучные подходы к структуре и содержанию печатного издания нового типа и принципы организации редакторской и издательской работы, заложенные при основании «Горного журнала».

Успешное начало деятельности столичного Ученого комитета и региональных горных обществ и судя по всему широкий общественный резонанс по поводу выхода журнала послужили основанием для активизации их работы. Уже в октябрьском номере за 1825 г. было опубликовано объявление, что «Высочайше учрежденный при Горном Кадетском Корпусе Ученый Комитет по Горной и Соляной части будет продолжать... издание Горного Журнала, начатое с июля месяца ныне текущего года». «Предметы, входящие в состав Журнала», оставались прежними, что свидетельствовало о правильности их выбора, а цена за годовую подписку «с пересылкою во все места» понижалась до 40 руб. и для чиновников, служащих по горной и соляной части — до 20 руб. Подписка оформлялась в Департаменте горных и соляных дел, где «выдавался билет на получение Журнала». «Относиться или прямо в Департамент, или к Секретарю Ученого Комитета Шапошникову, в том же Департаменте служащему, — рекомендовалось в объявлении. — Иногородние особы благоволят адресоваться в Газетную Экспедицию С.-Петербургского Почтамта» [32].

Библиографический список

1. Докладная записка об издании Горного журнала // Горный журнал. 1825. № 1. С. IV–V.
2. О торжественном заседании Ученого комитета // Горный журнал. 1826. № 4. С. 147.
3. Речь, произнесенная председательствующим при открытии Ученого комитета // Горный журнал. 1825. № 1. С. XV.
4. Карнеев Егор Васильевич // Русский биографический словарь. – СПб. – М., 1897. Т. 8. С. 531–532.
5. Аколов А. И. Отечественные специальные журналы 1765–1917: историко-типологический обзор. – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского ун-та, 1986. С. 12–18.
6. Речь, произнесенная Г. Председательствующим при открытии Ученого Комитета по Горной и Соляной части, 21 Марта 1825 года // Горный журнал. 1825. № 1. С. XVI–XVII.
7. Там же. С. XVII–XIX.
8. Там же. С. XIX–XXII.
9. Там же. С. XXII–XXIII.
10. Там же. С. VII–X.
11. Там же. С. XXIII–XXIV.
12. Там же. С. XII–XIII.
13. Грибанов А. А. Горная Россия. Кто есть кто в истории горного дела России XI–XX вв.: Краткий историко-библиографический справочник. – СПб., 2014. Т. 1. – 463 с.
14. Зabloцкий Е. М. Горное профессиональное сообщество дореволюционной России. 2005. URL: <http://russmin.narod.ru/> (дата обращения: 15.06.2021).
15. Речь, произнесенная председательствующим при открытии Ученого комитета // Горный журнал. 1825. № 1. С. XXV.
16. О торжественном заседании Ученого комитета // Горный журнал. 1826. № 4. С. 148.
17. Смесь // Горный журнал. 1825. № 1. С. 137–138.
18. Список членов, сотрудников и корреспондентов Ученого комитета // Горный журнал. 1825. № 6. С. 153–154.
19. Смесь // Горный журнал. 1825. № 1. С. 138–139.
20. Список членов, сотрудников и корреспондентов Ученого комитета // Горный журнал. 1825. № 6. С. 154–155.
21. О торжественном заседании Ученого комитета // Горный журнал. 1826. № 4. С. 151–153.
22. Там же. С. 148–149.
23. Там же. С. 153–156.
24. Список членов, сотрудников и корреспондентов Ученого комитета // Горный журнал. 1825. № 6. С. 155–156.
25. О занятиях горных обществ // Горный журнал. 1825. № 6. С. 124–126.
26. Бахшаев А. А. Горный ученый комитет и горные научные общества на Урале в первой половине XIX в. // Документ. Архив. История. Современность. 2010. № 11. С. 108–116.
27. Аколов А. И. Отечественные специальные журналы 1765–1917: историко-типологический обзор. – Ростов-на-Дону, 1986. – 127 с.
28. Белоглазов И. Н., Кен Н. А., Воробьев А. Г. На пользу Отечеству. – М.: ИД «Руда и Металлы», 2000. – 152 с.
29. Пучков Л. А., Воробьев А. Г., Федина О. В. «Горный Журнал» и развитие горного дела в России // Горный журнал. 2015. № 7. С. 5–12. DOI: 10.17580/gzh.2015.07.01
30. Алексеева Е. В. «Горный журнал» как источник для изучения места и роли Урала в российской и мировой индустриальной истории // Годы поисков и свершений: кафедра Истории науки и техники УГТУ – УПИ – УрФУ в 1999–2014 гг.: Пятая ежегодная науч. конф. кафедры Истории науки и техники. – Екатеринбург: УМЦ УПИ, 2015. С. 208–211.
31. Подробная записка // Горный журнал. 1825. № 1. С. XI.
32. Смесь // Горный журнал. 1825. № 4. С. 160–161. **PDF**

«GORNYI ZHURNAL», 2022, № 3, pp. 82–88
DOI: 10.17580/gzh.2022.03.13

Gornyi Zhurnal in 1825: A start in history of the publication

Information about author

E. G. Neklyudov¹, Chief Researcher, Doctor of Historical Sciences, ntplant9@mail.ru

¹Institute of History and Archeology, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Abstract

The article describes early history of the first Russia's publication in the field of science and technology – *Gornyi Zhurnal*. The solemn meeting on 21 March 1825 devoted to establishment of the Academic Committee at the Mining and Salt Department for preparation and publication of the *Journal*, as well as the solemn meeting on 20 March 1826 on the first anniversary of the Committee are pictured. The organizers and participants of the meetings are presented, and the contents of speeches, plans and reports are delivered.

In his speech at the first meeting, the Department Director E. V. Karneev gave grounds for the necessity of a mining publication and presented the work program of the Academic Committee including leading theoreticians and practitioners in mining. It was supposed to elect science editors from the members of the Academic Committee for each of 10 topics of the *Journal* to review scientific contributions at to present them at the meetings of the Committee. For preparation of the *Journal's* articles, regional *mining societies* were founded to be headed by managers of governmental mining districts and salt-works, and from the list of the “salt of the earth” officials, “correspondents” were selected to present the prepared and discussed materials at the metropolitan Academic Committee.

Discussed at the second meeting, the scientific and financial performance of the Academic Committee during its first year of life proved the popularity and business success of the *Journal*. *Gornyi Zhurnal* totally met expectations of the founders and, as the Minister of Finance E. F. Kankrin said, the *Journal* became “an immediate tool for the spread of various knowledge ... promoting improvement in the mining and salt industries”. The other governmental bodies followed the lead of the mining authorities and established their own scientific and technical periodicals using the proposed performance model.

Keywords: 1825, *Gornyi Zhurnal*, Academic Committee on Mining and Salt, mining societies, Alexander I, E. F. Kankrin, E. V. Karneev.

References

1. Memorandum Report on Publication of *Gornyi Zhurnal*. *Gornyi Zhurnal*. 1825. No. 1. pp. IV–V.
2. Solemn meeting of the Academic Committee. *Gornyi Zhurnal*. 1826. No. 4. p. 147.
3. The Academic Committee opening speech of the Chairman. *Gornyi Zhurnal*. 1825. No. 1. p. XV.
4. Karneev Egor Vasilevich. Russian Biographical Directory. Saint-Petersburg – Moscow, 1897. Vol. 8. pp. 531–532.
5. Akopov A. I. Russian special journals 1765–1917. Historical typological review. Rostov-on-Don: Izdatelstvo Rostovskogo universiteta, 1986. pp. 12–18.
6. Chairman's welcome address at the Academic Committee of the Mining and Salt Industry on 21 March 1825. *Gornyi Zhurnal*. 1825. No. 1. pp. XVI–XVII.
7. Chairman's welcome address at the Academic Committee of the Mining and Salt Industry on 21 March 1825. *Gornyi Zhurnal*. 1825. No. 1. pp. XVII–XIX.

8. Chairman's welcome address at the Academic Committee of the Mining and Salt Industry on 21 March 1825. *Gornyi Zhurnal*. 1825. No. 1. pp. XIX–XXII.
9. Chairman's welcome address at the Academic Committee of the Mining and Salt Industry on 21 March 1825. *Gornyi Zhurnal*. 1825. No. 1. pp. XXII–XXIII.
10. Chairman's welcome address at the Academic Committee of the Mining and Salt Industry on 21 March 1825. *Gornyi Zhurnal*. 1825. No. 1. pp. VII–X.
11. Chairman's welcome address at the Academic Committee of the Mining and Salt Industry on 21 March 1825. *Gornyi Zhurnal*. 1825. No. 1. pp. XXIII–XXIV.
12. Chairman's welcome address at the Academic Committee of the Mining and Salt Industry on 21 March 1825. *Gornyi Zhurnal*. 1825. No. 1. pp. XII–XIII.
13. Griбанov A. A. Miners of Russia. Who's who in history of mining in Russia in XI–XX centuries: Brief historical and bibliographic reference book. Saint-Petersburg, 2014. Vol. 1. 463 p.
14. Zablockiy E. M. Professional mining community in czarist Russia. 2005. Available at: <http://russmin.narod.ru/> (accessed: 15.06.2021).
15. Chairman's welcome address at the Academic Committee of the Mining and Salt Industry on 21 March 1825. *Gornyi Zhurnal*. 1825. No. 1. p. XXV.
16. Solemn meeting of the Academic Committee. *Gornyi Zhurnal*. 1826. No. 4. p. 148.
17. Mixture. *Gornyi Zhurnal*. 1825. No. 1. pp. 137–138.
18. Lest of members, fellows and correspondents of the Academic Committee. *Gornyi Zhurnal*. 1825. No. 6. pp. 153–154.
19. Mixture. *Gornyi Zhurnal*. 1825. No. 1. pp. 138–139.
20. Lest of members, fellows and correspondents of the Academic Committee. *Gornyi Zhurnal*. 1825. No. 6. pp. 154–155.
21. Solemn meeting of the Academic Committee. *Gornyi Zhurnal*. 1826. No. 4. pp. 151–153.
22. Solemn meeting of the Academic Committee. *Gornyi Zhurnal*. 1826. No. 4. pp. 148–149.
23. Solemn meeting of the Academic Committee. *Gornyi Zhurnal*. 1826. No. 4. pp. 153–156.
24. Lest of members, fellows and correspondents of the Academic Committee. *Gornyi Zhurnal*. 1826. No. 6. pp. 155–156.
25. Activities of mining societies. *Gornyi Zhurnal*. 1825. No. 6. pp. 124–126.
26. Bakshaev A. A. Mining Academic Committee and mining societies in the Ural in the first half of XIX century. *Dokument. Arkhiv. Istoriya. Sovremennost*. 2010. No. 11. pp. 108–116.
27. Akopov A. I. Russian special journals 1765–1917. Historical typological review. Rostov-on-Don, 1986. 127 p.
28. Beloglavov I. N., Ken N. A., Vorobev A. G. For the benefit of our country. Moscow: ID Ruda i Metally, 2000. 152 p.
29. Puchkov L. A., Vorobiev A. G., Fedina O. V. «Gornyi Zhurnal» and development of mining in Russia. *Gornyi Zhurnal*. 2015. No. 7. pp. 5–12. DOI: 10.17580/gzh.2015.07.01
30. Alekseeva E. V. *Gornyi Zhurnal* as a source to study the role of the Ural in Russian and global industrial history. *Years of Findings and Achievements: Department of History of Science and Technology at USTU-UPU-UrFU in 1999–2014: The 5th Annual Conference of Department of History of Science and Technology*. Yekaterinburg: UMTs UPI, 2015. pp. 208–211.
31. Detail note. *Gornyi Zhurnal*. 1825. No. 1. p. XI.
32. Mixture. *Gornyi Zhurnal*. 1825. No. 4. pp. 160–161.

УДК 622:001(091)

ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ РУССКИХ ГЕОЛОГОВ И ГОРНЫХ ИНЖЕНЕРОВ В СТРАНАХ АЗИАТСКО-ТИХООКЕАНСКОГО РЕГИОНА ПОСЛЕ 1917 г.

Н. В. ХИСАМУТДИНОВА¹, проф., д-р ист. наук,
natalya.khisamutdinova@vvsu.ru

А. А. ХИСАМУТДИНОВ², проф., д-р ист. наук

¹ Владивостокский государственный университет экономики и сервиса,
Владивосток, Россия

² Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

Введение

Работа российских геологов в других странах началась задолго до массовых миграций, связанных с революционными событиями в России в 1917 г. В период существования Российско-Американской компании Россия пыталась искать на Аляске полезные ископаемые, а при изучении возможности строительства Китайско-Восточной железной дороги (КВЖД) велась разведка запасов каменного угля на территории Маньчжурии. Если эти случаи описаны, то о научных контактах периода Гражданской войны или работе геологов-эмигрантов известно гораздо меньше. В справочных изданиях выбор персоналий чаще приходится на Европу, чем на страны Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР), к тому же основное внимание уделяется гуманитариям и лицам творческих профессий. Те немногие труды, что посвящены геологам и горным инженерам, редко содержат подробности зарубежной профессиональной деятельности, что связано с труднодоступностью сведений, находящихся в зарубежных архивах. Из-за этого американские и азиатские страницы русской геологической истории оказываются малоисследованными. Между тем сегодня, когда международный рынок труда и научное сотрудничество способствуют активному перемещению людей по миру, анализ профессиональной деятельности русских специалистов за рубежом весьма актуален. Среди наиболее значимых вопросов — степень профессиональной адаптации, деловая и общественная активность в новой среде.

Дальгеолком как опыт адаптации к условиям беженства

В годы Гражданской войны во Владивостоке собралось немало специалистов горно-геологического профиля. Отрезанные от Геологического комитета в Петрограде, они уже имели опыт самостоятельных действий, в частности при создании в Томске Института исследования Сибири (1919 г.)

Рассмотрена деятельность российских специалистов горно-геологического профиля в Китае, Японии и США после Октябрьской революции 1917 г. и показан вклад, внесенный ими в геологическую науку и горное дело этих стран. В Китае и США они стали признанными специалистами в области геологии угля, нефти и других минерально-сырьевых ресурсов, оставив как теоретическое наследие, так и практические разработки, способствовавшие развитию экономики этих стран. Вклад специалистов из России прослеживается также и в развитии японской геологии. Они оставили после себя богатое научное наследие в виде статей, монографий и диссертаций, которые были высоко оценены зарубежными коллегами и остаются востребованными по сей день.

Ключевые слова: Дальневосточный геологический комитет, русские геологи и горные инженеры в США, геология Китая, русская геологическая школа

DOI: 10.17580/gzh.2022.03.14

и Сибирского геологического комитета (1918 г.) [1, с. 690]. Инициатором основания подобной организации во Владивостоке выступил Э. Э. Анерт, руководивший с 1915 г. Дальневосточной секцией Геолкома. С 1914 г. Геолком отдавал предпочтение прикладным работам: поиску стратегически важных минеральных ресурсов и экспертизе месторождений полезных ископаемых [2, с. 541]. Это же направление стало главным для Дальневосточного геологического комитета (Дальгеолкома), учрежденного в мае 1920 г. при экономическом отделе Приморской областной земской управы. Сотрудничать с ним стали большинство геологов и горных инженеров, оказавшихся во Владивостоке. Они обнаружили здесь обширное поле деятельности: тихоокеанская российская окраина отличалась слабой изученностью в геологическом отношении. Несмотря на сложную политическую обстановку и плохое финансовое положение, им удалось охватить исследованиями наиболее важные в геологическом отношении районы. Месторождения углей изучали М. К. Елиашевич (в окрестностях Владивостока и Сучанское), М. А. Павлов (Верхнесуйфунское), П. И. Полевой, А. И. Козлов и А. Н. Криштофович (на Сахалине). Исследования железорудных районов проводили В. М. Дервиз (Ольгинский район) и А. И. Педашенко (Сергеевско-Ипполитовский район). Отдельные месторождения золота исследовал П. П. Гудков. Был начат и учет минеральных ресурсов региона (П. П. Гудков). Результаты исследований были опубликованы в «Материалах по геологии и полезным ископаемым Дальнего Востока» (к 1925 г. — 36 выпусков).

Современные исследования подтверждают, что создание Дальгеолкома было единственным способом продолжить изучение российского Дальнего Востока в годы войны, сохранить оказавшиеся здесь кадры геологов, пополнить научные данные, полученные ранее [3; 4, с. 2]. В частности, детальное изучение П. И. Полевым кайнозойских опорных разрезов Северного Сахалина заложило основу стратиграфических исследований в этом районе [5, с. 71], а А. Н. Криштофович, изучая третичную флору Сахалина, бухты Посъет и р. Амгу, проявил себя как первый на Дальнем Востоке палеонтолог. Вместе с тем сотрудничество геологов и горных инженеров с Дальгеолкомом нужно расценивать как опыт адаптации к условиям беженства. Примечательно, что при отъезде в эмиграцию М. К. Елиашевич, И. П. Толмачев и П. П. Гудков сохранили членство в Дальгеолкоме. В отчете за 1922 г. отмечено, что они находятся в заграничной командировке [6, с. 3].

Русские геологи и Япония

В ходе предыдущих исследований Э. Э. Анерт начал формировать идею связи синклинальных систем Евразийской зоны и АТР. Этот интерес разделили и его коллеги. М. К. Елиашевич, изучая петрографический состав и отпечатки ископаемой флоры на берегах залива Петра Великого, обратил внимание на «замечательно удачную для интересов геологии» скупенность отложений самого разнообразного возраста на сравнительно небольшой территории, где «возможно, не разбрасывая геологических наблюдений на обширную территорию, составить в сравнительно короткое время полную шкалу местных осадочных отложений, с которой возможно будет сопоставлять отдельные наблюдения в различных пунктах местного края, и которую, с другой стороны, сопоставлять с подобными же шкалами осадочных отложений соседних стран» [7, с. 6].

Интерес к сравнительному анализу геологического материала различных регионов АТР проявился в сотрудничестве членов Дальгеолкома с коллегами из Китая и Японии. Становясь на путь индустриального развития, Япония была заинтересована в европейских знаниях и технологиях и контактах с русскими. Русским же геологам требовались библиотеки Японии с литературой по геологии Восточной Азии, лаборатории (за отсутствием таковых во Владивостоке) и японские коллекции, особенно по Сахалину, позволявшие делать сопоставления с собственным материалом. «Ввиду сходства геологической истории островов внешней дуги Восточной Азии мы имеем в Японии значительное количество подобных материалов», — писал А. Н. Криштофович [8, с. 2]. В октябре 1919 г., возвращаясь с Сахалина по окончании геологических работ, он почти на год задержался в Японии, обработав в Императорском Токийском университете и собственные материалы, и ряд коллекций японских и русских коллег. Так, изучая коллекцию Э. Э. Анерта (ископаемая третичная флора посъетского бурогоугольного района), он определил возраст свиты как близкий к возрасту мгачской флоры на Сахалине или кенайскому ярусу на Аляске. Хотя сходство между американскими и восточноазиатскими отложениями Криштофович замечал и раньше, описание некоторых

растений из японских коллекций позволило ему сделать вывод о «необходимости создания независимой от Европы и даже от Америки шкалы последовательности флор и фаун стран Дальнего Востока ввиду несомненно своеобразного хода климатических и биологических явлений в этих странах в периоды мела и третичный» [8, с. 8]. Незамедлительная публикация в Японии наблюдений Криштофовича [9, 10] свидетельствует об актуальности его исследований для японцев. Они оставались востребованы и в дальнейшем, хотя некоторые выводы подвергались ревизии [11, 12].

П. И. Полевому, изучавшему в 1920 г. результаты исследований нефтеносного района восточного побережья Сахалина японскими геологами под руководством Кабаяши, сравнение японских и русских коллекций позволило в дальнейшем выделить Сахалино-Японскую (Хоккайдо-Сахалинскую) горную систему [13, с. 148]. М. А. Павлову, командированному с группой студентов на медный рудник Ашио-Нико (район Чичибу, Япония) в 1922 г., сравнение местных образцов горных пород и руды с приморскими позволило сделать вывод о схожести условий образования месторождений на российской и японской территориях. Японские исследователи позднее использовали материалы русских геологов, сравнивая отложения Японии, Камчатки и Сахалина [14].

Исследования в Китае

Исследования в Китае связаны прежде всего с именем Э. Э. Анерта, собравшего первый геологический материал в Маньчжурии во время экспедиции в 1896 г. Продолжив исследования, он открыл ряд угольных месторождений, в частности Чжалайнорское (совместно с Н. Н. Бронниковым), что имело огромное значение для функционирования КВЖД. Большую работу Анерт провел на Мулинских угольных копях, исследовав геологические факторы, формирующие физико-механические свойства угля, и сделал вывод о возможности организации крупномасштабной добычи [15, с. 4]. Окончательно переехав в 1924 г. в Харбин для продолжения исследований в Маньчжурии, Анерт числился внештатным сотрудником Дальгеолкома и выполнял его поручение по исследованию полосы восточной части КВЖД (март — ноябрь 1924 г.). Им, в частности, был изучен обширный юрский угленосный бассейн по среднему течению р. Мурени. Изучая китайские образцы, он обнаружил сходство (аналогичное строение и близкий возраст) с материалами российского Дальнего Востока и впервые высказал предположение, что Южно-Уссурийский край (как тогда называли Приморье) и Маньчжурия являются единой платформой. Подтверждение этой теории находится в современных исследованиях [16–18].

Идеи Анерта разделял его младший коллега А. М. Смирнов (Петербург, 1908 — Владивосток, 1984), занимавшийся в Китае практической и исследовательской работой в 1930–1950 гг. Это подтверждает тематика его кандидатской (Геологическое развитие и структурные особенности зоны сочленения Китайской платформы и Тихоокеанского складчатого пояса, 1960 г.) и докторской (Докембрий северо-запада

Тихоокеанского подвижного пояса и его платформенного обрамления, 1972 г.) диссертаций и двух монографий [19, 20].

Работая геологом-консультантом в управлении КВЖД, Анерт до 1931 г. проводил геологические работы и картирование в обширном районе вдоль линий КВЖД и давал рекомендации по разведке угля в разных районах Китая. После оккупации Маньчжурии Японией он консультировал по вопросам геологии и горного дела японские власти, которые были заинтересованы в усилении своих экономических позиций в Северо-Восточном Китае [21, с. 107–108]. Имея большой опыт комплексного исследования полезных ископаемых, Анерт оставил много ценных наблюдений, в частности об обогащении угольных месторождений редкими элементами-примесями, что было подтверждено в дальнейшем китайскими и российскими учеными [17, 22, 23].

Анерт читал лекции в Харбинском педагогическом институте (до 1936 г.), учил горному делу слушателей Первых Харбинских горных курсов (1932–1933 гг.), преподавал в институте «Да-тун» в Синьцзине (Чанчуне) и университетах Токио и Осаки (1933 г.), куда его приглашали для чтения лекций по геологии Маньчжурии. В течение пяти лет он сотрудничал с японскими геологами при составлении русско-немецко-англо-японского горно-геологического словаря, который остался неопубликованным. Итогом работы Анерта стала общая схема орографического и геологического строения северо-востока Китая, что нашло отражение в ряде работ: «Положение дел учета ресурсов района КВЖД» (изд-во КВЖД, 1921, 16 с.), «Полезные ископаемые Северной Маньчжурии» (Труды ОИМК. Вып. 1. Харбин, 1928, 238 с.), «Горная промышленность Маньчжурии» (Харбин, 1934), «История исследований и горного дела в Маньчжурии» (Известия Клуба естествознания и географии ХСМЛ. Харбин, 1941, 46 с.). Последняя работа сначала была издана на японском языке в 1939 г. [15, с. 5].

Заслуживает внимания и работа геолога в общественных организациях, в частности в Обществе изучения Маньчжурского края (ОИМК, 1924 г.). По инициативе Анерта и под его руководством при ОИМК стала работать секция геологии и физической географии, а в музее появился отдел геологии. Участвуя в молодежных организациях (Клуб естествознания и географии Христианского Союза молодых людей, 1929–1946 гг., – председатель; Национальная организация исследователей-пржевальцев, 1929–1945 гг.), он способствовал приобщению к науке и геологическим исследованиям молодых людей – как русских, так и китайцев.

Анализ деятельности русских геологов в Китае не может быть полным: проблемы с трудоустройством лишали их возможности работать по специальности. Эмигрант И. И. Серебренников писал, что «русская эмиграция в Китае, если не считать ее военных кадров, была мало использована в практических или научных целях китайскими властями, занимавшимися больше междоусобными склоками, чем приведением своей страны в порядок» (Serebrennikov I. I. Hoover Institute Archives, box 10).

Русские геологи в США

В отличие от Китая, в Америке опыт и знания геологов-эмигрантов быстро нашли применение. В 1920-е годы геология относилась к приоритетным отраслям науки и техники США с особо пристальным вниманием к исследованиям нефти и газа. Вовлеченными в них оказались и русские специалисты. Так, в летний сезон 1923 г. по приглашению нефтяной компании McKinley Syndicate (Калифорния) П. П. Гудков проводил разведочные работы в долине Сан-Хоакин (San Joaquin), дав положительное заключение. В компаниях, занятых разведкой нефти, он работал и в Лос-Анджелесе (с 1924 г.). В этот период он опубликовал ряд статей, которые «послужили к лучшему пониманию геологии южной части Сан-Хоакинской долины и в конечном счете способствовали открытию нефтяных полей в Кэттлемен-Хиллс» [24]. С 1926 г. геолог работал как независимый эксперт и в 1937 г. открыл собственную консультационную контору для геологических и палеонтологических определений образцов пород, полученных при бурении скважин. В 1951 г. совместно с американским геологом Хьюзом (Aden W. Hughes) он создал фирму Goudkoff and Hughes, которая быстро заняла одно из ведущих мест в нефтяной промышленности Калифорнии.

Востребованными в США оказались и результаты прежних исследований геологов из России. Так, в 1920–1930-е годы были изданы статьи И. П. Толмачева о российском опыте разведки и добычи минеральных ресурсов [25–27]. Его публикации американского периода посвящены в основном проблемам нефтегазоносности.

Внимание американского правительства к разведке полезных ископаемых привело к быстрому развитию Геологических служб (Geological Survey), работавших со второй половины XIX в. при университетах США с задачей «a complete geological survey of the state, giving special attention to any and all natural products of economic importance» («полное геологическое исследование штата с особым вниманием к природным ресурсам, представляющим интерес для экономики») [28, р. 5]. На конец 1920-х годов пришелся их расцвет, который и застали русские геологи. В частности, с Геологической службой Канзаса связано начало американской карьеры М. К. Елиашевича, принявшего гражданство США в 1930 г. под именем Maxim Conrad Elias. В 1925 г. Академия наук Калифорнии привлекла его к изучению окаменелостей на местных угольных месторождениях, а в 1927 г. Елиашевич окончательно перешел на работу по специальности в геологоразведочную компанию Etnyre Exploration Co., работавшую на территории штатов Канзас и Колорадо.

Результатом девятилетнего изучения им отложений мелового и третичного периодов в Канзасе и соседних штатах стали публикации о геологических особенностях местности. Подробный геологический обзор округа Уэллис [29] современники называли главным трудом по изучаемому геологическому периоду [30, р. 73]. Несколько крупных работ М. К. Елиашевича посвящены обнаружению пермской флоры на месте древнего моря на территории Западного Канзаса. В одной из них он

описал и предложенную им реконструкцию условий осадконакопления, основанную на изучении образцов пермской флоры серии Биг Блю (Big Blue Series) [31]. По свидетельству современников, эта работа считается классической и по сей день обязательна для всех, кто работает в этом районе [30, р. 74]. С ней смогли познакомиться и в России, где опубликовали перевод. Материалы по растениям третичного периода Америки, дополненные собранными в России (на Урале и Дальнем Востоке), легли в основу диссертации Елиашевича «Tertiary Grasses of the High Plains and Their Relations to the Geology of the Region» («Травы третичного периода высокогорных равнин и их связь с геологией района») на степень доктора философии (Йельский университет, 1939 г.).

В дальнейшем Елиашевич более углубленно занимался вопросами палеоботаники и палеоэкологии, написав в соавторстве с главным геологом Небраски Дж. Кондрой (G. E. Condra) монографию «Study and revision of Archimedes (Hall)» (Geological Society of America. 1944. Special Paper 53. 243 p.). Он консультировал американские компании, занимавшиеся разведкой и добычей полезных ископаемых, в том числе Standard Oil Co. Опыт разведки месторождений нефти Елиашевич приобрел в 1937–1938 гг. в нефтяной компании Socopec Vacuum Oil в Колумбии и в дальнейшем продолжал обращаться к этой теме. Ряд работ Елиашевича американского периода [32–35] посвящены вопросам определения возраста отложений. На них ссылаются и современные исследователи [36, 37]. Коллеги из США, работавшие рядом с русским геологом, считают его инициатором ряда новых направлений в исследованиях и называют одним из основателей американской стратиграфии, досконально изучившим огромное количество ископаемых окаменелостей, относящихся к разным эрам геохронологической истории Земли [30, р. 74].

Как признанного специалиста в области геологии и палеонтологии Елиашевича привлекали к работе в крупных американских организациях: Национальном научно-исследовательском совете (National Research Council), Комитете по проблемам генетики, палеонтологии и систематики (Committee on Common Problems in Genetics, Paleontology and Systematics), Комитете по проблемам морской экологии и палеоэкологии (Committee on a Treatise on Marine Ecology and Paleocology).

Связь друг с другом и коллегами из Советского Союза русские американцы поддерживали, встречаясь на заседаниях научных обществ (Геологическом и Палеонтологическом обществах Америки, Американской ассоциации по развитию науки) и различных научных форумах. В 1947 г. по просьбе редколлегии «Известий Академии наук СССР» Гудков подготовил американскую библиографию исследований нефтяных месторождений [38].

О геологических находках и развитии горной промышленности в СССР русские специалисты в Америке узнавали и из «Горного журнала», старейшего российского научного издания. Основанный Горным ученым комитетом на базе Горного института, альма матер большинства русских геологов и горных инженеров, журнал освещал вопросы разведки полезных ископаемых,

их добычи и переработки и был полезен им еще в пору студенчества. Не изменили они своим привычкам и в дальнейшем. «Горный журнал» поступал, несмотря на Гражданскую войну, в Дальгеолком во Владивостоке в обмен на издаваемые им «Материалы по геологии и полезным ископаемым Дальнего Востока». Отдельные номера этого журнала по сей день хранятся в Центральной научной библиотеке Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Обмен научными изданиями с СССР был налажен также в американских университетах и структурах Геологической службы США [28]. «Горный журнал» давал возможность русским специалистам в США следить за достижениями советских коллег и научно-техническими открытиями в горном деле, и они использовали эти сведения как на своих лекциях в американских университетах, так и в практической деятельности. Можно с уверенностью сказать, что в основу научных школ, созданных русскими в университетах США, были заложены традиции горного образования и горной промышленности России.

Заключение

Исследования показывают, что геология и горное дело относятся к тем областям, в которых выходцы из России проявили себя наиболее успешно, и их вклад в горно-геологические науки огромен и на Дальнем Востоке (Россия, Китай, Япония), и в США. Дальневосточный геологический комитет, у основания которого они стояли, заложил основы собственно региональной геологической науки. В Китае и США они стали крупными специалистами в области геологии угля, нефти и других минерально-сырьевых ресурсов, оставив теоретическое наследие и практические наработки, способствующие развитию науки и экономики этих стран. Сотрудничество с русскими коллегами помогало и японским исследованиям в области геологии и горного дела. Работая в общественных организациях и вузах, русские геологи популяризировали геологические знания и методы исследования, перенесенные из России. «Наука – это та область, где, может быть, более, чем в какой-либо другой области человеческих отношений, проявляется чувство единства и братства, где не существует национальности, где ученые всех стран стремятся вместе к достижению одной цели – к познанию истины, ... и перед общими интересами науки исчезают границы государств», – писал Н. И. Андрусов, еще один русский геолог, оказавшийся за границей [39, с. 84]. Примеры деятельности выходцев из России за рубежом полностью подтверждают эти слова.

Авторы благодарят всех, кто оказал помощь в подготовке статьи: научного сотрудника Гуверовского архива Ива Франкьена; русского библиографа Гавайского университета Патрицию Полански; старших научных сотрудников Института геологии Дальневосточного отделения Российской академии наук кандидатов геолого-минералогических наук Зинията Гимьяльдиновича Бадредина и Игоря Юрьевича Чекрыжова.

Библиографический список

1. Чубик П. С., Никифоров С. И. Вклад представителей Сибирской (Томской) горно-геологической школы в развитие минерально-сырьевой базы России и зарубежья // Записки Горного института. 2017. Т. 228. С. 688–694.
2. Хайрулина Л. А. Краткая история становления и развития государственной геологической службы в России // Доклады Башкирского университета. 2016. Т. 1. № 3. С. 539–544.
3. Хетчиков Л. Н. Очерк истории научных геологических исследований в Приморье и на сопредельных территориях. URL: <http://www.fegi.ru/fegi/hetchend.pdf> (дата обращения: 15.12.2021).
4. Прищепа О. М. Научные исследования как основа современной деятельности государственной геологической службы России // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2017. Т. 12. № 2. DOI: 10.17353/2070-5379/18_2017
5. Ковтунович П. Ю., Чумаков Л. М., Цой И. Б. Новые данные о возрасте матитукской и помырской свит северного Сахалина // Тихоокеанская геология. 2018. Т. 37. № 4. С. 71–86.
6. Отчет о состоянии и деятельности Геологического комитета Дальнего Востока за 1922 г. Сер.: Материалы по геологии и полезным ископаемым Дальнего Востока. – Владивосток, 1923. № 26. – 35 с.
7. Елиашевич М. К. Возраст и качество южно-уссурийских ископаемых углей : объяснительная записка к «Идеальному геологическому разрезу земной коры в районе побережья Амурского залива». – Владивосток, 1922. – 79 с.
8. Криштофович А. Н. Отчет о заграничной командировке в Японию в 1919–1920 г. Сер.: Материалы по геологии и полезным ископаемым Дальнего Востока. – Владивосток, 1921. № 13. – 12 с.
9. Kryshtofovich A. A Cypadean Trunk from Hokkaido // Journal of the Geological Society of Tokyo. 1920. Vol. 27. Iss. 325. P. 1–8.
10. Kryshtofovich A. A New Fossil Palm and Some Other Plants of the Tertiary Flora of Japan // Journal of the Geological Society of Tokyo. 1920. Vol. 27. Iss. 322. P. 1–20.
11. Takeda H. The Poronai formation (Oligocene Tertiary) of Hokkaido and south Sakhalin and its fossil fauna (Studies on coal geology) // Geological Section, Hokkaido Association of Coal Mining Technology. 1953. No 3. P. 1–103.
12. Tanai Toshimasa. A Cypadean Trunk from Uryu District, Hokkaido, Japan // Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University. Series 4. Geology and Mineralogy. 1960. No. 10(3). P. 545–550.
13. Бровка П. Ф., Горбунов А. О. «Геоморфологический очерк русского Сахалина»: к 100-летию издания // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2015. № 2(180). С. 146–153.
14. Asano K. Some Paleogene smaller Foraminifera from Japan // The Science Reports of the Tohoku Imperial University. 1958. Series. 2 (Geology). Vol. 29. P. 43–75.
15. Жернаков В. Э. Э. Анерт – исследователь русского Дальнего Востока и Северной Маньчжурии // Русская жизнь. 1968. № 18. С. 4–5.
16. Ван Шивэй. Геологические районы и территориальная система Китая // Современные проблемы геологического картирования : матер. X Университетских геологических чтений. – Минск : Издательский центр БГУ, 2016. С. 16–18.
17. Shifeng Dai, Chekryzhov I. Yu., Seredin V. V., Nechaev V. P., Graham I. T. et al. Metalliferous coal deposits in East Asia (Primorye of Russia and South China): A review of geodynamic controls and styles of mineralization // Gondwana Research. 2016. Vol. 29. Iss. 1. P. 60–82.
18. Wei Yuan, Zhenyu Yang. The Alashan Terrane did not amalgamate with North China block by the Late Permian: Evidence from Carboniferous and Permian Paleomagnetic Results // Journal of Asian Earth Sciences. 2015. Vol. 104. P. 145–159.
19. Смирнов А. М. Докембрий северо-запада Тихоокеанского подвижного пояса. – М. : Наука, 1976. – 224 с.
20. Смирнов А. М. Очерки металлогении тихоокеанского докембрия. – М. : Наука, 1985. – 89 с.
21. Романова Г. Н. Усиление экономических позиций Японии в Северо-Восточном Китае в период оккупации (30-е годы XX в.) // Таможенная политика России на Дальнем Востоке. 2015. № 3(72). С. 104–112.
22. Арбузов С. И., Маслов С. Г., Ильенко С. С. Формы соединений скандия в углях и торфах (обзор) // Химия твердого топлива. 2015. Т. 49. № 3. С. 167–182.
23. Yuzhuang Sun, Cunliang Zhao, Shenjun Qin, Lin Xiao, Zhongsheng Li et al. Occurrence of some valuable elements in the unique 'high-aluminium coals' from the Jungar coalfield, China // Ore Geology Reviews. 2016. Vol. 72. P. 659–668.
24. Павел Павлович Гудков // Соглашение. 1955. № 45.
25. Tolmachoff I. Coal of Soochan and Its Importance in Pacific Trade // Coal Age. 1923. Vol. 24. No. 14. P. 509–514.
26. Tolmachoff I. P. The Results of Oil Prospecting on Sakhalin Island by Japan in 1919–25 // American Association of Petroleum Geologists Bulletin. 1926. Vol. 10. No. 11. P. 1163–1170.
27. Tolmachoff I. P. Ozocerite and Naphtha on Lake Baikal, Siberia: Geological notes // American Association of Petroleum Geologists Bulletin. 1925. Vol. 9. No. 4. P. 811–814.
28. Buchanan R. C. To Bring Together, Cooperate and Preserve: A History of the Kansas Geological Survey, 1864–1989. – Lawrence : Kansas Geological Survey, 1989. Bulletin No. 227. – 96 p.
29. Elias M. K. The geology of Wallace County, Kansas. – Lawrence : Kansas Geological Survey, 1931. Bulletin No. 18. – 254 p.
30. Merriam D. F. Memorial to Maxim Konrad Elias (1889–1982) // Geological Survey of America Memorials. 2000. Vol. 31. P. 73–75.
31. Elias M. K. Depth of Deposition of the Big Blue (Late Paleozoic) sediments in Kansas // Geological Society of America Bulletin. 1936. Vol. 48. No. 3. P. 403–432.
32. Elias M. K. Geological Calendar (Indications of Periodicity in Nature and Succession of Geological Periods): Geological Notes // Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists. 1945. Vol. 29. No. 7. P. 1035–1043.
33. Elias M. K. Paleozoic Ptychocladia and Related Foraminifera // Journal of Paleontology. 1950. Vol. 24. No. 3. P. 287–306.
34. Elias M. K., Condra G. E. Fenestella from the Permian of West Texas // The Geological Society of America Memoir. – New York : Geological Society of America, 1957. No. 70. – 158 p.
35. Elias M. K. Marine Carboniferous of N. America and Europe // Etudes de Stratigraphie et de Geologie du Carbonifere 4th Congress (Heerlen). – Compte Rendu, 1960. Vol. 1. P. 189–201.
36. Jarochowska E., Hierl F., Vinn O., Munnecke A. Reducing taxonomic noise in problematic fossils: revision of the incertae sedis genus Allonema based on shape analysis // Bulletin of Geosciences. 2015. Vol. 91. No. 1. P. 97–110.
37. Jarochowska E., Munnecke A. The Paleozoic problematica Wetheredella and Allonema are two aspects of the same organism // Facies. 2014. Vol. 60. P. 651–662.
38. Гудков П. П. Исследования по геологии нефти США // Известия Академии наук СССР. Серия геологическая. 1947. № 4. С. 131–154.
39. Оноприенко В. И. Николай Андрусов: сдвиг истории и излом судьбы // Российские ученые и инженеры в эмиграции : сб. матер. – М. : ПО «Перспектива», 1993. С. 83–92. 

Russian geologists and mining engineers in Asia and Pacific Rim Countries after 1917

Information about authors

N. V. Khisamutdinova¹, Professor, Doctor of Historical Sciences, natalya.khisamutdinova@vvsu.ru

A. A. Khisamutdinov², Professor, Doctor of Historical Sciences

¹Vladivostok State University of Economics and Service, Vladivostok, Russia

²Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

Abstract

The article describes the activities of Russian geologists and mining engineers in Asia and Pacific Rim countries (mostly China, Japan and the USA) after the 1917 October revolution and their contribution to the development of geological science in these countries. In China and the USA, they have become recognized experts in the geology of coal, oil, and other resources with their theoretical works and practical developments that contributed to the economic growth of these countries. The role of scientists from Russia is also evident in the promotion of Japanese research in geology. The studies have proved geology and mining to belong to the areas where immigrants from Russia have shown themselves most revealingly in the USA. This was due, to a great extent, to the attention the US government paid to this sphere. Despite the problems of the initial period of their stay in the new country, they made successful careers. They held senior positions at enterprises and professorships at universities, established their own companies, and were members of large scientific organizations. As university professors, they initiated scientific schools, developing their teachers' ideas and spreading the traditions and methods of Russian higher education abroad. Russian geologists' active work in public organizations contributed to the popularization of the geological knowledge and research methods transferred from Russia. They left behind a rich scientific heritage, such as articles, monographs, and dissertations, which have been highly appreciated by mate geologists and remain in demand up to nowadays. The article is written with materials from foreign archives and libraries. Previously unknown biographical data about Russian specialists in mining and geology and their contribution to science and economics are being introduced.

The authors would like to thank those who assisted in the article writing. They are Yves Franquien, the Hoover Archives research officer; Patricia Polansky, a Russian bibliographer at the University of Hawaii; Ziniyat Gimyaldinovich Badredinov and Igor Yuryevich Chekryzhov, Candidates of Geology and Mineralogy, Senior Researchers at the Institute of Geology, the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

Keywords: Far Eastern Geological Committee, Russian geologists and mining engineers in the USA, Russian geology in China, Russian school of geology.

References

- Chubik P. S., Nikiforov S. I. The contribution of the representatives of the Siberian (Tomsk) mining and geological school to the development of mineral raw material base in Russia and Abroad. *Journal of Mining Institute*. 2017. Vol. 228. pp. 688–694.
- Khayrulina L. A. A brief history of the formation and development of the state geological service in Russia. *Doklady Bashkirskogo universiteta*. 2016. Vol. 1, No. 3. pp. 539–544.
- Khetchikov L. N. Essay on history of scientific geological studies in Primorye and in adjacent areas. Available at: <http://www.fegi.ru/fegi/hetchend.pdf> (accessed: 15.12.2021).
- Prishchepa O. M. Scientific research – basis of modern activity of Russian state geological service. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*. 2017. Vol. 12, No. 2. DOI: 10.17353/2070-5379/18_2017
- Kovtunovich P. Yu., Chumakov L. M., Tsoy I. B. New Data on the Ages of the Matituk and Pomyr Formations of Northern Sakhalin. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2018. Vol. 12. No. 4. P. 303–319.
- 1922 Report on Position and Performance of the Far East Geology Committee. Series: Geology and Minerals of Russian Far East. Vladivostok, 1923. No. 26. 35 p.
- Eliashevich M. K. Age and quality of South Ussuri coal : Explanatory note to Ideal Geological Section of the Earth Crust at the Amur Bay Coast. Vladivostok, 1922. 79 p.
- Krishforovich A. N. Report on business visit to Japan in 1919–1920. Series: Geology and Minerals of Russian Far East. Vladivostok, 1921. No. 13. 12 p.
- Kryshchikov A. A Cycadean Trunk from Hokkaido. *Journal of the Geological Society of Tokyo*. 1920. Vol. 27, Iss. 325. pp. 1–8.
- Kryshchikov A. A New Fossil Palm and Some Other Plants of the Tertiary Flora of Japan. *Journal of the Geological Society of Tokyo*. 1920. Vol. 27, Iss. 322. pp. 1–20.

- Takeda H. The Poronai formation (Oligocene Tertiary) of Hokkaido and south Sakhalin and its fossil fauna (Studies on coal geology). *Geological Section, Hokkaido Association of Coal Mining Technology*. 1953. No. 3. pp. 1–103.
- Tanai Toshimasa. A Cycadean Trunk from Uryu District, Hokkaido, Japan. *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University. Series 4. Geology and mineralogy*. 1960. No. 10(3). pp. 545–550.
- Brovko P. F., Gorbunov A. O. Geomorphological sketch of the Russian Sakhalin: the 100th anniversary edition. *Vestnik Dalnevostochnogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk*. 2015. No. 2(180). pp. 146–153.
- Asano K. Some Paleogene smaller Foraminifera from Japan. *The Science Reports of the Tohoku Imperial University*. 1958. Series. 2 (Geology). Vol. 29. pp. 43–75.
- Zhernakov V. E. E. Anert—Explorer of Russian Far East and Northern Manchuria. *Russkaya zhizn*. 1968. No. 18. pp. 4–5.
- Van Shivei. Geological regions and territorial system of China. *Modern Problems of Geological Mapping : X University Geological Lectures*. Minsk : Izdatelskiy tsentr BGU, 2016. pp. 16–18.
- Shifeng Dai, Chekryzhov I. Yu., Seredin V. V., Nechaev V. P., Graham I. T. et al. Metalliferous coal deposits in East Asia (Primorye of Russia and South China): A review of geodynamic controls and styles of mineralization. *Gondwana Research*. 2016. Vol. 29, Iss. 1. pp. 60–82.
- Wei Yuan, Zhenyu Yang. The Alashan Terrane did not amalgamate with North China block by the Late Permian: Evidence from Carboniferous and Permian paleomagnetic results. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2015. Vol. 104. pp. 145–159.
- Smirnov A. M. Precambrian of the northwest of the Pacific Mobile Belt. Moscow : Nauka, 1976. 224 p.
- Smirnov A. M. Essays on the Pacific Precambrian metallogeny. Moscow : Nauka, 1985. 89 p.
- Romanova G. N. Strengthening Japan's economic positions in Northeast China for a period of occupation (30-s of the 20th c.). *Tamozhennaya politika Rossii na Dalnem Vostoke*. 2015. No. 3(72). pp. 104–112.
- Arbuzov S. I., Maslov S. G., Ilenok S. S. Modes of Occurrence of Scandium in Coals and Peats (A Review). *Solid Fuel Chemistry*. 2015. Vol. 49, No. 3. pp. 167–182.
- Yuzhuang Sun, Cunliang Zhao, Shenjun Qin, Lin Xiao, Zhongsheng Li et al. Occurrence of some valuable elements in the unique 'high-aluminium coals' from the Jungar coalfield, China. *Ore Geology Reviews*. 2016. Vol. 72. pp. 659–668.
- Pavel Pavlovich Gudkov. *Soglasie*. 1955. No. 45.
- Tolmachoff I. Coal of Soochan and Its Importance in Pacific Trade. *Coal Age*. 1923. Vol. 24, No. 14. pp. 509–514.
- Tolmachoff I. P. The Results of Oil Prospecting on Sakhalin Island by Japan in 1919–25. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 1926. Vol. 10, No. 11. pp. 1163–1170.
- Tolmachoff I. P. Ozocerite and Naphtha on Lake Baikal, Siberia: Geological notes. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 1925. Vol. 9, No. 4. pp. 811–814.
- Buchanan R. C. To Bring Together, Cooperate and Preserve: A History of the Kansas Geological Survey, 1864–1989. Lawrence : Kansas Geological Survey, 1989. Bulletin No. 227. 96 p.
- Elias M. K. The geology of Wallace County, Kansas. Lawrence : Kansas Geological Survey, 1931. Bulletin No. 18. 254 p.
- Merriam D. F. Memorial to Maxim Konrad Elias (1889–1982). *Geological Survey of America Memorials*. 2000. Vol. 31. pp. 73–75.
- Elias M. K. Depth of Deposition of the Big Blue (Late Paleozoic) sediments in Kansas. *Geological Society of America Bulletin*. 1936. Vol. 48, No. 3. pp. 403–432.
- Elias M. K. Geological Calendar (Indications of Periodicity in Nature and Succession of Geological Periods): Geological Notes. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*. 1945. Vol. 29, No. 7. pp. 1035–1043.
- Elias M. K. Paleozoic Ptychocladia and Related Foraminifera. *Journal of Paleontology*. 1950. Vol. 24, No. 3. pp. 287–306.
- Elias M. K., Condra G. E. Fenestella from the Permian of West Texas. *The Geological Society of America Memoir*. New York : Geological Society of America, 1957. No. 70. 158 p.
- Elias M. K. Marine Carboniferous of N. America and Europe. *Etudes de Stratigraphie et de Geologie du Carbonifere 4th Congress (Heerlen)*. Comptes Rendu, 1960. Vol. 1. pp. 189–201.
- Jarochowska E., Hierl F., Vinn O., Munnecke A. Reducing taxonomic noise in problematic fossils: revision of the incertae sedis genus *Allonema* based on shape analysis. *Bulletin of Geosciences*. 2015. Vol. 91, No. 1. pp. 97–110.
- Jarochowska E., Munnecke A. The Paleozoic problematica *Wetheredella* and *Allonema* are two aspects of the same organism. *Facies*. 2014. Vol. 60. pp. 651–662.
- Gudkov P. P. USA oil geology research. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya geologicheskaya*. 1947. No. 4. pp. 131–154.
- Onoprienko V. I. Nikolay Andrusov : History shift and breaking destiny. *Expatriate Russian Scientists and Engineers : Source Book*. Moscow : PO Perspektiva, 1993. pp. 83–92.

УДК 622:001(092)

УЧЕНЫЙ-ГОРНЯК А. С. ПОПОВ И ЕГО НАСЛЕДИЕ

Г. А. МЕЛЬНИЧУК¹, инженер-металлург, историк-архивист, краевед, член Союза писателей России, nat922@yandex.ru

Н. В. СТЕПАНОВА², канд. техн. наук, член Союза журналистов России

О. В. БЕЛЯКИНА³, доцент, канд. техн. наук

И. Д. АЛТУХОВА⁴, главный хранитель

¹ Шацкое краеведческое общество, Шацк, Россия

² Рязанское землячество в Москве, Москва, Россия

³ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия

⁴ Губкинский краеведческий музей, Губкин, Россия

Введение

21 декабря 2021 г. исполнилось 130 лет со дня рождения Александра Сергеевича Попова – советского ученого в области горного дела, профессора, доктора технических наук, академика АН Казахской ССР, заслуженного деятеля науки Казахской ССР, заслуженного деятеля науки Узбекской ССР, внесшего значительный вклад в развитие горного дела Советского Союза и подготовку высококвалифицированных кадров. Воспоминания об этом выдающемся ученом и педагоге приурочены к этому юбилею.

В преддверии столетия ученого д-р техн. наук, профессор А. М. Бейсебаев писал: «Дать полную и объективную оценку научного наследия академика А. С. Попова – задача очень трудная и сложная» [1]. Опираясь на это суждение, авторы статьи по имеющимся источникам предприняли попытку реконструировать биографию ученого в зависимости от жизненных обстоятельств.

Начало трудового пути

Александр Сергеевич Попов родился 21(9) декабря 1891 г. в г. Шацке Тамбовской губернии (в настоящее время Рязанская обл.). После окончания Шацкого реального училища А. С. Попов поступает в Санкт-Петербурге в Горный институт Императрицы Екатерины II. Еще будучи студентом, в 1914 г., он работает на горноразведочных предприятиях Хивы и Джезказгана, в эти же годы выходят его первые научные публикации.

Окончив институт в 1919 г., молодой инженер по направлению Высшего совета народного хозяйства РСФСР (ВСНХ РСФСР) осуществляет разведку алюминиевых руд в Тихвинском районе (ныне Ленинградская обл.), в 1920 г. участвует в восстановлении горной промышленности Северного Кавказа, а с 1921 г. выполняет задание ВСНХ по разведке строительных материалов и кварцевых песков в Люберецком районе Подмоскovie. Свою педагогическую деятельность молодой инженер начал в 1921 г. на штейгерских курсах при Московской горной академии, где готовили мастеров и заведующих разработкой рудников. Позже стал трудиться на кафедре горного искусства этого же вуза, в 1924 г. получил звание доцента, а в 1927 г. был избран на должность профессора.

Рассказано о жизни и трудовой деятельности видного советского ученого в области горного дела доктора технических наук, профессора, академика Академии наук Казахской ССР Александра Сергеевича Попова.

Представлены основные направления его исследований, в частности касающиеся открытия Курской магнитной аномалии, отмечены научно-методические труды в области технико-экономического анализа в горном деле. Воспоминания приурочены к 130-летию со дня рождения ученого.

Ключевые слова: А. С. Попов, ученый-горняк, область научных исследований, технико-экономический анализ, Курская магнитная аномалия, теория и практика

DOI: 10.17580/gzh.2022.03.15

По мнению авторов, биографию и трудовую деятельность А. С. Попова можно условно разделить на несколько хронологических периодов: 1923 г. – успех в подтверждении теории; до 1938 г. – работа в Москве; 1938–1949 гг. – работа в Узбекистане; 1949–1974 гг. – работа в Казахстане. Ниже будет более подробно рассмотрен каждый из них.

Успех в подтверждении теории

Железородный бассейн Курской магнитной аномалии (КМА) – один из крупнейших в мире, располагается в пределах Белгородской, Курской и Орловских областей. Путь открытия КМА был долгим и тернистым. От теоретических предпосылок залегаания железной руды до практического подтверждения результатов прошло 150 лет. К этому знаменательному событию был причастен и Александр Сергеевич Попов.



Александр Сергеевич Попов

История открытия КМА связана с отклонением магнитной стрелки «от нормы» под Курском, на что обратил внимание в 1773 г. ученый-астроном академик Петр Борисович Иноходцев (1742–1806).

С 1898 г. изучением Курской магнитной аномалии занимался профессор Московского университета Эрнест Егорович Лейст (1852–1918). Он, несмотря на препятствия и трудности, за свой счет во время летних отпусков в течение 14 лет проводил исследования. Им было проведено 4121 наблюдение, получено около 200 тыс. показателей, которые он обобщил в рукописи «Курская магнитная аномалия».

В 1917 г. Э. Е. Лейст доложил о своих работах по изучению КМА в Физическом институте, а рукопись передал академику Петру Петровичу Лазареву (1878–1942) с просьбой опубликовать ее [2]. Летом 1918 г. советское правительство направило Э. Е. Лейста на лечение на курорт в Наугейме. Отправляясь на лечение, Лейст взял для работы с собой материалы исследований по КМА. Внезапная смерть прервала его научную деятельность. Немцы захватили материалы Э. Е. Лейста [3] и запросили у молодого советского правительства за выкуп пять миллионов рублей золотом [4]. В. И. Ленин обратился к академику П. П. Лазареву и другим ученым с вопросом, смогут ли они организовать новую магнитную съемку в районах КМА. Ответ был положительным.

14 июня 1920 г. была создана Особая комиссия по изучению и исследованию Курской магнитной аномалии (ОК КМА) во главе с профессором Иваном Михайловичем Губкиным (1871–1939). В 1922 г. И. М. Губкин был утвержден ректором Московской горной академии.

24 августа 1920 г. В. И. Ленин подписал постановление Совета труда и обороны РСФСР «О развертывании буровых работ в районе КМА», в котором отмечалось: «Признать все работы, связанные с разведкой Курских магнитных аномалий, имеющими особо важное государственное значение... не допуская междуведомственных трений и волокиты».

Отряды особой комиссии вели наблюдения и исследования в районе Щигры – Курск – Старый Оскол. В Щигры прибывает оборудование с Грозненских промыслов и из Баку, и на скважине № 1, заложенной у деревни Лозовка Щигровского уезда, 22 июля 1921 г. начали бурение. В начале сентября 1922 г. при бурении скважины на глубине 72 саженей 3 футов [156 м – прим. авт.] были встречены очень твердые породы, которые при ближайшем определении оказались кварцитами – твердыми минералами, вызывающими частые поломки долота.

И. М. Губкин отмечал: «На поверхности, судя по уравнильному винту, бурение показывало, что мы прошли 2 или 3 дюйма. Когда же мы вынимали инструмент, то оказалось, что проходка была фиктивной, т. к. в результате нашего долбления сработался конец долота, и именно на ту величину, на которую указывал уравнильный винт. Долото укорачивалось, превращалось в болванку. Это последнее обстоятельство заставило нас поспешить с переменой системы бурения... Для технической постановки дела по алмазному бурению был приглашен инженер А. С. Попов, преподаватель Московской горной академии.

Приехав на место, он в течение одной недели наладил скважину, и 7 апреля он вернулся из района и привез первую двухфутовую колонку, которая содержала около 50 проц. магнитного железняка, переславившегося с кварцитом» [5]. Сложно передать, что творилось в душе у А. С. Попова, когда он, молодой инженер, «испытал счастье победы: преисполненный радостью он держал только что поднятый из скважины kern крупнейшего в мире месторождения» [6].

Небезынтересно отметить, что «при заключении Брест-Литовского мира германское правительство упорно требовало включения Курской губернии в пределы Украины. Почему? Мирная буржуазия уже тогда предвидела то колоссальное экономическое значение, которое предстоит разработке железных руд Курской губернии. Речь идет о так называемой Курской аномалии» [7]. Оценивая значения Курской магнитной аномалии, И. М. Губкин отмечал: «Экономическое значение произведенного открытия может оказаться колоссальным. Полоса аномалии прослеживается на протяжении 250 километров в длину и около 1 километра в ширину. Если по всей площади обусловлены залежи магнитного железняка, то мы будем здесь иметь железорудное месторождение, по размерам превосходящее все известные сейчас мировые месторождения, взятые в совокупности. Положение его в центре советской Республики, между двумя каменноугольными районами – Донбассом и Подмосковным угольным бассейном, только еще больше подчеркивает его будущее промышленное значение» [5]. На месте, где произошло это историческое событие, установлен памятный знак с надписью: «Скважина №1 ОК КМА. Начало бурения 22 июля 1921 года. На этом месте 7 апреля 1923 года был поднят первый kern железной руды, положивший начало освоению Курской магнитной аномалии. Историко-геологический памятник. Охраняется государством». От этой даты идет отчет истории Курской магнитной аномалии, о чем свидетельствуют торжественные мероприятия, проводимые в юбилейные годы. В г. Губкине (Белгородская обл.) 11 сентября 2012 г. был открыт музей истории Курской магнитной аномалии, филиал Губкинского краеведческого музея, где представлены материалы о буровом мастере А. С. Попове.

Работа в Москве (до 1938 г.)

Совмещая научную и производственную деятельность с учебным процессом, в 1924 г. А. С. Попов получает звание доцента. В учебно-методическом плане готовит учебник для профшкол и школ ученичества в горной промышленности – курс «Материаловедение», изданный в 1926 г. тиражом в 10000 экз. Профессор горного дела М. М. Протоdjаконов (1874–1930) в рецензии на издание отметил: «Курс составлен кратко, толково и хорошо издан».

Разработанные А. С. Поповым «Инструкции по проведению производственных практик и дипломному проектированию» (М. : Московская горная академия, 1926) стали первыми в Советском Союзе нормативными методическими документами в этой области, и были рекомендованы Главным управлением учебных заведений Народного комиссариата тяжелой промышленности (ГУУЗ НКТП) СССР к использованию в горных втузах страны.

Александр Сергеевич занимался исследованием режимов проветривания горных выработок, его книга «Проектирование рудничной вентиляции при диагональном соединении проводов воздуха» выдержала три издания (1926, 1927, 1930 г.). В этих изданиях он привел пример решения задачи по вентиляции при четырех диагональных ответвлениях: таким образом считавшаяся ранее неразрешимой проблема была успешно решена. В 1927 г. он был избран на должность профессора.

С мая 1929 г. в стране начали проводить курс на индустриализацию, стране требовался металл и, соответственно, уголь для его выплавки. В условиях быстрого роста каменноугольной промышленности Донбасса и строительства многочисленных шахт возникла необходимость дать научное математическое обоснование выбора элементов нового рудника и шахты.

А. С. Попов пишет работу «Определение наивыгоднейшей производительности каменноугольного рудника и размеров рудничного поля при развернутом учете капитальных затрат» [8], в которой подробнейшим образом показывает, как оптимизировать работу нового рудника в зависимости от имеющихся норм. На первой странице делает пояснение, что результаты работы показаны «применительно к установленным инструкцией по проектированию нормам». Ученый постоянно следил за последними достижениями в горном деле и вносил изменения, уточнения и дополнения в свои исследования.

В 1930-е годы деятельность профессора А. С. Попова востребована. Он занимается педагогической работой, регулярно пишет и издает научные и научно-педагогические книги и брошюры по горному делу. В эти годы из-под его пера вышли работы: «К вопросу о типизации отдельных элементов рудника. Метод установления годовой производительности и размеров рудничного поля» (М. : Шахтстрой, 1930); «Технико-экономический анализ в горном искусстве» (М.—Л.—Новосибирск, 1932); «Установление годовой производительности и размеров поля для индивидуальной шахты по разработке каменноугольных месторождений» (М. : Московский горный институт, 1934); «Инструкция по проведению производственных практик для угольнопластовой специальности горных вузов» (М. : Бюро Московского горного института, 1934) и др.

Будучи профессором-консультантом Горно-маркшейдерского бюро, Научно-технического совета ВСНХ СССР, целого ряда правительственных комиссий, ученый консультирует различные проекты, в том числе по всем угольным бассейнам страны: Донбассу, Кривбассу, Подмосковному, Карагандинскому, Уральскому, Шлицибергенскому, Средне-Азиатскому и др. В 1937 г. за крупные и оригинальные научные работы в области технико-экономического анализа в горном деле А. С. Попову была присуждена ученая степень доктора технических наук, его избирают заведующим кафедрой систем разработки пластовых месторождений Московского горного института.

Профессора, доктора технических наук А. Б. Бегалинов, А. М. Бейсебаев, Л. А. Крупник вспоминали: «Академик А. С. Попов был незаурядной личностью. Достаточно вспомнить два эпизода: в 1937 г., исполняя обязанности ректора Московского горного института, он пошел в Московский горком партии (не будучи членом партии) и выступил в защиту ученых, которые,

как считали, являются врагами народа. Поступок по тем временам был исключительным. В результате через 24 часа А. С. Попов оказался в Ташкенте. В 1946 г. ему предложили вернуться в Москву и баллотироваться в союзные академики, от этого предложения профессор А. С. Попов отказался» [9].

В 1938 г. началась его травля. В «Горном журнале» в разделе «Библиография» увидела свет статья «О «трудах» профессора — доктора технических наук А. С. Попова», в которой горные инженеры Н. Г. Дорохин, И. Г. Сидерман, А. В. Тотмаков подвергли критике три работы [10].

Научные воззрения профессора, особенно в 1930–1940-е годы, диаметрально расходились с тогдашней официальной точкой зрения, за что его подвергали осуждению и гонению. Для объективной оценки деятельности А. С. Попова попытаемся проанализировать суть представленной публикации, так как она по прошествии времени представляет исследователя настоящим ученым, показывает его научную прозорливость и гражданское мужество. Фундаментальные научные труды А. С. Попова систематизировали известные к тому времени знания, но в совокупности формировали стройную теорию технико-экономического анализа в горном искусстве.

Во-первых, в настоящее время под технико-экономическим анализом понимают комплексное изучение производственно-хозяйственной деятельности для объективной оценки результатов и определения возможностей совершенствования. В своих трудах А. С. Попов определяет развитие техники в Советском Союзе как противоречие между производительными силами и производственными отношениями. В этом аргументе А. С. Попов усматривает и причину развития технико-экономического анализа. Он пишет: «Если развитие техники с точки зрения материалистической диалектики надо понимать как «выражение исторического движения противоречий между производительными силами и производственными отношениями», то и причину технико-экономического анализа как теории следует искать в том же историческом движении упомянутых выше противоречий». А. С. Попову вменялось то, что он «клеветническим утверждением» показывает, что социалистической экономике присущи противоречия капиталистического общества [10].

Во-вторых, по мнению А. С. Попова, Российская Империя (позже СССР) была единственной страной в мире, где технико-экономический анализ получил широкое распространение. Он пишет: «Обращаясь к истории развития и уровню состояния технико-экономического анализа за границей и у нас в дореволюционный период, мы берем на себя смелость утверждать, что первое место в этом отношении всегда принадлежало русским ученым. Причина этого не случайна, она вытекает из тех особенностей, которые были характерны для России. В то время как, например, в Германии, где все угольные месторождения локализируются в пределах ограниченной территории, где обнаруженные и разведанные месторождения уже давно были разбиты на ряд отдельных, сравнительно небольших участков, составляющих предмет владения отдельных частных лиц или акционерных обществ и компаний, — вопросы вскрытия месторождения, размеров шахтного поля и т. д. не являлись никогда столь

актуальными, как в России, где в ряде мест были обнаружены на громадном протяжении месторождения каменных углей, не стесненных какими-либо узкими границами частновладельческих предприятий» [подчеркнуто авторами. – прим. авт.]. И так, в каменноугольной промышленности капиталистической России отсутствовала частная собственность. По мнению А. С. Попова, после Октябрьской революции трудящиеся не отнимали недра у капиталистов, ибо в каменноугольной промышленности царской России месторождения каменных углей не были стеснены «какими-либо узкими границами частновладельческих предприятий». По рассуждению «горных инженеров» Н. Г. Дорохина, И. Г. Сидермана и А. В. Тотмакова, это является прямой клеветой на историю революционной борьбы рабочих и крестьян России [10].

В-третьих, исходя из значительной площади страны, А. С. Попов указывал: «...здесь (т. е. в царской России – прим. авт.) естественно можно было ставить и решать вопросы в масштабах предприятия, размерах его участка и т. д. в соответствии с геологическими условиями залегания каменноугольных месторождений» [11]. Значит, масштаб каменноугольных предприятий, по заключению А. С. Попова, в условиях царской России зависел от геологических условий залегания каменноугольных месторождений. Вопрос о масштабах каменноугольного предприятия, т. е. социально-экономическая проблема, сведен к естественным факторам. И эти буржуазные сентенции выдаются за научную революционную теорию! [10].

В-четвертых, в статье «Определение наивыгоднейшей производительности каменноугольного рудника и размеров рудничного поля при развернутом учете капитальных затрат» А. С. Попов «...доказывает, что в условиях советского хозяйства цены являются «ценами чисто условного характера», т. е., по существу, повторяются контрреволюционные пересказы и измышления буржуазных экономистов. А. С. Попов, превращая цены в условиях социалистического хозяйства в условные цены, ставит под сомнение огромной важности вопросы внутрипромышленного накопления, бездотационной работы, хозяйственного расчета, роста производительности труда и народного дохода» [10].

В-пятых, далее «горные инженеры» отмечали: «...до сих пор мы рассматривали общетеоретические вопросы, развитые в печатных работах проф. А. С. Попова. Ясно, что и прикладная часть его работ пронизана той же буржуазной методологией, страдает теми же пороками» [10].

Потребовалось 40–50 лет, чтобы идеи профессора А. С. Попова обрели жизнь и были воплощены в народном хозяйстве [1].

Работа в Узбекистане (1938–1948 гг.)

С 1938 г. А. С. Попов работал в Ташкенте в Средне-Азиатском индустриальном институте, где возглавлял кафедру разработки угольных месторождений. Как крупный ученый, он активно консультирует предприятия республики: Средазуголь, Средазшахтострой, Узбекшахтострой, Узбекуголь, Горно-маркшейдерское бюро. В 1939 г. состоялся первый выпуск 25 горных инженеров по разработке месторождений полезных ископаемых. Профессором

А. С. Поповым внесен огромный вклад в формирование потенциала кафедры.

В педагогическом плане А. С. Попов в Ташкенте пишет работы: «Вскрытие каменноугольных месторождений (основы проектирования): пособие для студентов» (Ташкент, 1944); «Рудничные стволы и околорудничные выработки: основы проектирования» (Ташкент, 1944); «Разработка пластовых месторождений: пособие для студентов» (Ч. 1, 1945). Заслуги ученого в научной и педагогической деятельности, вклад в решение проблем развития горнодобывающих предприятий, имеющих первостепенное значение в экономике Узбекистана, были дважды (в 1941 и 1944 гг.) отмечены Почетной грамотой Президиума Верховного Совета Узбекской ССР, ему присвоено звание «Заслуженный деятель науки Узбекской ССР» (1944 г.). В 1945 г. Указом Президиума Верховного Совета СССР он награждается медалью «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.». Александр Сергеевич работал в Ташкенте до 1948 г. и внес достойный вклад в развитие горной промышленности Узбекистана и подготовку высококвалифицированных специалистов для республики.

Работа в Казахстане (1949–1974 гг.)

В послевоенные годы стране необходимы были инженерные кадры по горному делу. В Казахском горно-металлургическом институте была организована кафедра разработки пластовых месторождений, для руководства которой в 1948 г. пригласили профессора А. С. Попова. Имя ученого к этому времени стояло в одном ряду с именами всемирно признанных специалистов в области горного дела академиков Академии наук СССР А. А. Скочинского (1874–1960), А. М. Терпигорева (1873–1959), Л. Д. Шевякова (1889–1963). В Казахстане он организует разработку и внедрение ряда крупных практических рекомендаций по совершенствованию работы шахт Карагандинского бассейна, карьеров Соколовско-Сарбайского ГОКа, Коунрадского, Атасуйского, Джекказганского и многих других горных предприятий республики. В 1951 г. под его научным руководством защищают кандидатские диссертации О. А. Байконуров и А. С. Сагинов, впоследствии академики Академии наук Казахской ССР.

В это же время выходят его работы: «Определение размеров шахтного поля по восстанию и по падению» (Известия АН КазССР. № 93. Серия горного дела. Вып. 2. Алма-Ата: Изд-во АН Казахской ССР, 1950); «К вопросу о форме и размерах шахтного поля при разработке горизонтально залегающих пластов» (Известия АН КазССР. № 2/71. Алма-Ата, 1951); «К вопросу о применении математики при решении технико-экономических вопросов горного дела» (Горный журнал. 1953. № 12). Как не вспомнить высказывание академика К. А. Тимирязева о том, что «...жизнь ученого заключается в его трудах».

По воспоминаниям доктора технических наук, профессора А. М. Бейсебаева, Александр Сергеевич почти никогда не писал в соавторстве, за исключением тех случаев, когда порой для скорейшей публикации его аспирантам необходимо было его имя. «Но и в этих случаях его приходилось долго уговаривать, хотя

в написании статьи он принимал самое непосредственное участие: в первую очередь методически и редакционно. А методистом и редактором профессор А. С. Попов был превосходным» [1]. Всего на протяжении научной деятельности А. С. Поповым написано около 100 научных трудов общим объемом 200 печатных листов.

В 1954 г. Александр Сергеевич Попов за выдающийся вклад в развитие горных наук был избран действительным членом Академии наук Казахской ССР и удостоен почетного звания «Заслуженный деятель науки Казахской ССР».

Выступая в ноябре 1957 г. на Карагандинской научной сессии о системах разработки и строительства шахты нового типа, А. С. Попов отмечал: «Теперь в отношении систем разработок, которые здесь затрагивались, часто применяются слова «прогрессивные системы», и если товарищи этого не применяют, то они считаются консерваторами. Это не новая идея, она применялась... система это не прогрессивная и не регрессивная. Всякая прогрессивная система становится регрессивной, если она не стоит на своем месте и не применяется там, где нужно. Точно так же прогрессивная система превращается в регрессивную, если она не оправдывает своих надежд. Но беда в том, что когда мы смотрим на [зарубежную] промышленность, то больше обращаем внимание на внешнюю сторону и не задумываемся, почему система их дает высокие показатели? Это происходит потому, что прежде чем применять систему... там подумали об оборудовании для этой системы. А мы сейчас поступаем иначе, проектируем систему разработки... а потом оборудование» [11].

В 1961 г. А. С. Попов был награжден высшей государственной наградой Советского Союза – орденом Ленина. В 1961 г. после инсульта у А. С. Попова была частично парализована правая рука, он практически перестал писать (сам не мог, а секретаря не было) научные работы и полностью переключился на руководство диссертационными работами.

В 1964 г. руководство кафедрой Александр Сергеевич передал своему ученику – академику Академии наук Казахской ССР Омирхану Аймагамбетовичу Байконурову, со словами «У меня уже подошел возраст. А вам нужно продолжить научную работу». Было А. С. Попову 73 года.

С этого времени всю свою энергию, глубокие знания, богатейший опыт профессор А. С. Попов отдает служению благородному делу – подготовке и воспитанию национальных инженерно-технических кадров. Под его руководством подготовлены тысячи

горных инженеров, около 100 кандидатов и докторов технических наук. Многие стали лауреатами различных премий, академиком. Вот некоторое из них, достигшие успехов в научно-педагогической и народнохозяйственной деятельности: академики Академии наук Казахстана (Казахской ССР) Ш. А. Алтаев, О. А. Байконуров, Ш. А. Балгожин, Р. Р. Баян, Ж. С. Ержанов, Д. А. Кунаев, А. Ч. Мусин, С. А. Сагинов; доктора наук А. М. Бейсебаев, В. А. Бреннер, З. К. Каргажанов, О. В. Ким, М. М. Мукушев, А. Д. Спицын, В. Ш. Шарипов.

Заключение

Александра Сергеевича Попова не стало 13 марта 1974 г. Он похоронен на Центральном кладбище Алма-Аты – крупнейшем историко-мемориальном некрополе Республики Казахстан. Его захоронение расположено в непосредственной близости от центральной аллеи, в мемориальной зоне исторической территории кладбища, рядом с могилами других видных ученых и общественных деятелей.

Накануне распада Советского Союза в 1991 г. Казахский политехнический институт совместно с Министерством высшего и среднего специального образования Казахской ССР и Академией наук Казахской ССР, несмотря на сложную обстановку в стране, провел всесоюзную конференцию «Технико-экономический анализ и теория проектирования в горном деле», посвященную 100-летию со дня рождения академика А. С. Попова. По материалам конференции был выпущен двухтомный сборник научных трудов, в котором последователи А. С. Попова поделились своим опытом, подчеркнув, что его фундаментальные научные труды «выдержали испытание временем и плодотворно развиваются» [1].

Александр Сергеевич Попов в течение своей жизни трудился в разных уголках страны, его работа была связана с постоянными переездами. Практически везде он оставил добрую память о своих делах, которые подхватили его ученики и единомышленники.

А. С. Попов как «айсберг», перемещаясь по Советскому Союзу в зависимости от необходимости решения возникающих перед страной задач в области добычи полезных ископаемых, так необходимых для развития народного хозяйства, отдавал все свои силы, знания и энергию ученикам, единомышленникам и коллегам. Здесь можно привести и аллгорию: как айсберги отдают себя водам морей и океанов, так и А. С. Попов отдавал себя работе на благо Отечества, всегда был верен однажды выбранной профессии – горному делу [12, 13].

Библиографический список

1. Бейсебаев А. М. Научное наследие академика А. С. Попова // Технико-экономический анализ и теория проектирования в горном деле : межвуз. сб. науч. тр. – Алма-Ата : Казахский политехнический ин-т, 1991. Ч. 1. С. 9.
2. Лейст Э. Е. Курская магнитная аномалия. – М. : Государственное изд-во, 1921. – 72 с.
3. Трухин В. И., Петрунин Г. И. Научный подвиг и драма профессора физики Императорского Московского университета Э. Е. Лейста // ОГФ – 65 лет! : избранные матер. газеты «Советский физик» 1998–2009 гг. – М. : Физический факультет МГУ, 2009. С. 18–22.
4. «Бешеная» стрелка: исследования Лейста. 2019. URL: <https://oskol.city/news/45-oemc/57643/> (дата обращения: 28.12.2021).
5. Губкин И. М. Открытие, которое делает эпоху // Известия. 1923. 28 апреля. С. 2.
6. Ракишев В. Р. Академик АН КазССР Александр Сергеевич Попов (к 100-летию со дня рождения) // Технико-экономический анализ и теория

- проектирования в горном деле : межвуз. сб. науч. тр. – Алма-Ата : Казахский политехнический ин-т, 1991. Ч. 1. С. 4.
7. *Стоклицкий А.* Еще одно великое достижение Советской власти // Известия. 1923. 28 апреля. С. 2.
 8. *Попов А. С.* Определение наиболее выгодной производительности каменноугольного рудника и размеров рудничного поля при развернутом учете капитальных затрат // Горный журнал. 1930. № 2-3. С. 3–56.
 9. *Бегалинов А. Б., Бейсебаев А. М., Крупник Л. А.* Выдающиеся деятели высшей горной школы Казахстана // Горный журнал. 2011. № 4. С. 100–103.
 10. *Дорохин Н. Г., Сидерман И. Г., Тотмаков А. В.* О «трудах» профессора – доктора технических наук А. С. Попова // Горное дело. 1938. № 2. С. 77–78.
 11. *Попов А. С.* Выступление на Карагандинской научной сессии о системах разработки и строительства шахты нового типа // Производительные силы

- Центрального Казахстана : тр. Карагандинской объединенной научной сессии. – Алма-Ата : Изд-во АН КазССР, 1959. Т. 3. Разработка угольных и рудных месторождений. С. 228.
12. *Шингарев В.* Он был первым (К 50-летию со дня разработки Курской магнитной аномалии) // Курская правда. 1973. 3 июня. С. 2–3.
 13. *Мельничук Г. А., Степанова Н. В., Мельничук Л. Я., Алтухова И. Д., Исагулов А. З.* и др. Попов Александр Сергеевич (К 130-летию со дня рождения доктора технических наук, профессора, академика Академии наук Казахской ССР, заслуженного деятеля науки Казахской ССР, заслуженного деятеля науки Узбекской ССР), 21 декабря // Календарь знаменательных и памятных дат Рязанской области на 2021 год. – Рязань : Рязанская областная типография, 2021. С. 233–261. **PK**

«GORNYI ZHURNAL», 2022, № 3, pp. 95–100
DOI: 10.17580/gzh.2022.03.15

Mining scientist A. S. Popov and his heritage

Information about authors

G. A. Melnichuk¹, Metallurgical Engineer, Historian and Archivist, Regional Ethnographer, Member of the Union of Russian Writers, nat922@yandex.ru

N. V. Stepanova², Candidate of Engineering Sciences, Member of the Russian Union of Journalists

O. V. Belyankina³, Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences

I. D. Altukhova⁴, Chief Curator

¹Shatsk Society of Regional Ethnography, Shatsk, Russia

²Ryazan Region Nation in Moscow, Moscow, Russia

³NUST MISIS, Moscow, Russia

⁴Gubkin Museum of Regional Ethnography, Gubkin, Russia

Abstract

The study reconstructs biography and professional life of a prominent Soviet scientist in mining—Alexander S. Popov (1891–1974), Doctor in Engineering, Professor and Academician of the Academy of Sciences of the Kazakh SSR. Various reference sources helped describe different periods of life of the scientist.

Alexander S. Popov was born to the family of a merchant on December 21(9), 1891 in the town of Shatsk in the Tambov Province (today the Ryazan Region). Having graduated from the Shatsk Real School, A.S. Popov entered the Mining Institute of Empress Catherine II. Even being a student, he worked at exploration and mining plants in Khiva and Dzhezkazgan in 1914, and his first scientific publications came out that time. In 1919 he graduated from the Institute. Popov started his pedagogical activities in 1921 at the Courses for Mine Foremen at the Moscow Mining Academy which trained master workmen and superintendents for mines.

In 1923 he was offered by a future Academician of the Gubkin USSR Academy of Sciences to head the iron ore appraisal survey in the area of the Kursk Magnetic Anomaly. On April 7, 1923 the efforts of Engineer Popov were rewarded with success in pioneer sampling of magnetic iron ore, which proved the world's largest occurrence of the mineral. That date was the beginning of history of the Kursk Magnetic Anomaly.

In 1926 A.S. Popov published 10000 copies of a textbook meant for schools of entry and prof levels in mining — Course on Material Science. In 1927 he was elected as a professor. His book *Mine Ventilation Design with Diagonal Airways* enjoyed three editions (in 1926, 1927 and 1930). In the 1930s, Popov published a series of scientific guidelines in the area of technical and economic analysis in mining. In 1937 he became a doctor in engineering.

In 1938 up to 1948 Popov worked in Tashkent (Uzbek SSR) at the Central Asian Industrial Institute, where he headed the Coal Mining Department and engaged himself in scientific consulting services provide to large plants in the Republic: Sredazugol, Sredazhshakhtstroi, Uzbekshakhtstroi, Uzbekugol, Mining and Survey Bureau, etc.

In 1948 the name of A.S. Popov stood in the same line with the names of the internationally recognized scientists in mining, such as Academicians of the USSR Academy of Sciences A. A. Skochinsky (1874–1960), A. M. Terpigorev (1873–1959) and L. D. Shevaykov (1889–1963), and

was invited to Alma-Ata, to the Kazakh Mining and Metallurgy Institute where the Stratified Deposit Mining Department was founded. That was the time when his pedagogical talent was revealed and let Popov to prepare thousands of mining engineers and around 100 of candidates and doctors of sciences in engineering. Many of his disciples became academicians and scientific prizewinners, including Academicians of the Kazakhstan Academy of Sciences (Kazakh SSR) Sh. A. Altaev, O. A. Baikonurov, Sh. A. Balgozhin, R. R. Bayan, Zh. S. Erzhanov, D. A. Kunaev, A. Ch. Musin and S. A. Saginov, as well as Dr. Sci. A. M. Beysebaev, V. A. Brenner, Z. K. Kargazhanov, O. V. Kim, M. M. Mukushev, A. D. Spitsyn and V. Sh. Sharipov. Professor Alexander S. Popov became Academician of the Kazakh SSR Academy of Sciences in 1954 and was awarded the Order of Lenin in 1961.

Keywords: A. S. Popov, scientist and miner, research area, technical and economic analysis, Kursk Magnetic Anomaly, theory and practice.

References

1. Beysebaev A. M. Academician A. S. Popov's scientific heritage. Technical–Economic Analysis and Design Theory in Mining: Inter-University Transactions. Alma-Ata : Kazakhskiy politekhnicheskii institut, 1991. Vol. 1. p. 9.
2. Leyst E. E. Kursk Magnetic Anomaly. Moscow : Gosudarstvennoe izdatelstvo, 1921. 72 p.
3. Trukhin V. I., Petrunin G. I. Scientific deed and drama of E. E. Leyis, Professor in Physics at the Imperial Moscow University. *OGF is 65 Years. 1998–2009 Sovetskii Fizik Newspaper*. Moscow : Fizicheskii fakultet MGU, 2009. pp. 18–22.
4. A “wild” arrow : Leyst's studies. 2019. Available at: <https://oskol.city/news/45-oemc/57643/> (accessed: 28.12.2021).
5. Gubkin I. M. An epoch-making discovery. *Izvestiya*. 1923. 28 April. p. 2.
6. Rakishov V. R. Academician of Kazakh SSR Academy of Sciences Alexander S. Popov (in commemoration of the 100th anniversary). *Technical–Economic Analysis and Design Theory in Mining : Inter-University Transactions*. Alma-Ata : Kazakhskiy politekhnicheskii institut, 1991. Vol. 1. p. 4.
7. Stoklitskiy A. One more great achievement of the Soviet Power. *Izvestiya*. 1923. 28 April. p. 2.
8. Popov A. S. Valuating the most profitable capacity and size of a coal mine field with comprehensive allowance for capital costs. *Gornyi Zhurnal*. 1930. No. 2-3. pp. 3–56.
9. Begalinov A. B., Beysebaev A. M., Krupnik L. A. Outstanding leaders of high mining school of Kazakhstan. *Gornyi Zhurnal*. 2011. No. 4. pp. 100–103.
10. Dorokhin N. G., Siderman I. G., Totmakov A. V. “Pains” of Professor and Doctor in Engineering A. S. Popov. *Gornoe delo*. 1938. No. 2. pp. 77–78.
11. Popov A. S. Speech at the Karaganda Scientific Session on Mining Systems and New-Type Mine Construction. *Central Kazakhstan's Productive Forces : Karaganda Scientific Session Proceedings*. Alma-Ata : Izdatelstvo AN KazSSR, 1959. Vol. 3. Coal and Ore Mining. p. 228.
12. Shingayev V. He was the first (in commemoration of the 50th anniversary of operation in the Kursk Magnetic Anomaly. *Kurskaya pravda*. 1973. 3 June. pp. 2–3.
13. Melnichuk G. A., Stepanova N. V., Melnichuk L. Ya., Altukhova I. D., Isagulov A. Z. et al. Alexander S. Popov (in commemoration of the 130th anniversary of Dr. Eng. Prof., Academician of the Kazakh SSR Academy of Sciences, Honored Man of Science in the Kazakh SSR and in the Uzbek SSR), 21 December. *2021 Calendar of Significant and Commemorative Dates for the Ryazan Region*. Ryazan : Ryazanskaya oblastnaya tipografiya, 2021. pp. 233–261.



«ПОЛИМЕТАЛЛ ИНЖИНИРИНГ»
ПРЕДСТАВЛЯЕТ МИРОВЫЕ БЕСТСЕЛЛЕРЫ
ПО ГЕОЛОГИИ, ГОРНОМУ ДЕЛУ,
ЭКОНОМИКЕ И ГЕОМЕХАНИКЕ на русском
языке



БОРТОВЫЕ СОДЕРЖАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ СТРАТЕГИИ ГОРНЫХ РАБОТ

(Cut-off Grades and Optimising
the Strategic Mine Plan)

Книга Брайна Холла посвящена теме, которая очень редко детально анализируется в монографиях мирового уровня. До сих пор это удавалось только трем авторам, Г. Мортимеру (1950), К. Лейну (1988) и Ж. Ренду (2009). Как утверждает автор книги, бортовое содержание — это наименее понятный критерий доходности процесса добычи полезных ископаемых. Определение его величины является неотъемлемой частью оптимизации стратегии добычи. Б. Холл рассматривает процесс развития теории бортовых содержаний во времени как постепенное добавление размерности в его определении. Первоначально бортовое содержание рассматривалось как чисто экономический параметр безубыточности и определялось только соотношением цены продукта и затрат на его получение — первое измерение. Кстати, большинство горных предприятий мира и практически все в России до сих пор используют этот метод, который, как убедительно доказал Б. Холл, не способен соответствовать целям компании и поддерживать доходы ее акционеров. Затем Г. Мортимер предложил использовать в расчетах бортового содержания, кроме фактора безубыточности, геологические особенности месторождения, чтобы полнее учитывать

интересы горной компании — второе измерение. И наконец, К. Лейн сделал этот процесс трехмерным и доказал, что в нем необходимо учитывать также производственные мощности системы для трех классов материала: горной массы, руды и готового продукта. Введенное им сбалансированное бортовое содержание является функцией геологических условий и производительности переделов и более устойчиво к изменению затрат и цен, чем широко используемое безубыточное бортовое содержание. Российские читатели с выходом этой книги впервые получают возможность подробно ознакомиться с развитием теории бортовых содержаний и горных стратегий, что, к сожалению, пока не пользуется должным вниманием в России. Между тем именно такие подходы наиболее востребованы в современном профессиональном сообществе. Книга будет полезной ведущим специалистам инжиниринговых организаций и горнодобывающих компаний, а также ученым, занимающимся оптимизацией горных систем, аспирантам и студентам горных вузов.

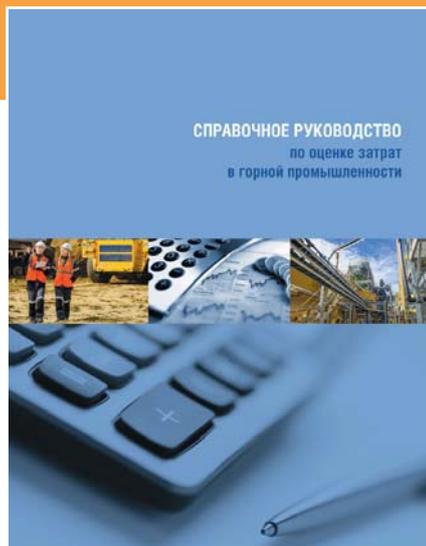
Издание доступно на сайте Эксмо
<https://eksmo.ru/>

Прямая ссылка на серию:





«ПОЛИМЕТАЛЛ ИНЖИНИРИНГ»
ПРЕДСТАВЛЯЕТ МИРОВЫЕ БЕСТ-
СЕЛЛЕРЫ ПО ГЕОЛОГИИ, ГОРНОМУ
ДЕЛУ, ЭКОНОМИКЕ И ГЕОМЕХАНИКЕ
на русском языке



СПРАВОЧНОЕ РУКОВОДСТВО ПО ОЦЕНКЕ ЗАТРАТ В ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

(Cost estimation handbook)

Справочное руководство является одним из самых популярных в мировой горной промышленности изданий австралоазиатского института горного дела и металлургии. Второе издание (2013) включает современные подходы к оценке выручки, капитальных вложений и операционных затрат с учетом специфики отраслей горнодобывающей и металлургической промышленности, а также конкретные примеры экономических расчетов на основе обширного статистического материала.

Методы стоимостной оценки приведены для различных стадий инвестиционных проектов, от замысла до ликвидации предприятия, с указанием возможной точности такой оценки. В справочном руководстве приводятся данные по подземным и открытым горным работам, современным

технологическим процессам переработки твердых полезных ископаемых, возможным инфраструктурным объектам.

Данная книга будет полезна для российского читателя, имеющего ограниченный объем достоверной систематизированной статистики в рассматриваемой области. Справочное руководство может стать настольной книгой для специалистов инжиниринговых организаций и компаний горно-металлургической промышленности, а также широко использоваться в научной и преподавательской деятельности.

Издание доступно на сайте Эксмо
<https://eksmo.ru/>

Прямая ссылка на серию:

