

www.rudmet.ru

ISSN 0017-2278

РУДНЫЙ ЖУРНАЛ

196 лет

Издается с 1825 года
(№ 2285)

4.2021

ВНИИ ГАЛУРГИИ

История. Технологии. Люди



Лаборатория
Эксперимент
Опыт Галит
Геофизика
Калий Месторождений
Изыскания
Рудник Комбинат
Технология Эксперимент
Опыт Галит
Патенты



Лаборатория
Эксперимент
Опыт Галит
Геофизика
Калий Месторождений
Изыскания
Рудник Комбинат
Технология Эксперимент
Опыт Галит
Патенты



В. В. Лаук,
генеральный директор
ПАО «Уралкалий»,
председатель Совета директоров
АО «ВНИИ Галургии»

Дорогие коллеги!
Уважаемый Дмитрий Николаевич!

От имени компании «Уралкалий» поздравляю коллектив и ветеранов ВНИИ Галургии с 90-летним юбилеем.

Созданный в 1931 году на базе Соляной лаборатории Академии наук СССР институт сыграл ключевую роль в становлении калийной промышленности в нашей стране и, соответственно, в развитии нашей компании.

Научные разработки ВНИИ Галургии воплощены практически на всех производственных объектах Уралкалия в Березниках и Соликамске. Специалисты института внесли существенный вклад в организацию процессов добычи руды и производства калийных удобрений — от проектирования шахтных стволов, разработки технологий добычи руды и организации безопасного ведения горных работ до строительства гидрозакладочных комплексов и внедрения системы мониторинга. Благодаря научным разработкам института наши технологи-обогащители достигают максимальных показателей извлечения полезного компонента — калия — из сильвинитовой руды.

В настоящее время Уралкалий продолжает реализацию проектов по развитию своих производственных мощностей. Именно благодаря специалистам ВНИИ Галургии калийщики Верхнекамья в своей деятельности имеют возможность использовать самые передовые достижения современной науки.

Отрадно, что свой 90-летний юбилей коллектив ВНИИ Галургии встречает с целым рядом достижений. Накоплен колоссальный научный опыт, достигнут неоспоримый авторитет в академическом сообществе.

Желаю всему коллективу ВНИИ Галургии успехов и благополучия, дальнейшего развития и процветания!



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 «ВНИИГП «Промтехнологии» — инженеринговый центр горнорудного дивизиона Госкорпорации «Росатом»

УЧРЕДИТЕЛИ ЖУРНАЛА:

Акционерное общество «Издательский дом «Руда и Металлы», федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Автономная некоммерческая организация «Информационный телеканал «Хибины ТВ»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

В. В. Адушкин, В. Ж. Аренс, А. А. Барях, О. С. Брюховецкий, Н. Г. Валиев, В. А. Винников (руководитель секции «Физика горных пород и процессов»), А. Г. Воробьев (председатель правления «Горного журнала»), Л. Д. Гагут (руководитель секции «Экономика, управление, недропользование»), Ж. К. Галиев, 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»), Е. А. Козловский (руководитель секции «Сырьевая база»), 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, В. С. Святецкий, И. О. Темкин (руководитель секции «Автоматизация»), Е. М. Титиевский, С. М. Ткач, К. Н. Трубецкий, В. А. Чантурия (руководитель секции «Переработка и комплексное использование полезных ископаемых»), А. Н. Шабаров, Е. Е. Шешко (руководитель секции «Горное оборудование, электроснабжение»), Т. И. Юшина, А. Б. Яновский

РУКОВОДИТЕЛИ ПРЕДСТАВИТЕЛЬСТВ В СТРАНАХ И РЕГИОНАХ:

Азим Иброхим (Таджикистан), С. С. Арзуманян (Армения), Ю. И. Волков (КМА, Россия), С. Вуйич (Сербия), И. И. Головатый (Беларусь), О. А. Одеков (Туркменистан), И. Ю. Рассказов (Дальневосточный регион, Россия), У. Д. Рыскулов (Кыргызстан) И. Б. Табакман (Канада), А. Г. Твалчрелидзе (Грузия), Л. И. Тотев (Болгария), Ф. Уолл (Великобритания), А. Ф. Цеховой (Казахстан), К. С. Санакулов (Кызылкумский регион, Узбекистан), М. Эрикссон (Швеция), З. Дж. Эфендиева (Азербайджан), В. Л. Яковлев (Средний и Полярный Урал, Россия)

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

Ежемесячный научно-технический
и производственный журнал
№ 4 (2285)
АПРЕЛЬ 2021

Подписной индекс
в объединенном каталоге «Пресса России» — 45343

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»

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
(Свидетельство ПИ № ФС77-76119 от 24.06.2019 г.)

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

Отпечатано в типографии «Печатных дел мастер»
Адрес типографии: 109518, Москва,
1-й Гайвороновский проезд, д. 4.

Подписано в печать с оригинал-макета 27.04.2021

Дата выхода в свет: 11.05.2021
Формат 60×90/8. Печ. л. 12,5

Печать офсетная. Бумага мелованная
Тираж 2500 экз. 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
- Перепечатка материалов возможна только с письменного разрешения редакции
- При перепечатке ссылка на «Горный журнал» обязательна
- За сроки размещения опубликованных статей в базе данных Scopus редакция ответственности не несет

ISSN 0017-2278



9 770017 227004 >

АО «ВНИИ ГАЛУРГИИ» — СОЮЗ НАУКИ И ПРОИЗВОДСТВА

Раевский В. И., Коробейников А. А.
АО «ВНИИ Галургии» — 90 лет 6

Носов О. А., Фатыхов Т. Т., Елькин А. А., Романовский А. А. Механизация горных работ на рудниках Верхнекамского месторождения солей 11

ГЕОЛОГИЯ, ФИЗИКА И МЕХАНИКА ГОРНЫХ ПОРОД

Царев Р. И., Жуков А. А., Пригара А. М., Шкуратский Д. Н. Технология и особенности проведения поверхностной сейсморазведки на Верхнекамском месторождении солей 17

Пригара А. М., Жуков А. А., Царев Р. И., Кашников Ю. А. Решение задач эксплуатационной разведки и повышение безопасности горных работ с помощью шахтной сейсморазведки способом ПВРО 23

Санфиров И. А., Жикин А. А., Богданов Р. А., Фаткин К. Б. Развитие интерпретационных возможностей сейсморазведочных исследований при освоении месторождений водорастворимых полезных ископаемых 28

Шкуратский Д. Н., Чернопазов Д. С., Ваулина И. Б. Оценка параметров формирования неустойчивых участков породных обнажений кровли выработок в соляных породах 34

Чернопазов Д. С., Шкуратский Д. Н., Секунцов А. И. Закономерности распределения удельного веса пород, перекрывающих промышленную толщу Верхнекамского месторождения солей 39

СТРОИТЕЛЬСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Пестрикова В. С., Ярушин А. Д., Тарасов В. В., Шкуратский Д. Н. О некоторых аспектах переменной фактической жесткости направляющих проводников в шахтных стволах калийных рудников 47

Аптуков В. Н., Тарасов В. В., Пестрикова В. С., Иванов О. В. Особенности строительства и эксплуатации дозаторных комплексов в сложных горно-геологических условиях калийных рудников Верхнекамья 51

ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Барях А. А., Тенисон Л. О. Обоснование инженерных критериев безопасной подработки водозащитной толщи на Верхнекамском месторождении солей 57

Сеннов А. С., Мухаметдинов А. В., Мясиченко А. И., Калугин А. В. Использование информационных технологий при исследовании подземных вод Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей 63

ПЕРЕРАБОТКА И КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Федулова Г. П., Букша С. В., Рогозин М. Д., Белякова К. О. Повышение качества калийных удобрений 69

Паскина А. В., Панасюк Е. Б. Получение обеспыленного хлористого калия при галургической переработке калийных руд 73

Афонина Е. И., Титков С. Н., Алиферова С. Н., Тупицын И. Ю. Исследования колонной флотации для интенсификации флотационной переработки калийных руд 77

Конобеевских А. В., Гуркова Т. М., Афонина Е. И., Пантелеева Н. Н. Разработка новых реагентных режимов флотационного обогащения калийных руд 82

Матвеев В. И., Краюхин А. Б., Максимов И. Влияние флотационных реагентов и температурных режимов сушки влажного флотоконцентрата на изменение физико-механических свойств высушенного продукта 87

Левин Л. Ю., Кормищиков Д. С., Кузьминских Е. Г., Мачерет А. М. Система навигации проходческого-очистного комбайна на калийных рудниках 92

РЕКЛАМА

На обложке:

АО «ВНИИ Галургии»

В журнале:

Компания "Cemtec"

«Уголь России и Майнинг-2021» — Международная специализированная выставка — ярмарка (г. Новокузнецк)

"TECH MINING RUSSIA — 2021". Новые технологии добычи полезных ископаемых — 3-я Международная конференция и выставка (г. Москва)

Содержание журнала «Eurasian Mining» № 2 2021

Фотография А. Д. Беглова для приветствия на 2-й странице обложки предоставлена администрацией Санкт-Петербурга (<https://www.gov.spb.ru/>).

Редакция «Горного журнала» выражает благодарность ведущему инженеру технического отдела АО «ВНИИ Галургии» **С. А. Блиновой** за большую организационную работу по подготовке материалов, посвященных 90-летию института.

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

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

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

Printed in “Pechatnykh del master” printing house

CONTENTS

VNII GALURGII JSC — A UNION OF SCIENCE AND PRODUCTION

Raevskiy V. I., Korobeynikov A. A. VNII Galurgii JSC Turns 90 6

Nosov O. A., Fatykhov T. T., Elkin A. A., Romanovskiy A. A. Mechanization of underground mining in the Upper Kama Potash Salt Deposit 11

GEOLOGY, PHYSICS AND MECHANICS OF ROCKS

Tsarev R. I., Zhukov A. A., Prigara A. M., Shkuratskiy D. N. Technology and specificity of surface seismic in the Upper Kama Potash Salt Deposit 17

Prigara A. M., Zhukov A. A., Tsarev R. I., Kashnikov Yu. A. Improvement of operational exploration and mining safety using the shear-wave reflection method of mine seismology 23

Sanfirov I. A., Zhikin A. A., Bogdanov R. A., Fatkin K. B. Evolvement of interpretation capacities of seismic measurements in mining of water-soluble minerals 28

Shkuratskiy D. N., Chernopazov D. S., Vaulina I. B. Assessment of instability initiation in exposed salt rock roofs 34

Chernopazov D. S., Shkuratskiy D. N., Sekuntsov A. I. Unit weight patterns of overlying rocks above commercial-value salt strata in the Upper Kama deposit 39

CONSTRUCTION AND OPERATION OF UNDERGROUND OPENINGS

Pestrikova V. S., Yarushin A. D., Tarasov V. V., Shkuratskiy D. N. Variable actual stiffness of guides in potash mine shafts 47

Aptukov V. N., Tarasov V. V., Pestrikova V. S., Ivanov O. V. Construction and operation of batching plants in difficult geological conditions of Upper Kama potash mines 51

HYDROGEOLOGY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Baraykh A. A., Tenison L. O. Justification of engineering safety criteria for undermining of water-proof layer in the Upper Kama Salt Deposit 57

Sennov A. S., Mukhametdinov A. V., Myasichenko A. I., Kalugin A. V. Application of information technologies in the analyses of groundwater in the Upper Kama Potash—Magnesium Salt Deposits 63

PROCESSING AND COMPLEX USAGE OF MINERAL RAW MATERIALS

Fedulova G. P., Buksha S. V., Rogozin M. D., Belyakova K. O. Improving the quality of potash fertilizers 69

Paskina A. V., Panasyuk E. B. Dedusted potassium chloride production in potash ore processing by the halurgic method 73

Afonina E. I., Titkov S. N., Aliferova S. N., Tupitsin I. Yu. The study of the column flotation capacities for stimulation of potash ore flotation 77

Konobeevskikh A. V., Gurova T. M., Afonina E. I., Panteleeva N. N. New reagent regimes for potash flotation 82

Matveev V. I., Krayukhin A. B., Maksimov I. Effect of flotation agents and temperature conditions of wet flotation concentrate drying on physical and mechanical properties of dried product 87

Levin L. Yu., Kormshchikov D. S., Kuzminykh E. G., Macheret A. M. Navigation system for heading machines in potash mines 92



Уважаемый Дмитрий Николаевич!

Поздравляю Вас и возглавляемый Вами коллектив с 90-летием АО «ВНИИ Галургии»!

История института неразрывно связана с развитием отечественного горно-химического дела. Основанный в тридцатых годах прошлого века как Соляная лаборатория Академии наук СССР, он стал крупнейшей научно-исследовательской и проектной организацией для добывающих отраслей.

Сегодня Ваше учреждение располагает мощным инновационным потенциалом и развитой инфраструктурой для полного комплекса работ по разведке, Добыче и переработке полезных ископаемых. Институт прочно занимает ведущие позиции в соляной и калийной промышленности. Сильный профессорско-преподавательский состав осуществляет подготовку научных кадров высшей квалификации для российской экономики.

В этот знаменательный день желаю всем сотрудникам «ВНИИ Галургии» крепкого здоровья, благополучия и новых свершений на благо Отечества!

Губернатор Санкт-Петербурга
А. Д. Беглов

Уважаемый Дмитрий Николаевич!
Уважаемые сотрудники и ветераны
АО «ВНИИ Галургии»!

Поздравляю вас с 90-летием Института!

ВНИИ Галургии — один из старейших в стране отраслевых институтов. Сложно переоценить его роль в становлении и развитии российской калийной промышленности и всей мировой добывающей отрасли.

За 90 лет «Галургией» разработано огромное количество уникальных технических решений, которые легли в основу строительства и реконструкции калийных и соляных предприятий на Урале, Украине, в Беларуси, Татарстане и Якутии. Ваши научно-исследовательские и проектные решения используются сегодня партнерами в Европе и Азии.

Мы гордимся тем вкладом, который внес ВНИИ Галургии в развитие ПАО «Уралкалий». Несколько поколений ученых и проектировщиков работали над тем, чтобы компания стала одним из ведущих мировых производителей калия. Сегодня Уралкалий контролирует всю производственную цепочку — от добычи калийной руды до экспорта готовой продукции, обеспечивая стабильность экономики Пермского края. В этом прямая заслуга и ветеранов института, которые стояли у истоков освоения Верхнекамского месторождения, и тех сотрудников, которые сегодня работают в Перми, Березниках и Санкт-Петербурге на благо отечественной промышленности и науки.

Благодарю каждого из вас за высокий профессионализм, инновационный подход в работе и преданность своему делу. Желаю крепкого здоровья, счастья, благополучия и успехов в реализации всех намеченных планов.



Д. Н. Махонин,
губернатор Пермского края

АО «ВНИИ ГАЛУРГИИ» – 90 ЛЕТ



В. И. РАЕВСКИЙ¹,
советник директора по геологической научной части,
проф., д-р геол.-минерал. наук,
Vitaliy.Raevskiy@uralkali.com



А. А. КОРОБЕЙНИКОВ²,
начальник технического управления

¹ Филиал АО «ВНИИ Галургии» в Санкт-Петербурге, Россия
² АО «ВНИИ Галургии», Пермь, Россия

Введение

Немногие отраслевые институты подобного рода имеют столь завидное долголетие и при этом играют исключительную роль в возникновении и развитии новой отрасли промышленности, в данном случае речь идет о галургии. Галургия (соляное дело) представляет собой отрасль научного знания и химической промышленности, связанную с изучением и освоением разнообразных по составу ископаемых солей и соляных вод. Иными словами, галургия занимается изучением месторождений солей, исследованием физико-химических свойств соляных рассолов, разработкой технологических процессов извлечения солей из недр и получения отдельных минеральных солей при переработке (обогащении), а также проблемами комплексного использования соляного сырья с получением различных продуктов.

Трудности экономического характера, возникшие в результате распада СССР, ВНИИ Галургии (ВНИИГ) пережил сравнительно безболезненно. Во-первых, ВНИИГ — один из немногих в мире комплексных институтов, занимающихся научно-исследовательскими работами и проектированием в области добычи и переработки ископаемых солей и гидроминерального сырья. Во-вторых, в сферу деятельности института вовлечены разнообразные сырьевые объекты и производимые продукты.

К числу важнейших продуктов галургической промышленности относятся калийные удобрения [1]. Остальная продукция имеет меньшее значение, но весьма разнообразна и востребована в пищевой и химической промышленности, при производстве стекла, цемента и других строительных материалов, в фармацевтической и электронной отраслях.

Рассказано об истории становления и развития Научно-исследовательского и проектного института галургии, который отмечает 90-летний юбилей. Приведены сведения о направлениях научной деятельности и перспективах расширения и углубления исследований в области изучения и освоения месторождений ископаемых солей и соляных вод.

Ключевые слова: АО «ВНИИ Галургии», научно-исследовательские работы, проектные работы, калийные руды, геологическое изучение, разработка, обогащение, комплексное использование сырья.

Становление института

Изучением минеральных ресурсов в дореволюционной России занимался Геологический комитет Академии наук. В 1915 г. для изучения естественных производительных сил России создают специальную комиссию Академии наук. Этот год принято считать началом отечественной галургии.

В первые годы советской власти в целях широкого использования естественных богатств страны начинают осуществлять программу экспедиционной деятельности АН СССР с целью изучения соляных озер, залива Кара-Богаз-Гол, сульфатных и соляных озер Сибири. Эти годы связаны с деятельностью выдающихся ученых: Д. И. Менделеева, А. П. Карпинского, И. А. Каблукова, Н. С. Курнакова, В. П. Ильинского, В. И. Вернадского, Н. Н. Страхова, А. В. Николаева и других.

Для выполнения задач, стоящих перед развивающейся в СССР горно-химической промышленностью, на базе накопленных в АН СССР данных в 1931 г. была образована Соляная лаборатория (СОЛАБ). Одновременно в конце 1920-х годов в Академии наук неоднократно в различных программах указывалось на необходимость проведения геологических исследований в районе г. Соликамска с целью обнаружения месторождений калийных солей. В 1925 г. благодаря настойчивости ученых Академии наук, энергии и организаторскому таланту профессора П. И. Преображенского экспедиция под его руководством открыла в районе Соликамска мощное месторождение калийно-магниевых солей [2].

Спустя три года в Соликамске было начато строительство первого в стране калийного рудника, который уже в 1931 г. выдал стране 120 тыс. т калийной руды, а после пуска обоганительной фабрики в 1932 г. сельское хозяйство получило 80 тыс. т калийных удобрений. В январе 1933 г. председатель Госплана СССР В. В. Куйбышев на Пленуме ЦК сказал: «Открытие калийных месторождений, имеющее в буквальном смысле слова мировое значение, создает у нас новую отрасль химической промышленности — калийную, освобождая от импорта. Попутно с добычей калия в Соликамске будут организованы



ВНИИ Галургии, г. Санкт-Петербург, проспект Народного ополчения, 2

новые производства: металлического магния, хлористого магния, соляной кислоты и т. д.».

В 1935 г. СОЛАБ получила статус Всесоюзного научно-исследовательского института [3]. Галургия стала отраслью научного знания и химической промышленности, направленной на изучение и освоение природных солевых богатств — разнообразных по составу ископаемых солей, озерных рассолов и минеральных источников. Иными словами, институт занимается изучением условий формирования и строения месторождений солей, исследованием физико-химических свойств солевых растворов, разработкой и получением минеральных продуктов, а также проблемами комплексного использования соляного сырья.

Потребности страны в расширении производства калийных удобрений на базе одного из крупнейших в мире Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей обусловили участие ВНИИГ в решении проблем создания калийной промышленности. В 1935 г. институт из АН СССР был передан в ведение Наркомтяжпрома. В 1936 г. ВНИИ Галургии впервые разрабатывает план развития соляной промышленности на вторую и третью пятилетки. В 1937 г. ВНИИГ передают в ведение Союзхимпрома, соответственно калийная тематика в институте становится ведущей.

Направления научных исследований

В предвоенные годы научные сотрудники института занимаются изучением геологического строения, разведкой и подсчетом запасов солей Верхнекамского месторождения, реконструкцией промыслового хозяйства на Михайловских содовых озерах и озере Кучук, подготовкой к пуску опытного содово-серного завода на Кара-Богаз-Голе, разработкой перспективных планов потребления и производства сульфата натрия и магниевых соединений на третью пятилетку.

В годы Великой Отечественной войны деятельность института осуществлялась с учетом требований военного времени. Многие сотрудники были призваны в армию. В Ленинграде оставалась



Соляная лаборатория, г. Ленинград, 1931 г.

небольшая группа специалистов, занимавшихся изготовлением фармацевтических препаратов для обеспечения жителей Ленинграда и бойцов Ленинградского фронта.

Основные подразделения института в декабре 1941 г. были эвакуированы в районы нахождения сырьевых баз галургических производств. Были созданы пять стационарных групп, оказывавших технологическую поддержку действующим производствам: Соликамско-Березниковскому, Кара-Богазскому, Индерскому, Западно-Сибирскому, Среднеазиатскому.

В послевоенные годы калийная промышленность стремительно развивается благодаря расширению действующих и строительству новых калийных предприятий; возрастающие масштабы добычи калийных солей и производства удобрений обусловили привлечение специалистов ВНИИГ к решению горно-геологических и химико-технологических проблем.

Большой объем работ по проектированию горно-химических предприятий выполнен не только для России, но и для Белоруссии и Украины. Созданы проекты Стебниковского калийного и Калушского химико-металлургического комбинатов на Украине. По проекту института идет строительство химической фабрики на Первом Березниковском калийном комбинате.

В целях совершенствования и повышения оперативности НИОКР, проводимых на калийных объектах, в 1967 г. ВНИИГ был объединен с Ленинградским филиалом института «Госгорхимпроект» и создан комплексный Всесоюзный научно-исследовательский и проектный институт галургии.

Созданию комплексного института предшествовала организация научно-исследовательских лабораторий в Березниках (1957 г.), Солигорске (1961 г.), Калуше (1959 г.), Стебниках (Львовская обл.) и Бекдаше (Туркмения). На базе лабораторий в городах Пермь, Минск и Калуш были организованы филиалы института, имеющие в своем составе научную и проектную части.

В эти и последующие годы был выполнен большой объем работ по изучению геологического строения Верхнекамского и других месторождений, подсчету запасов сырья, совершенствованию технологии и повышению безопасности добычных работ. Обоснованы параметры разведочной сети и выданы методические рекомендации по геологическому обслуживанию рудников, предложены методы количественной оценки горнотехнических условий добычи солей, разработаны проекты кондиций на различные виды галургического сырья. В результате в категорию промышленных переведено более 1 млрд т руды, — количество запасов которых достаточно более чем на 10 лет работы всех рудников [3–5]. В лабораториях института были изучены физико-механические свойства соляных пород для определения способа их отбойки и транспортирования [6, 7]. Разработаны методы расчета ожидаемых деформаций земной поверхности и предложены способы охраны конкретных объектов от влияния подземных разработок.

Есть основания считать, что в результате исследований, проведенных во ВНИИГ в эти годы, создана теоретическая основа для осуществления оптимальной системы геологоразведочных работ, проводимых на пластовых месторождениях [8].

В результате строительства крупных калийных предприятий в 1968 г. отечественная калийная промышленность вышла

на первое место в мире по объему производства калийных удобрений.

На основе результатов лабораторных исследований ВНИИГ с 1972 г. начаты опытно-промышленная проверка и последующее внедрение камерной системы разработки с податливыми целиками и сплошной системы разработки с селективной выемкой на Старобинском месторождении в Белоруссии. Применение новых прогрессивных технологий добычи калийных руд позволило повысить их извлечение из недр более чем в 1,5 раза и тем самым существенно продлить срок эксплуатации Старобинского месторождения.

Изменение технологии добычи солей включает в себя как главный элемент не только изменение системы ведения горных работ, но и их механизацию. Еще в 1934 г., вскоре после пуска Первого Солигорского рудника, первый начальник Союзкалия В. Е. Цифринович писал: «Концентрация для нашей механизированной шахты имеет огромное значение. Вопрос идет о том, чтобы среднесуточную добычу в 6–7 тысяч тонн выдавать не из 70, а из 40 добычных мест».

В 1934–1954 гг. используют классический буровзрывной способ (мелкошпуровая отбойка), переносное забойное оборудование (электросверла, скреперные лебедки) и электровозный транспорт.

В 1955–1964 гг. начинают применять комбайны в комплексе со скреперными лебедками, в основном на горно-подготовительных работах, при сохранении буровзрывного способа на очистных работах и электровозного транспортирования руды.

Для 1965–1976 гг. характерно интенсивное оснащение рудников специально созданными калийными комбайнами, средствами пневмоколесного и ленточного транспорта. Иными словами, осуществляется переход к использованию комбайнового забойного оборудования и непрерывному транспортированию руды по панелям и магистральным выработкам.

С середины 1970-х годов начат четвертый этап, характеризующийся внедрением прогрессивных технологических решений на базе достигнутого высокого уровня механизации горных работ и полного перехода к комбайновой выемке.

Наряду с этим специалистами ВНИИГ были проведены исследования по увеличению извлекаемых запасов калийных солей. Широкое использование математических методов позволило осуществить количественную оценку и прогнозирование горнотехнических условий разработки месторождений калийных солей и безопасной работы рудников. Проведены исследования условий закладки отходов в подземные выработки.

Участвуя в работах по техническому вооружению и переоснащению калийных фабрик, сотрудники института создали новые типы технологического оборудования для процессов растворения, отстаивания, грануляции и сушки продуктов обогащения.

Внедрение высокоэффективного технологического оборудования, разработанного с учетом специфики калийной промышленности, позволило повысить извлечение полезного компонента и качество товарного продукта, значительно улучшить физико-механические свойства мелкозернистого и гранулированного хлористого калия [9].



Бизнес-центр «Келлерман», филиал Общества в г. Санкт-Петербурге

Специалистами института успешно решена задача по реализации промышленного производства сульфата калия — бесхлорного удобрения для поставок на экспорт и внутри страны [10].

В 1950–1960-е годы в институте по инициативе А. А. Желнина впервые в стране были начаты исследования по разработке основ теории флотации солей и технологии флотационного обогащения калийных руд различного состава [11]. Разработанные схемы обогащения позволили значительно расширить область применения флотационного обогащения при температуре окружающей среды. Это дало возможность в период 1963–1983 гг. построить 9 флотационных объектов на Урале, в Белоруссии и на Украине (А. А. Желнин, Н. Н. Тетерина, Ю. Ч. Мочульская, Л. Н. Отраженнова, Е. И. Соловьев, Т. В. Каплянская, Л. В. Гнип, С. Н. Титков, М. М. Рыжова, В. Г. Егорова) [12, 13].

Флотационные способы обогащения солей являются экономически существенно более привлекательными по сравнению с галургическими (растворение-кристаллизация), поэтому исследовательские работы этого направления интенсивно продолжаются до настоящего времени (С. Н. Титков, Л. Я. Сквирский,

Г. П. Киселев, Т. М. Гуркова, Н. Н. Пантелева, А. В. Конобеевских, Е. И. Афонина) [14].

В результате успешно осуществленного технического перевооружения уральских и белорусских рудников и калийных фабрик калийная промышленность успешно развивалась. Качество выпускаемой продукции улучшалось. В 1988 г. калийные рудники выдали 80 млн т калийной руды.

Благодаря разработкам ВНИИГ были значительно улучшены физико-механические свойства мелкозернистого и гранулированного хлористого калия (Л. Я. Сквирский, З. Л. Козел). В результате российские калийные фабрики успешно конкурируют с мировыми производителями хлористого калия и экспортируют свою продукцию в 60 стран.

Общезвестен существенный, а порой и основной, вклад ВНИИ Галургии в развитие соляной, сульфатной и фосфорной промышленности. На основе его исследований и по его проектам были построены Мозырский солевыварочный комбинат по производству соли «Экстра» (Белоруссия), солерудник № 4 и «Артем-соль» (Украина), а также один из крупнейших в мире Баскунчакский солепромысел.



Здание АО «ВНИИ Галургии», г. Пермь (головной офис)

Всего по проектам института построены и успешно функционируют 14 рассолопромыслов, в том числе крупный Яр-Биш-кадакский, сульфатные предприятия «Карабогазсульфат» (Туркмения) и «Кучуксульфат» (Алтайский край), Кингисеппский горно-обогатительный фосфорный комплекс и др.

Научно-организационная деятельность

В 1978 г. Уральский филиал (Пермь) стал основным проектировщиком для производственного объединения «Уралкалий». По его проекту впервые в отечественной практике осуществлено высотное (до 100 м) складирование солеотходов, реализованы другие значимые производственные объекты. Внедрены комбайновая технология добычи карналлита, опасного по газодинамическим выбросам, схемы размещения солеотходов в подземных горных выработках.

Наряду с этим ВНИИГ был основным разработчиком технологической части проекта морских терминалов по перегрузке минеральных удобрений в портах Вентспилса и Санкт-Петербурга, уникальных складских сооружений для хранения и перевалки различного горно-химического сырья, а также карьеров и дробильно-сортировочных фабрик, складов взрывчатых веществ и др.

В разные годы специалисты ВНИИГ выполняли научно-исследовательские и проектные работы для зарубежных партнеров: Болгарии (Мировский рассолопромысел), Ливии (получение металлического магния и хлора), Китая (производство синтетического карналлита), Исландии (извлечение карналлита из морской воды), Египта (получение окиси магния), Иордании и Ирана (выпуск сульфата калия), Ирака (получение окиси магния), Узбекистан (производство флотационного хлористого калия).

В 1992 г. ВНИИГ и его Уральский филиал в Перми стали самостоятельными организациями.

Специалистами института разработаны технологии и оборудование для ведения закладочных работ на калийных рудниках (Б. А. Борзаковский, Л. М. Папулов, М. И. Русаков).

Технологические схемы гидрозакладки отработанных камер и гидрозакладочные комплексы по производительности и дальности транспортирования не имеют аналогов в мировой практике, а технология закладки глинисто-солевых шламов в подземные выработки позволяет сократить потребность в площадях под шламохранилища [15, 16].

При строительстве первой очереди калийного рудника на базе Тюбегатанского месторождения в Узбекистане (Дехканабад) институтом (впервые в мире для калийных рудников) были обоснованы и разработаны (2008 г.) проектные решения (А. А. Романовский, А. В. Мальгин, Б. Н. Толмачев) [17], предусматривающие вскрытие запасов сильвинитовой руды наклонными стволами с проходкой выработок комбайновыми комплексами, что позволило приступить к добыче в рекордно короткие сроки (2010 г.).

Пермским институтом выполнен проект увеличения мощности рудника БКПРУ-4 до 19,8 млн т сильвинитовой руды в год, спроектированы новые рудники — Усть-Яйвинский и Южный. В Санкт-Петербурге разработана документация на строительство Половодского калийного комбината, а также выполнен проект расширения мощности рудника СКРУ-3 по добыче сильвинитовой руды до 14,8 млн т в год.

В 2016 г. произошло объединение Санкт-Петербургского филиала и пермской «Галургии». Деятельность нескольких поколений научных сотрудников и проектировщиков, сохранивших традиции комплексного решения возникающих задач на основе дружной коллективной работы, продолжается и в настоящее время.

Отвечая на потребности производства, институт сегодня выполняет широкий спектр научных исследований в области геологии и гидрогеологии месторождений калийных солей, способов вскрытия продуктивных пластов, технологии добычи и переработки калийных руд. Научные исследования и проектные разработки института являются прочным фундаментом для создания новых и реконструкции действующих предприятий, и в первую очередь — для ПАО «Уралкалий».

Библиографический список

1. Букша Ю. В. Становление и развитие ВНИИГалургии за 75 лет // Горный журнал. 2007. № 8. С. 5–9.
2. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации. Неметаллические полезные ископаемые. Соли калийные. — М.: РФО, 2015. С. 1–12.
3. Соликамские карналлиты : сб. науч. тр. ВНИИГ / под ред. Р. Х. Сабирова, Ю. В. Букши. — СПб.: ИИА «Лик», 2007. — 192 с.
4. Раевский В. И., Фивег М. П., Герасимова В. В., Горбов А. Ф. Месторождения калийных солей СССР. — Л.: Недра, 1973. — 344 с.
5. Оловянный А. Г. Механика горных пород. Моделирование разрушений. — СПб.: ООО «ИПК «КОСТА», 2012. — 280 с.
6. Пермяков Р. С., Ковалев О. В., Пинский В. Л. и др. Справочник по разработке соляных месторождений. — М.: Недра, 1986. — 212 с.
7. Пинский В. Л. Развитие техники и технологии добычи калийных руд в России // Горный журнал. 2007. № 8. С. 13–17.
8. Раевский В. И., Медведев Н. С. Методы изучения изменчивости свойств пластовых месторождений. — Л.: Недра, 1976. — 101 с.
9. Высоцкий Е. А., Желнин А. А., Здановский А. Б., Кашкаров О. Д., Пермяков Р. С. и др. Галургия: теория и практика. — Л.: Химия, 1983. — 368 с.
10. Букша Ю. В., Осипова Г. В., Сафрыгин Ю. С. Конверсионные способы получения сульфата калия // Горный журнал. 2007. № 8. С. 83–85.
11. Желнин А. А. Теоретические основы и практика флотации калийных солей. — Л.: Химия, 1973. — 184 с.
12. Титков С. Н., Мамедов А. И., Соловьев Е. И. Обогащение калийных руд. — М.: Недра, 1982. — 216 с.
13. Тетерина Н. Н., Сабиров Р. Х., Скворский Л. Я., Кириченко Л. Н. Технология флотационного обогащения калийных руд. — Пермь — Соликамск — Березники, 2002. — 484 с.
14. Titkov S., Buksha Y., Panteleeva N., Gurkova T. New technology of potash ores flotation using modified alkylamines and alkylmorpholines // Proceedings of the XXVI International Mineral Processing Congress. — New Delhi, 2012. P. 5462–5473.
15. Борзаковский Б. А., Русаков М. И., Алыменко Д. Н. Оценка эффективности закладочных работ на рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей // Горный журнал. 2012. № 8. С. 125–127.
16. Борзаковский Б. А., Папулов Л. М. Закладочные работы на Верхнекамских калийных рудниках : справочник. — М.: Недра, 1994. — 234 с.
17. Романовский А. А., Мальгин А. В. Проектные решения по вскрытию запасов Тюбегатанского месторождения — новое слово в практике строительства калийных рудников // ОАО «Галургия» — 40 лет пути: задачи, решения, достижения : сб. науч. тр. — Новосибирск : Наука, 2012. С. 110–114. [\[Ж\]](#)

УДК 622.363.2

МЕХАНИЗАЦИЯ ГОРНЫХ РАБОТ НА РУДНИКАХ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СОЛЕЙ



О. А. НОСОВ,
начальник,
Oleg.Nosov@uralkali.com



Т. Т. ФАТЫХОВ,
главный специалист



А. А. ЕЛЬКИН,
главный специалист



А. А. РОМАНОВСКИЙ,
заместитель начальника

Горно-механический отдел АО «ВНИИ Галургии», Пермь, Россия

Введение

Вопросы механизации горных работ относятся к числу важнейших на всех стадиях становления и развития отечественной калийной промышленности. Добыча калийных руд на Верхнекамском месторождении солей (ВКМС) была начата в 1934 г. с вводом в строй Соликамского комбината. В период 1934–1964 гг.

Изложены основные этапы развития комбайновой технологии на рудниках Верхнекамского месторождения солей. Отмечены основные преимущества и отличия комбайнового способа проходки бункеров и подземных складов взрывчатых материалов от буровзрывного.

Ключевые слова: Верхнекамское месторождение, калийные соли, горные работы, механизация, буровзрывной способ выемки, проходческий комбайн, конвейерные системы.

использовали преимущественно буровзрывной способ выемки (мелкошпуровая отбойка), переносное забойное оборудование (ручные и колонковые электросверла), врубовые машины, скреперные лебедки для доставки руды из забоя и электровозный транспорт. Период 1965–1975 гг. характеризуется интенсивным оснащением рудников специально созданными для выемки калийных пластов комбайнами, самоходными средствами доставки и конвейерным транспортом [1].

Развитие технологии и средств механизации на рудниках

На рудниках ВКМС сегодня применяют как отечественные проходческо-очистные комбайны «Урал-20Р», «Урал-10Р», «Урал-61», изготовленные на Копейском машиностроительном заводе, так и импортные — Marietta-900 (Sandvik Mining & Construction GmbH, **рис. 1**), MB900 (T-Machinery). Комбайны обеспечивают отделение руды от массива и ее погрузку в бункеры-перегрузжатели БП-15, БПС-25. Доставку руды от бункера-перегрузжателя до участков конвейера или рудоспускной скважины осуществляют самоходным вагоном на



Рис. 1. Комбайн Marietta-900 в камере для добычи каменной соли

пневмошинном ходу с электрическим приводом (применяют вагоны ВС-30, 10ВС-15, 5ВС-15М).

В настоящее время буровзрывные работы (БВР) на рудниках ВКМС носят локальный характер, их применяют в основном при проходке общешахтных и участковых бункеров, различных ниш и приямков, а также на вспомогательных операциях, таких как обборка кровли и др. [2, 3]. При этом наблюдается тенденция замены трудоемкого буровзрывного способа проходки на более производительный и более безопасный комбайновый способ.

Это можно видеть на примере строительства участковых аккумуляющих бункеров, располагаемых вертикально между выработками выемочного (загрузочного) и транспортного горизонтов, традиционно проходимых буровзрывным способом (рис. 2).

На рудниках ВКМС прослеживается постепенный переход от буровзрывного способа проходки таких бункеров на комбайновый.

Для нового способа строительства бункера в процессе проектирования была разработана технология проходки, решены вопросы обеспечения требуемой вместимости бункера и его работоспособности при самотечном выпуске руды [4]. Для оценки устойчивости формируемого бункера и находящихся в его окрестности выработок на необходимый срок службы выполнено математическое моделирование напряженно-деформированного состояния породного массива, определены допустимые параметры бункеров и оставляемых потолочин в конкретных горно-геологических условиях [5].

Участковые бункеры в зависимости от мощности добычного участка различаются по своей вместимости, как правило, она составляет от 100 до 300 т. Разработаны различные конфигурации бункеров в зависимости от необходимой вместимости. Для бункеров вместимостью до 150 т разработана односторонняя схема проходки, предусматривающая заезд в бункер



Рис. 2. Бункер, пройденный с помощью БВР

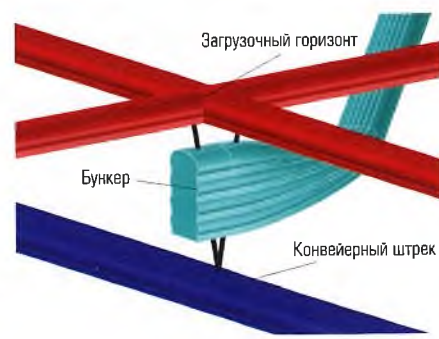


Рис. 3. Бункер вместимостью до 150 т, пройденный с помощью комбайна «Урал-20Р»

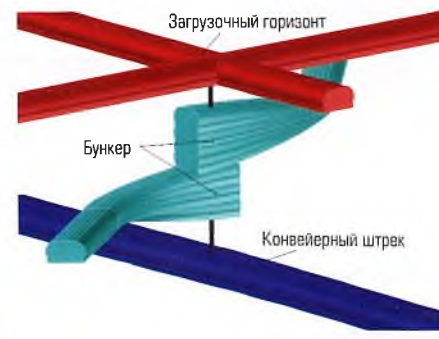


Рис. 4. Бункер вместимостью 150 т и более, пройденный с помощью комбайна «Урал-20Р»

с одной выработки (рис. 3). Для более вместительных бункеров (от 150 т и выше) разработана схема с двухсторонним заездом в бункер из двух выработок (рис. 4).

Еще одним направлением замены буровзрывного способа проходки комбайновым стало применение комбайнов с исполнительным органом избирательного действия на работах, ранее выполняемых исключительно буровзрывным способом — при проходке ниш, приямков в выработках и обборке кровли. Для выполнения подобных операций используют комбайны КП-21 и MF 1500 (рис. 5, 6).

При разработке проектной документации для строящихся калийных рудников ПАО «Уралкалий», Усть-Яйвинского рудника и Южного рудника СКРУ-2 были рассмотрены варианты проектных решений по сооружению подземного склада взрывчатых материалов (ВМ). Проведено сравнение способов проходки выработок склада — буровзрывного и комбайнового. Согласно федеральным нормам и правилам в области промышленной безопасности, выработки, в которых расположены камеры или ячейки для хранения взрывчатых материалов (хранилища), должны соединяться с главными выработками не менее чем тремя подводными прямолинейными или криволинейными выработками, образующими друг с другом прямые углы. Технические характеристики комбайна — радиус поворота, габариты, исполнительный орган — не позволяют обеспечить проходку под прямыми углами выработок без увеличения объема горнопроходческих работ (в сравнении с применением БВР).

На рис. 7 показаны конфигурации склада ВМ при комбайновом и буровзрывном способах проходки.

Очевидно, что объем проводимых выработок с использованием комбайна заметно превышает таковой при применении буровзрывного способа проходки. Сравнительные данные по вариантам сведены в таблицу. Производительность работ приведена с учетом фактических данных в условиях Верхнекамского месторождения солей.

Из данных таблицы следует, что объем горнопроходческих работ при механизированном комбайновом способе в два с лишним раза больше, чем при проведении выработок с использованием



Рис. 5. Проходческий комбайн КП-21

буровзрывного способа, однако при этом время, затрачиваемое на проходку выработок, сокращается в 4,5 раза, а производительность возрастает в 14 раз. В рассмотренном примере использование комбайнового способа проходки предпочтительнее буровзрывного по критериям продолжительности строительства и затратам труда, кроме того, сокращаются сроки ввода склада в эксплуатацию. Вместе с этим повышается безопасность работ, так как на проходке выработок не используют взрывчатые материалы. Учитывая указанные преимущества и технико-экономические показатели работ, был принят вариант с проходкой выработок склада комбайновым способом.

Актуальной задачей в процессе механизации горных работ в калийной отрасли является дальнейшее повышение производительности оборудования с целью снижения себестоимости добычи. Техническая производительность комбайна на добыче сильвинитовой руды с 1970-х годов выросла с 3–5 до 10–11 т/мин. При этом для доставки отбитой породы от комбайна до конвейера

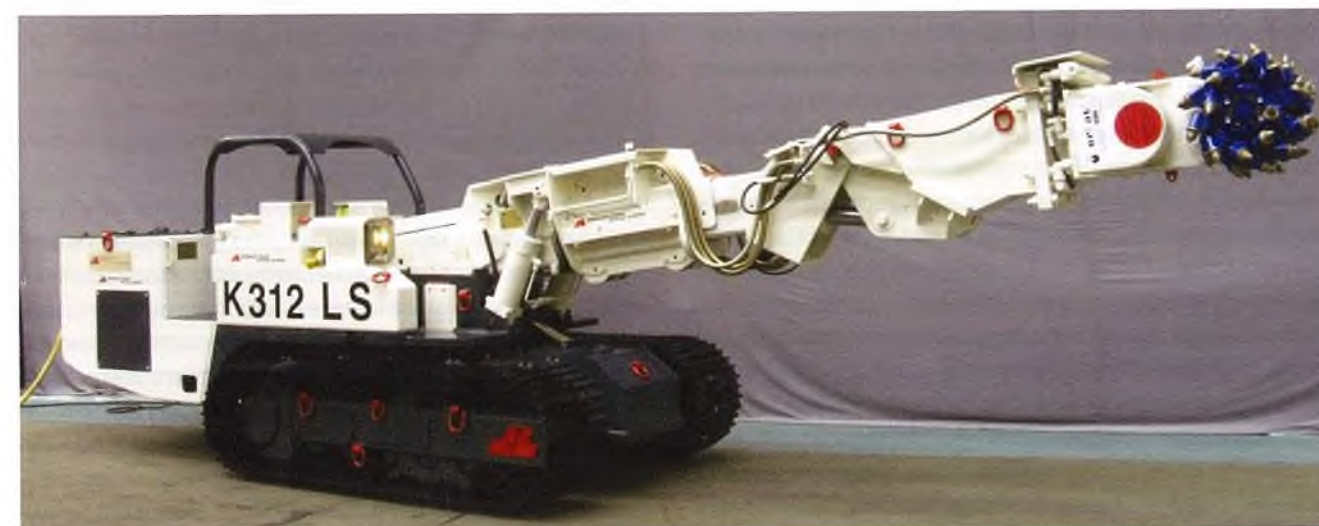


Рис. 6. Многофункциональная машина MF 1500

по-прежнему используют электрические самоходные вагоны. Для повышения производительности доставки отбитой руды до конвейера самоходные вагоны модернизировали, были разработаны более вместительные варианты, позволяющие перевозить около 30 т за один цикл доставки. При этом маневренность самоходного вагона из-за увеличения его габаритов и наличия электрического кабеля существенно снижалась. Менялись и схемы подготовки участков с учетом особенностей оборудования, благодаря этому использование электрических самоходных вагонов с увеличенной грузоподъемностью не вызывает существенных проблем в эксплуатации. Однако повышение грузоподъемности самоходных вагонов по-прежнему не решает проблемы роста производительности комбайнового комплекса в целом из-за цикличности применяемых средств доставки и не позволяет полностью реализовать технические возможности комбайна.

В то же время в мире активно ведут работы по созданию конвейерных систем, позволяющих непрерывно транспортировать отбитую породу непосредственно от комбайна до магистральных конвейерных линий без использования самоходного вагона, что позволит в полной мере реализовать производительность комбайнов.

Нескольким компаниям удалось претворить данную идею в жизнь, создав изгибающиеся конвейеры, способные перемещаться вслед за комбайном. Конструкция такого конвейера состоит из секций, стоек, опор, роликов и специальной изгибающейся конвейерной ленты, а также гусениц для перемещения конвейера. Другое решение заключается в создании конвейерного поезда, состоящего из небольших конвейеров-перегрузателей, установленных на колесных тележках и сцепленных между собой; длина каждого такого перегружателя примерно 15 м. Суммарная длина конвейера составляет 120–180 м. Такие системы могут изгибаться по радиусу выработок как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях.

Также существуют системы телескопических и шагающих конвейеров, имеющих секцию для накопления ленты и гидравлическую систему, позволяющую конвейеру перемещаться и удлиняться. Перемещение конвейера происходит с помощью стоек и лап. Такие системы имеют жесткие рамы и не могут изгибаться по радиусу проводимых выработок. Сам конвейер состоит из секций и в стартовом положении имеет длину 60–80 м, при раздвижении всех секций длина конвейера может достигнуть 1200–1400 м.

Производительность конвейерных поездов составляет около 600 т в час и более. Максимальная техническая (без учета маневровых и вспомогательных операций) производительность комбайна «Урал-20Р» составляет 10 т в минуту, или 600 т в час. При использовании комбайна и конвейера непрерывной доставки технической производительности последнего достаточно, чтобы обеспечивать непрерывную отбойку и транспортирование руды от забоя до магистрального конвейера.

Годовые мощности калийных рудников исчисляются миллионами тонн и могут достигать 10–20 млн т руды в год, а значит, имеется и потребность в современных высокопроизводительных добычных системах. Однако возможность использования таких систем требует выполнения ряда условий. Например, стоимость современных систем может быть сопоставима с ценой двух-трех

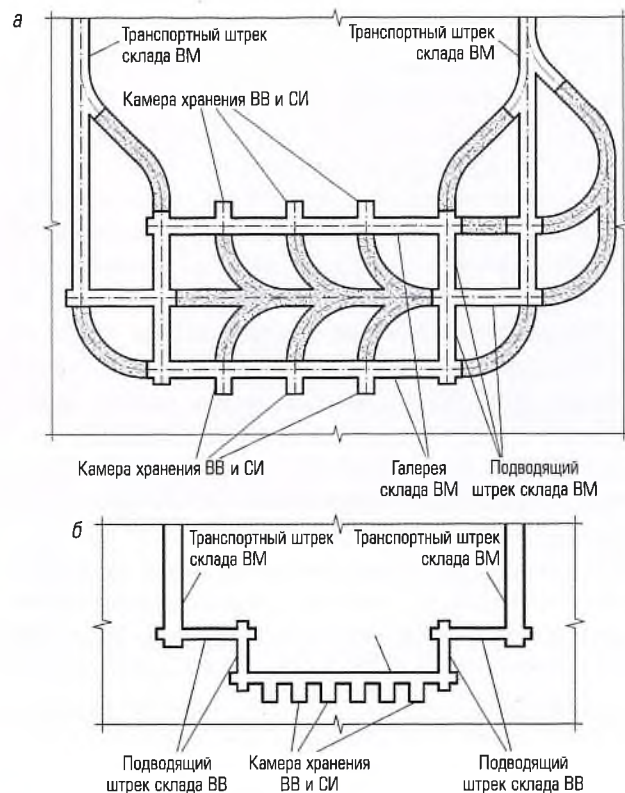


Рис. 7. План выработок склада ВМ при проходке комбайновым (а) и буровзрывным (б) способами

Основные показатели буровзрывного и комбайнового способов проходки склада ВМ

Показатели	Способ проходки	
	Комбайновый	Буровзрывной
Объем проходки, м³ (т)	10480 (22000)	4760 (10000)
Средняя производительность при проходке, т/сут	700	50
Время проходки, сут	32	200
Объем засыпки, т	4600	—
Средняя производительность при засыпке, т/сут	400	—
Время засыпки, сут	12	—
Общая продолжительность горнопроходческих работ, сут	44	200

комбайновых комплексов, поскольку существующие разработки – это импортные конвейеры. Кроме этого, использование данных систем подразумевает изменение существующих схем подготовки участков. Необходимо учитывать и сложность в перемещении конвейерных «поездов», длина которых около 200 м. Проблема состоит в их перемещении по узким, часто негоризонтальным (вследствие гипсометрии пластов) выработкам и по уклонам с одного горизонта на другой. Существенным ограничением в использовании таких систем является сложность организации поточного сброса на магистральный конвейер, т. е. разгрузочная секция конвейерного поезда должна перемещаться по



Рис. 8. Ленточный телескопический конвейер Сибзэлектро (<https://sibelectro.com/>)

принимающему магистральному конвейеру или вдоль него. Следовательно, для использования такой системы необходим магистральный конвейер специальной конструкции. Ширина и высота конвейерных штреков должны обеспечивать возможность размещения данного оборудования, на рудниках же Верхнекамского месторождения такая возможность не всегда имеется. На других калийных рудниках, например в Канаде, устойчивость пород и горизонтальное залегание соляных пластов способствуют успешному использованию таких систем.

Сегодня задача состоит в том, чтобы применить отечественные разработки, созданные для горнотехнических условий Верхнекамского месторождения. Использование шагающего конвейера отечественного производства (рис. 8) с телескопическими секциями и барабаном для конвейерной ленты позволит сократить объем горно-подготовительных работ и механизировать часть операций, связанных с наращиванием конвейерного става. Возможна реализация следующей технологической схемы. В начале очистного блока проходят стартовое число выработок и монтируют оборудование конвейера в начальном положении, после этого выемочный участок уже подготовлен к ведению очистных работ. Данная схема не влияет непосредственно на производительность очистных работ, как в предыдущих случаях, однако существенно сокращает время на подготовительные работы, включающие проходку выработок и монтаж конвейера.

Далее комбайновым комплексом проходят одновременно очистные камеры и подготовительные выработки, вслед за которыми наращивают конвейер. Показатели производительности будут более скромными относительно ранее описанных конвейерных «поездов», так как доставку из забоя (от очистного комбайна)

будут осуществлять самоходным вагоном, но это компенсируется значительно более быстрым стартом очистных работ. К очевидному преимуществу данного типа конвейера можно отнести и то, что это оборудование отечественного производства, а значит, стоимость его будет существенно ниже импортных аналогов и обслуживание будет проще, так как не требуются привлечение иностранных специалистов и поставки комплектующих зарубежного производства.

Учитывая вышесказанное, можно предположить, что при комбинации конвейерного изгибающегося поезда и наращиваемого конвейера можно получить высокопроизводительный механизированный комплекс, позволяющий свести к минимуму объемы подготовительных работ и получить максимальную производительность благодаря поточной доставке руды конвейерами. Данный комплекс теоретически может заменить несколько существующих комбайновых комплексов (предположительно не менее 3–5) и исключить часть комбайнов, которые ранее были



Рис. 9. Система автоматизации и дистанционного управления оборудованием

задействованы на проходке подготовительных выработок. Для достижения таких показателей необходимо проведение опытных работ с целью изучения всех технологических процессов на практике, также потребуются изменение существующих схем подготовки и расположения очистных камер с учетом обеспечения максимальной эффективности применения новой техники.

При повышении производительности очистных работ должны быть обеспечены безопасные условия труда горнорабочих. Дальнейшим направлением совершенствования процесса добычи должно стать внедрение систем видеонаблюдения и дистанционного управления, автоматизация процесса очистной выемки, позволяющих исключить присутствие людей в наиболее опасном месте — забое очистной камеры. Сегодня уже известны и ведутся испытания систем, работающих по безлюдной технологии, находят применение системы искусственного интеллекта, при этом люди находятся не в забое, а в более безопасном месте, как правило, на поверхности (рис. 9). На машинах устанавливают датчики, видеокамеры, а все команды передают по каналам связи на пульт управления. Кроме этого, электроника следит за состоянием машин, все приборы, указывающие на работоспособность техники, также выносятся на пульт. Данная технология особенно актуальна при разработке месторождений, опасных по газам и газодинамическим явлениям. Особую значимость данная технология приобретает при работе в аварийных ситуациях, когда в шахте требуется зачистка вывалов или необходимо добраться до удаленного участка, а повышенная концентрация газов или недостаточный запас кислородных баллонов для спасателей не позволяют это сделать.

Заключение

Основу комбайновой технологии добычи для калийных рудников ВКМС разработали более 50 лет назад. За это время степень механизации, производительность оборудования, уровень оснащения и безопасность горных работ на рудниках ВКМС существенно выросли и находятся на современном уровне. Последнее десятилетие стало непростым для мировой калийной промышленности в целом, наблюдается падение цен на готовый продукт. В этих обстоятельствах повышение уровня механизации, внедрение новых технологий, позволяющих сократить затраты на производство калия, являются одним из условий сохранения лидирующих позиций на рынках. Зарубежная практика и отечественный опыт указывают на возможные пути дальнейшего развития технологии добычи калийной руды. Успешное решение задач по совершенствованию техники и технологии, переход на новый уровень механизации горных работ возможны с привлечением специалистов научно-исследовательских и образовательных институтов, производителей оборудования совместно с предприятиями, осуществляющими добычу солей.

Библиографический список

1. Пинский В. Л. Развитие техники и технологии добычи калийных руд в России // Горный журнал. 2007. № 8. С. 13–17.
2. Методическое руководство по ведению горных работ на рудниках ОАО «Сильвинит» / ред. В. А. Соловьева, ОАО «Галургия». — Новосибирск: Наука, 2011.
3. Методическое руководство по ведению горных работ на рудниках Верхнекамского калийного месторождения. — М.: Недра, 1992. — 467 с.
4. Пат. 2720040 РФ. Комбинированный способ проходки бункера повышенной емкости / Т. Т. Фатыхов, О. А. Носов, О. В. Максимов, С. А. Куимов; заявл. 11.06.2018; опубл. 23.04.2020, Бюл. № 12.
5. Оценка устойчивости подготовительных выработок в условиях рудника БКПРУ-4: исходные данные. — Пермь, 2019. **ГЖ**

УДК 553.63:550.834

ТЕХНОЛОГИЯ И ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ НА ВЕРХНЕКАМСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ СОЛЕЙ



Р. И. ЦАРЕВ,
старший научный сотрудник,
roman.tsarev@uralkali.com



А. А. ЖУКОВ,
заведующий лабораторией
геофизики, канд. техн. наук



А. М. ПРИГАРА,
ведущий научный сотрудник,
канд. техн. наук



Д. Н. ШКУРАТСКИЙ,
генеральный директор,
канд. техн. наук

Описаны технологические особенности проведения поверхностной сейсморазведки в условиях Верхнекамского месторождения солей. На основе проведенных исследований разработана технология выполнения малоглубинных сейсморазведочных работ с применением взрывного источника упругих колебаний. Обоснованы условия использования импульсного порохового источника для изучения массива в интервале глубин 200–400 м.

Ключевые слова: Верхнекамское месторождение солей, поверхностная сейсморазведка, метод отраженных волн, импульсный пороховой источник, энергия взрыва, зона малых скоростей, акустическая жесткость.

DOI: 10.17580/gzh.2021.04.01

качественный и надежный материал сложно. В связи с этим выполнены исследования по сравнению эффективности источников колебаний упругих волн, а также рассмотрены особенности проведения малоглубинной сейсморазведки на ВКМС.

Характеристика месторождения

ВКМС находится в пределах Пермского края. На месторождении ведут добычу сильвинита, карналлита, каменной соли и рассолов. Галогенная формация имеет форму линзы и прослеживается в меридиональном направлении на 206 км, в широтном на 56 км, представлена общей мощностью до 550 м. Соляная толща подразделяется (снизу вверх) на подстилающую каменную соль, калийную залежь, состоящую из сильвинитовой и карналлитовой пачек, покровную каменную соль и соляно-мергельную толщу, в нижней части которой наблюдается переслаивание каменной соли с прослоями мергеля (переходная пачка). Соляная толща имеет достаточно сложную тектонику [8] с присутствием неоднородностей различного типа, например внутрисоляных деформаций (ВСД) [9].

Надсоляной комплекс пород представлен терригенно-карбонатной, пестроцветной толщами и четвертичными отложениями [10]. Ниже соляной залежи залегает глинисто-ангидритовая толща. Ее слагают мергели и аргиллиты, доломиты и в меньшей степени — известняки, ангидритовая порода, алевролиты и песчаники. В разрезе толщи встречаются линзы и пласты каменной соли мощностью до 12 м. Все эти породы чередуются в разрезе и сменяют друг друга на площади [11].

Технология и особенности проведения работ

Полевые сейсморазведочные работы на ВКМС в настоящее время выполняют по методике невзрывной малоглубинной сейсморазведки высокого разрешения с использованием интерференционной системы наблюдения [12]. Для возбуждения упругой волны при этом используют источники упругих колебаний двух типов: механический поверхностный источник (принцип

Введение

Поверхностные сейсморазведочные исследования для изучения геологического строения Верхнекамского месторождения солей (ВКМС) проводят уже несколько десятилетий. Основной целью этих работ является получение исходных данных для проектирования горных работ и безопасной эксплуатации калийных рудников.

Продуктивный интервал соляной толщи на ВКМС залегает на небольшой глубине порядка 200–400 м от поверхности земли. Термин «малоглубинная сейсморазведка» условно охватывает интервал глубин до 500–700 м, что отличает ее от инженерной и нефтяной сейсморазведки и подразумевает характерные для этого интервала глубин особенности.

Полевые материалы являются основой всего процесса сейсморазведочных исследований, поэтому требования к их качеству должны быть высокими. Качество материалов приобретает особую важность, если обработанные полевые данные в процессе интерпретации подвергают анализу с привлечением сложных математических вычислений (атрибутивный анализ, сейсмическая инверсия и др.) [1–3].

При проведении малоглубинной сейсморазведки в условиях сильного затухания полезного сигнала в неконсолидированной верхней части разреза (ВЧР) [4–6] и его интерференции с поверхностными волнами, а также при слабой акустической жесткости границ внутри соляной толщи [7] получить

падающей массы) и импульсный пороховой источник (работающий на энергии пороховых газов патрона 12-го калибра) [13].

При полевых работах применяют цифровую телеметрическую сейсмостанцию в связке с вертикальными геофонами GS-20DX. Система наблюдения 64-канальная, переменная, асимметричная. Шаг пунктов возбуждения и приема обычно составляет 8 м. При регистрации осуществляют подавление поверхностных волн путем группирования сейсмоприемников с неизменными параметрами группы, с числом приемников в группе, равным 5, шагом элементов группы 4 м и базой группирования 16 м.

Описанная выше технология проведения полевых работ и система наблюдений являются обоснованными и в целом удовлетворяют требованиям, предъявляемым к подобным работам в рассматриваемых геологических условиях. Однако, если частотный диапазон сигнала, генерируемого источником, является вполне приемлемым, его энергии для надежного решения поставленных геологических задач хватает далеко не всегда.

Группирование и поверхностные условия. Установлено [14, 15], что группирование зачастую может негативно влиять на регистрируемый сигнал, а именно: сужается частотный диапазон регистрируемого сигнала; снижается эффективность подавления волн-помех из-за использования одинаковых параметров группирования для различных участков.

Для каждого участка с более или менее выдержанным рельефом необходимо проведение опытных исследований по выбору параметров группы (размеров, ориентации и шага между датчиками), иначе велика вероятность получения неудовлетворительного результата только за счет некорректных параметров группирования.

Для снижения негативного влияния группирования предлагается использование одиночных сейсмоприемников, что позволит сохранить максимально широкий частотный диапазон регистрируемого сигнала. Снижение чувствительности одиночных геофонов по сравнению с группой компенсируется применением более чувствительных приемников, например GS-ONE, чувствительность которых в 6 раз выше, чем применяемых GS-20DX. При этом для расширения возможностей по подавлению поверхностных волн необходимо уменьшить шаг пунктов приема до 2–5 м.

На рис. 1 представлены типичные сейсмограммы общего пункта возбуждения (ОПВ), полученные на одном профиле с использованием импульсного порохового источника. Сейсмограммы, находящиеся друг от друга всего в 235 м, могут значительно отличаться (см. рис. 1, а, в). На сейсмограмме после предварительной обработки (см. рис. 1, б) хорошо различимы оси синфазности отраженных волн на временах $t_0 = 150\text{--}550$ мс, что соответствует целевому интервалу изучаемого разреза. На данных, полученных в 235 м от тех, что представлены на рис. 1, б, отражения отсутствуют (см. рис. 1, г).

Разница в получаемых данных вызвана изменением поверхностных условий и различиями в геологическом строении ВЧР. Даже при том, что на части сейсмограмм, полученных с применением импульсного порохового источника, можно выделить отражения, отношение сигнал/шум и в целом качество записи оставляют желать лучшего (см. рис. 1, а, в). Причинами низкого качества

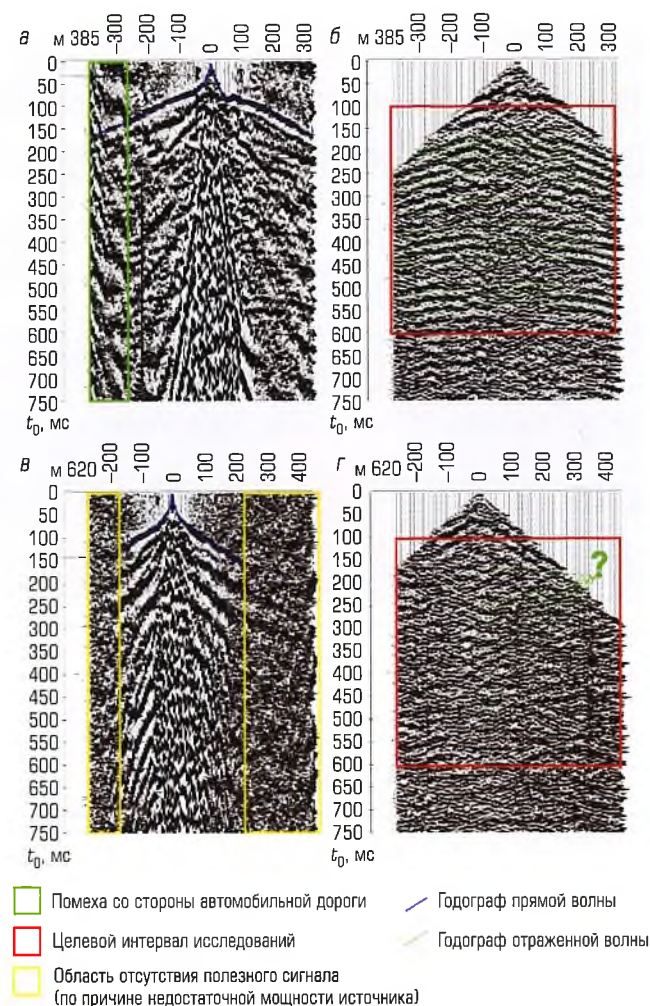


Рис. 1. Сейсмограммы, записанные с импульсным пороховым источником на расстоянии 235 м друг от друга:
а, в — полевые сейсмограммы после амплитудной регулировки;
б, г — эти же сейсмограммы после первичной обработки

записей являются недостаточная энергия источника, техногенные и случайные шумы, которые вносят искажения и в без того слабый сигнал. Исходные материалы подобного качества полностью исключают проведение динамической интерпретации.

Соотношение сигнал/шум. В нефтяной сейсморазведке, своеобразном эталоне, у которого малоглубинная сейсморазведка позаимствовала все технологические наработки, соотношение сигнал/шум оценивают в двух окнах: на уровне целевого горизонта («сигнал») и до первых вступлений («микросейсмы»). Приемлемым для решения структурных задач является соотношение сигнал/шум не менее 5, для решения динамических задач — не менее 10. Если сигнал отсутствует на исходных сейсмограммах, то его не стоит ожидать и на окончательных временных разрезах [15, 16].

В малоглубинной сейсморазведке это утверждение особенно актуально, ведь энергии импульсного порохового источника не всегда достаточно даже для регистрации первых вступлений и получения четких отражений от наиболее контрастных

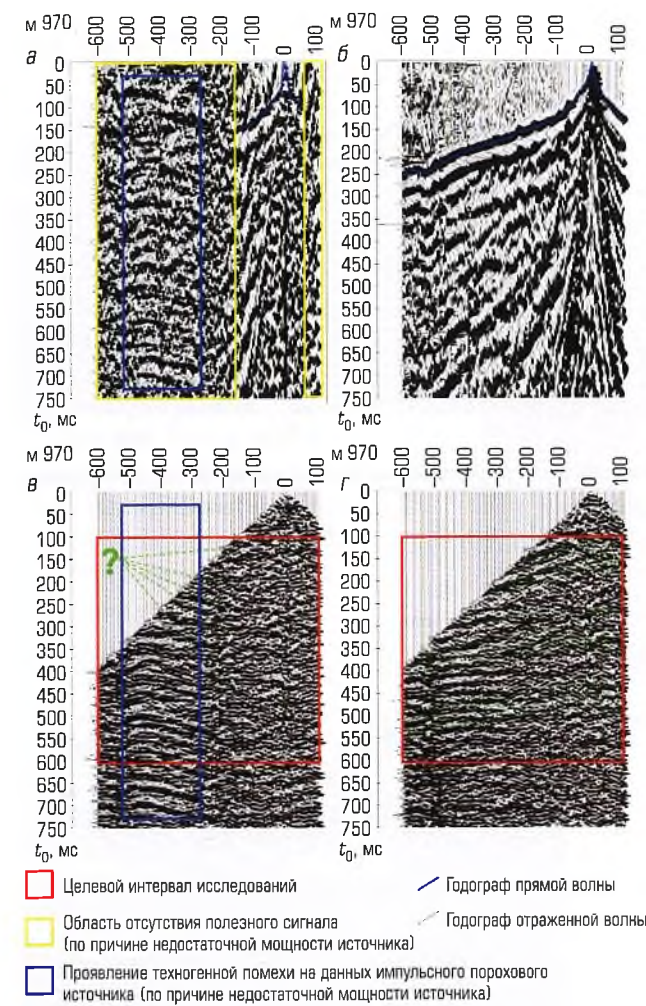


Рис. 2. Сравнение сейсмограмм:

а, в — сейсмограммы до и после предварительной обработки, записанные с импульсным источником; б, г — они же, со взрывным источником

границ — кровли солей и кровли глинисто-ангидритовой толщи (кГАТ). В таких условиях возможность надежного и повсеместного получения отражений от целевых отражающих границ, которые имеют гораздо меньшую акустическую жесткость, чем кГАТ, остается под вопросом [17]. В связи с описанной ситуацией выполнены сравнительные исследования импульсного порохового и взрывного источников.

Сравнение источников. Для сравнения источников были проведены опытно-исследовательские работы на одном из участков ВКМС с использованием импульсного порохового и взрывного источников. В качестве взрывного источника использовали взрывчатое вещество аммонит 6ЖВ, патронированный по 200 г, с электродетонатором. Заряд погружали на забой скважины глубиной 1,5 м, после чего ствол скважины тампонировали.

На рис. 2 приведены полевые сейсмограммы, записанные на одном пикете с помощью импульсного порохового (см. рис. 2, а) и взрывного (см. рис. 2, б) источников. На исходных сейсмограммах видно, что при регистрации с использованием импульсного

порохового источника видимая частота сигнала несколько выше, чем при применении взрывного.

В связи с недостаточной мощностью импульсного порохового источника при данных поверхностных условиях первые вступления зарегистрированы только на 1/3 части максимального удаления, на остальной части расстановки зафиксированы только техногенный и случайный шум (микросейсмы). Годографы отраженных волн отсутствуют по всей длине записи. На материале, полученном с использованием взрывного источника, хорошо прослеживаются первые вступления по всей длине расстановки. После предварительной обработки, включающей полосовую фильтрацию и амплитудную коррекцию, на записях проявляются протяженные оси синфазности, ассоциируемые с отражениями от акустически жестких границ.

Выполним оценку энергии взрыва. Удельная энергия взрывного разложения тротила (тринитротолуола) в мировой практике — 4184 Дж/г, масса зарядов — 200 г, тротильный эквивалент аммонала — 0,99. Таким образом, энергия взрыва в одиночной скважине оценивается как $4184 \text{ Дж/г} \cdot 200 \text{ г} \cdot 0,99 = 828432 \text{ Дж}$, т. е. примерно 828 кДж. Для сравнения: энергия взрыва 5 г пороха при тротильном эквиваленте 0,6 составляет: $4184 \text{ Дж/г} \times 5 \text{ г} \cdot 0,6 = 12552 \text{ Дж}$, или примерно 12 кДж, что в 66 раз меньше энергии взрыва 200 г аммонала.

Столь высокая энергия взрыва может приводить к выходу регистрируемого сигнала за динамический диапазон в случае некорректного выбора параметров аппаратного усиления. Для предотвращения записи бракованного материала проведены опытные исследования по выбору аппаратного усиления. Для выбора параметров на каждом исследуемом участке регистрируют сигнал на нескольких пунктах возбуждения с усилением 0, 12, 24 и 36 дБ. При усилении 24 и 36 дБ в центральной части сейсмограммы на большом числе трасс наблюдается выход сигнала за динамический диапазон, т. е. нарушается гладкая форма записи, появляются так называемые ступеньки. Эти искажения негативно влияют на форму полезного сигнала, поэтому использование усиления более 12 дБ при массе заряда ВВ 200 г нежелательно.

Для выбора массы заряда и глубины его заложения выполнены испытания, в ходе которых записаны сейсмограммы с зарядами 200, 600 и 1000 г на глубинах 1,5 и 4 м. Как показали результаты испытаний, значительной разницы в отношении сигнал/шум и амплитудном спектре на полученных записях не отмечено. Поэтому для проведения малоглубинных сейсморазведочных исследований со взрывным источником рекомендуется использовать заряды массой не более 200 г.

Результаты исследований, проведенных на разных участках ВКМС, указывают на то, что даже взрывной источник в некоторых случаях не позволяет получать кондиционный материал в целевом интервале соляной толщи. Это связано с поверхностными условиями, мощностью и строением четвертичных отложений (Q). Четвертичная система на ВКМС представлена комплексом пород различного генезиса переменной мощности, находящейся в различных соотношениях. Средняя мощность Q, по данным выборки из 911 скважин, колеблется от 5 до 15 м, повышенная — от 15 до 40 м, аномально высокая — свыше 40 м [18].

Скорость продольной волны в четвертичных отложениях изменяется от 300 до 1500 м/с. В этом интервале возникают высокоамплитудные низкочастотные поверхностные волны, интерферирующие с целевыми отражениями. Эффект интерференции элементарных отражений описан более подробно в результатах сейсмического моделирования [7].

При погружении зарядов на большую глубину (более 5 м) и при нахождении источника в низинах (оврагах, долинах рек и ручьев) качество регистрируемого материала повышается. На рис. 3

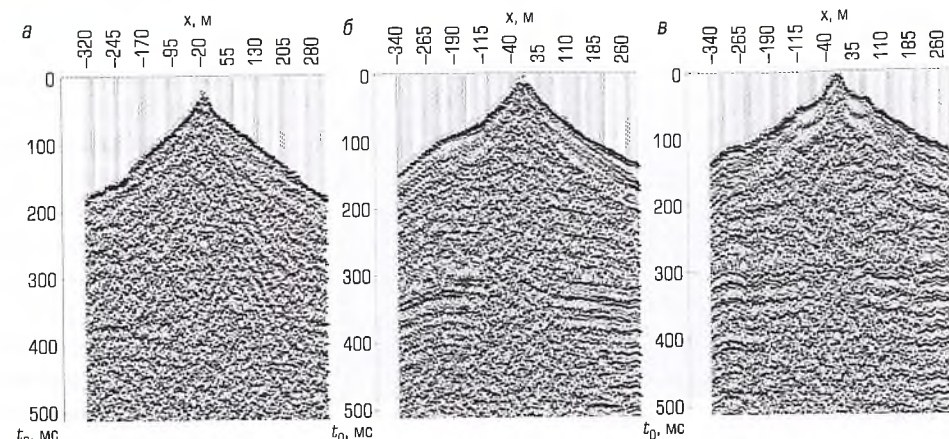


Рис. 3. Сейсмограммы, записанные при расположении пунктов возбуждения в различных местах одного и того же профиля:

а — на возвышенности; б — в низине; в — в долине реки

приведен пример сейсмограмм, находящихся на одном участке с различными высотными отметками пунктов возбуждения. На сейсмограммах видно, что на возвышенностях, где мощность четвертичных отложений наибольшая, оси синфазности менее контрастные (см. рис. 3, а), чем на сейсмограммах, записанных в низинах и долинах рек (см. рис. 3, б, в).

Таким образом, наиболее остро стоит вопрос о минимизации влияния верхней части разреза и зоны малых скоростей. Основной выход — погружение зарядов на большую глубину либо проведение исследований в низинах и долинах рек, что на практике возможно далеко не всегда.

Оценка скоростей. Известно [14], что при других равных условиях случайная ошибка оценки эффективной скорости обратно пропорциональна квадрату длины годографа. Удовлетворительные по точности оценки скоростей можно получить лишь по достаточно протяженным годографам, особенно в условиях высокоскоростного разреза, где отраженные волны имеют сравнительно небольшие приращения времени с увеличением дистанции. Этот вывод справедлив и для определения $V_{огт}$ путем подбора по сейсмограммам общей глубинной точки (ОГТ) с помощью регулируемого криволинейного суммирования трасс. При отсутствии данных акустического каротажа (АК) и вертикального сейсмического профилирования (ВСП) для получения высокоточных оценок эффективных скоростей рекомендуется выполнение «скоростных» зондирований общей глубинной площадки.

В качестве примера приведем результаты анализа скоростей (рис. 4), из которого следует, что для одного и того же отражения можно подобрать удовлетворительно совпадающий теоретический годограф со скоростями в интервале от 2500 до 3500 м/с. В глубинном масштабе это соответствует разбросу возможных оценок глубины отражающей границы с 460 до 660 м, и это для самого сильного отражающего горизонта. Для слабых и зашумленных отражений, интерферирующих с другими, как показали наши исследования, этот разброс может быть еще больше.

Подобная неоднозначность может ввести интерпретатора в заблуждение, например положение пласта маркирующих гли-

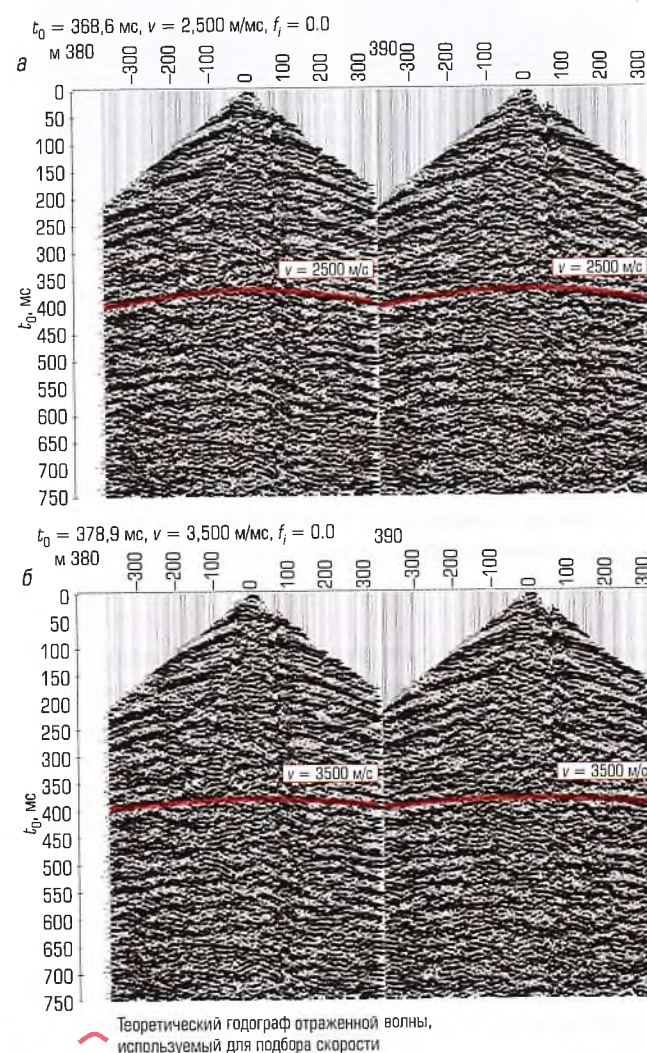


Рис. 4. Результаты скоростного анализа для одних и тех же сейсмограмм:

а — скорость по годографу 2500 м/с; б — скорость 3500 м/с. В обоих случаях теоретический годограф удовлетворительно совпадает с осью синфазности отраженной волны

(МГ) по результатам интерпретации может оказаться на глубине, соответствующей реальному положению кровли глинисто-ангидритовой толщи. Для корректной привязки отражающих горизонтов, помимо «скоростных» зондирований, необходимо использовать данные АК и ВСП. В частности, данные АК следует использовать для сейсмического моделирования и построения трасс однократных отражений.

Учет ВЧР. Важную роль в подготовке зарегистрированного сейсмического материала играет учет верхней части разреза. Для этого требуются высокоточная топографо-геодезическая съемка высотных отметок и координат пунктов возбуждения (ПВ) и приема (ППр) и надежная регистрация первых вступлений по всей длине расстановки для изучения скоростей в ВЧР. Регистрация первых вступлений при использовании импульсного порохового источника возможна только при благоприятных поверхностных условиях, в остальных случаях использовать его не рекомендуется. Недочет ВЧР приводит к серьезным ошибкам на этапе обработки и интерпретации сейсморазведочных данных, в том числе к отсутствию корреляции и некорректной привязке отражающих горизонтов.

На рис. 5 показаны два первичных разреза, полученные с применением импульсного порохового (см. рис. б) и взрывного (см. рис. в) источников.

Установлено, что при смене поверхностных условий (см. рис. 5, а) полностью пропадают отражения по данным импульсного порохового источника, по результатам же взрывного источника целевые отражения прослеживаются на всю длину исследуемого профиля.

Выводы

По результатам проведенных опытно-исследовательских работ можно сделать следующие выводы.

Во-первых, сильное изменение поверхностных условий и строения ВЧР негативно влияет на регистрируемый сигнал, особенно при использовании группирования датчиков с одинаковыми параметрами группы на всех участках. Для каждого района с более-менее выдержанным рельефом необходимо проведение предварительных опытных исследований по выбору параметров группы (размеров, ориентации и шага между датчиками), иначе велика вероятность получения неудовлетворительного результата только за счет группирования. Предпочтительным же

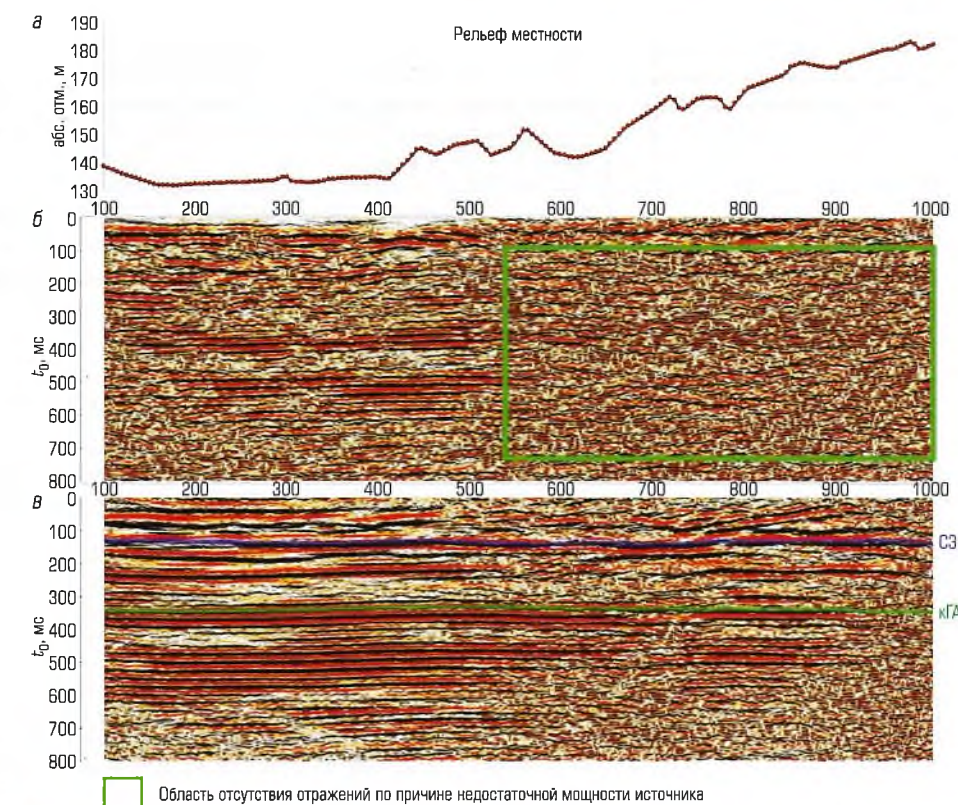


Рис. 5. Сравнение первичных временных разрезов:

а — рельеф местности; б, в — с использованием импульсного порохового и взрывного источников соответственно

является использование одиночных сейсмоприемников с одновременным уменьшением шага пунктов приема.

Во-вторых, частотный диапазон импульсного порохового источника можно считать приемлемым, однако энергии для надежного решения геологических задач хватает только при крайне благоприятных поверхностных условиях и строении ВЧР, что на ВКМС встречается редко. По результатам проведенных исследований предлагается использовать взрывной источник упругих колебаний. Установлен значительный прирост амплитуды отражений от кровли соляной залежи, пласта МГ и кГАТ (подошвы соляной толщи). Как следствие, соотношение сигнал/шум у взрывного источника в разы выше, чем у импульсного порохового, что положительно влияет на точность скоростного анализа, и, как следствие, на точность глубинной привязки и позволяет значительно повысить объективность результатов интерпретации. Для проведения малоглубинных сейсморазведочных исследований со взрывным источником рекомендуется использовать заряды массой не более 200 г. При погружении зарядов на большую глубину и при нахождении источника в низинах (оврагах, долинах рек и ручьев) качество регистрируемого материала повышается.

В-третьих, важную роль в обработке регистрируемого материала играет тщательный учет ВЧР. Для этого требуются высокоточная топографо-геодезическая съемка высотных отметок и координат ПВ, ППр, а также надежная регистрация первых вступлений по всей длине расстановки.

Проведенные исследования в очередной раз доказали, что полевые работы — это фундамент, на котором строится весь процесс сейсморазведочных работ. В малоглубинной же сейсморазведке качество полевых работ сказывается на окончательных результатах особенно критично в силу особенностей волнового поля. Поэтому очень важно регистрировать интенсивный и стабильный сигнал с применением плотной и протяженной расстановки датчиков, соблюдать высокую кратность наблюдений, проводить высокоточную топографо-геодезическую съемку профилей и выполнять привязку временных разрезов к скважинным

данным. Недоработки на любом из этапов могут привести к критическим ошибкам и получению некондиционных данных.

Для успешного проведения разведочных работ на ВКМС авторы статьи предлагают применять поверхностную сейсморазведку методом отраженных волн общей глубинной точки (МОВ ОГТ) со взрывным источником, с обязательной привязкой к данным АК и ВСП, а эксплуатационную разведку осуществлять во внутренних точках среды способом шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений (ПВРО) [19, 20].

Библиографический список

1. Ампилов Ю. П. От сейсмической интерпретации к моделированию и оценке месторождений нефти и газа. — М.: Спектр, 2008. — 383 с.
2. Кашников Ю. А., Ермашов А. О., Ефимов А. А. Геолого-геомеханическая модель участка Верхнекамского калийного месторождения // Записки Горного института. 2019. Т. 237. С. 259–267.
3. Kamnev E. N., Morozov V. N., Tatarinov V. N., Kaftan V. I. Geodynamic aspects of investigations in underground research laboratory (Nizhnekansk Massif) // Eurasian Mining. 2018. No. 2. P. 11–14. DOI: 10.17580/em.2018.02.03
4. Спасский Б. А. Учет верхней части разреза в сейсморазведке. — Иркутск: Изд-во ИГУ, 1990. — 181 с.
5. Monk D. J. Survey Design and Seismic Acquisition for Land, Marine, and In-between in Light of New Technology and Techniques: 2020 Distinguished Instructor Short Course. Distinguished Instructor Series, No. 23. — Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2020. — 214 p.
6. Qing-Zhong Li. High-resolution Seismic Exploration. — Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2017. — 320 p.
7. Царев Р. И. Обоснование выбора модели геологической среды при решении прямой задачи сейсморазведки МОВ ОГТ на Верхнекамском месторождении солей // Геофизика. 2018. № 5. С. 18–23.
8. Jackson M. P. A., Hudec M. R. Salt Tectonics. Principles and Practice. — Cambridge: Cambridge University Press, 2017. — 498 p.
9. Голубев Б. М. Строение соляной толщи Верхнекамского месторождения: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. — Пермь, 1972. — 31 с.
10. Кудряшов А. И. Верхнекамское месторождение солей. — 2-е изд., перераб. — М.: Эpsilon Плюс, 2013. — 368 с.

«GORNYI ZHURNAL», 2021, № 4, pp. 17–23
DOI: 10.17580/gzh.2021.04.01

Technology and specificity of surface seismic in the Upper Kama Potash Salt Deposit

Information about authors

R. I. Tsarev¹, Senior Researcher, roman.tsarev@uralkali.com
A. A. Zhukov¹, Head of Laboratory of Geophysics, Candidate of Engineering Sciences
A. M. Prigara¹, Leading Researcher, Candidate of Engineering Sciences
D. N. Shkuratskiy¹, CEO, Candidate of Engineering Sciences
¹VNII Galurgii, Perm, Russia

Abstract

Exploration surveys at the Upper Kama Potash Salt Deposit widely use the surface seismic method by the common reflection point at depth. Based on the implemented research, a technology is developed for shallow seismic using an explosion source of elastic vibrations for the purposes of geological exploration. The research involved the comparative analysis of the main elastic wave sources used in the shallow seismic. It is highlighted that it is important to consider carefully the near-surface section structure and the surface relief. The accuracy of the velocity analysis procedure in the high-velocity section of salt strata is analyzed. The specificity of acquisition in the shallow seismic with an explosion source is discussed. The actual test data show a considerable increment in the energy of reflections from the roof and floor of the salt strata, which, in the absence of a priori geological information and geophysical logging data (acoustic logging and vertical seismic profiling), affects the velocity analysis

precision and, as a consequence, the accuracy of reflection identification at depth. It is found that the explosion source has a much higher signal/noise ratio as against a pulse cartridge, which greatly improves neutrality of interpretation results. The use of a pulse cartridge in the surveys in the depth interval of 200–400 m is only justified when the surface conditions are perfect and the low velocity layer is not thick.

Keywords: Upper Kama Potash Salt Deposit, surface seismic, seismic reflection method, pulse cartridge, explosion energy, low velocity layer, acoustic impedance.

References

1. Ampilov Yu. P. From seismic interpretation to modeling and assessment of oil and gas reservoirs. Moscow: Spektr, 2008. 383 p.
2. Kashnikov Yu. A., Ermashov A. O., Efimov A. A. Geological and geomechanical model of the Verkhnekamsk potash deposit site. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 237. pp. 259–267.
3. Kamnev E. N., Morozov V. N., Tatarinov V. N., Kaftan V. I. Geodynamic aspects of investigations in underground research laboratory (Nizhnekansk Massif). *Eurasian Mining*. 2018. No. 2. pp. 11–14. DOI: 10.17580/em.2018.02.03
4. Spasskiy B. A. Accounting for near-surface section in seismic exploration. *Irkutsk: Izdatelstvo IGU*, 1990. 181 p.
5. Monk D. J. Survey Design and Seismic Acquisition for Land, Marine, and In-between in Light of New Technology and Techniques: 2020 Distinguished Instructor Short Course. Distinguished Instructor Series, No. 23. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2020. 214 p.
6. Qing-Zhong Li. High-Resolution Seismic Exploration. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2017. 320 p.

7. Tsarev R. I. The rationale for selecting the geological environment model in the seismic CDP survey forward solution on the Verkhnekamskoye salt deposit. *Geofizika*. 2018. No. 5. pp. 18–23.
8. Jackson M. P. A., Hudec M. R. Salt Tectonics. Principles and Practice. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 498 p.
9. Golubev B. M. Structure of salt strata in the Upper Kama deposit: thesis of Dissertation ... of Candidate of Geology-Mineralogical Sciences. Perm, 1972. 31 p.
10. Kudryashov A. I. Verkhnekamskoye salt deposit. 2nd enlarged edition. Moscow: Epsilon Plus, 2013. 368 p.
11. Ivanov A. A., Voronova M. L. Upper Kama Potash Salt Deposit: Stratigraphy, mineralogy and petrography, tectonics, genesis. *Transactions of the All-Union Scientific Research Geological Institute. New Series*. Leningrad: Nedra, 1975. Vol. 232. 217 p.
12. Sanfirov I. A. Mine objectives of seismic exploration by the common depth point. Yekaterinburg: Izdatelstvo Uro RAN, 1996. 165 p.
13. Sanfirov I. A., Yaroslavtsev A. G., Akhmatov A. E. et al. Pulsed powder elastic wave source. Patent RF, No. 2439620. Applied: 15.06.2010. Published: 10.01.2012. Bulletin No. 1.
14. Boganik G. N., Gurvich I. I. Seismic exploration. Tver: AIS, 2006. 744 p.
15. Cherepovskiy A. V. Next technological level of surface seismic. 2nd revised edition. Moscow: EAGE Geomodel LLC, 2017. 252 p.
16. Buryak S. V., Vakulenko S. A. Reliability of observed reflection boundaries in stacked sections of engineering method of the common reflection point at depth. *The 8th EAGE International Scientific and Practical Conference and Exhibition on Engineering and Mining Geophysics 2012*. Gelendzhik, 2012. DOI: 10.3997/2214-4609.20146038
17. Dondurur D. Acquisition and Processing of Marine Seismic Data. Amsterdam: Elsevier, 2018. 606 p.
18. Kharitonov T. V., Oborina E. V., Popov A. G. et al. Generation of composite geological and hydrogeological maps of the Upper Kama Potash Salt Deposit, Scale 1:100 000. Perm, 2002. Book 1.
19. Zhukov A. A., Prigara A. M., Tsarev R. I., Pushkareva I. Yu. Method of mine seismic survey for studying geological structure features of Verkhnekamskoye salt deposit. *GIAB*. 2019. No. 4. pp. 121–136.
20. Tsarev R. I. Capacities of S-wave exploration in mines. *Engineering and Mining Geophysics 2019: Proceedings of the 15th Conference and Exhibition*. Gelendzhik, 2019. Vol. 2019. DOI: 10.3997/2214-4609.201901765

УДК 550.834

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ РАЗВЕДКИ И ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ГОРНЫХ РАБОТ С ПОМОЩЬЮ ШАХТНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ СПОСОБОМ ПВРО



А. М. ПРИГАРА¹,
ведущий научный сотрудник,
канд. техн. наук



А. А. ЖУКОВ¹,
заведующий лабораторией
геофизики, канд. техн. наук,
Aleksandr.Zhukov@uralkali.com



Р. И. ЦАРЕВ¹,
старший научный сотрудник



Ю. А. КАШНИКОВ²,
зав. кафедрой, д-р техн. наук

¹АО «ВНИИ Галургии», Пермь, Россия

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Введение

Эксплуатационную разведку на месторождениях полезных ископаемых проводят с целью планомерного систематического получения достоверных исходных данных для планирования горных работ, а также контроля за полнотой и качеством отработки запасов. Ее осуществляют в течение всего периода разработки месторождения. Важную роль при этом играют геофизические методы, поскольку они позволяют получать практически

Оценены возможности способа шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений для решения задач эксплуатационной разведки на примере Верхнекамского месторождения солей. Внедрение разработанного способа в практику эксплуатационной разведки позволяет существенно повысить ее эффективность. С учетом схожести условий подземной и открытой добычи полезных ископаемых с позиций доступа к плотным горным породам аналогичных результатов следует ожидать и в условиях карьеров.

Ключевые слова: сейсморазведка, поперечные волны, разделение отражений, сейсмогеологическая модель, безопасность рудников, подсчет запасов, геомеханические параметры.

DOI: 10.17580/gzh.2021.04.02

непрерывную информацию о геологическом строении обрабатываемых участков [1–7]. На месторождениях солей в процессе эксплуатационной разведки, помимо уточнения пространственного положения, мощности и строения обрабатываемых пластов, обязательно следует получать сведения о строении и свойствах водозащитной толщи [8]. Строение и состояние последней определяют безопасность действующих рудников. При этом, как считают ряд авторов, «при фактически применяемых методах разведки соляных месторождений получить необходимые данные о качественных и количественных параметрах аномальных зон практически невозможно» [9].

Для исправления этой ситуации авторами статьи разработан способ сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений (ПВРО) [10], обеспечивающий построение сейсмогеологической модели среды с высокой детальностью и достоверностью. Теоретические расчеты, опытные работы в реальных условиях и геологическая проверка подтвердили большой потенциал способа при решении геологоразведочных и геотехнических задач

[11, 12]. Для более глубокого понимания возможностей способа он был опробован на ряде участков Верхнекамского месторождения солей, результаты опробования рассматриваются ниже.

Методика выполнения работ

Работы выполнены способом сейсморазведки ПВРО, который базируется на широко известной методике общей глубинной точки (МОГТ), которая, в свою очередь, основана на методе отраженных волн (МОВ) [13]. Основные особенности способа заключаются в следующем [10]:

- для исследований используют поперечные волны;
- для возбуждения упругих колебаний применяют источник типа «сосредоточенная сила», для которого направленность поперечных волн в условиях горных выработок близка к перпендикулярно по отношению к направлению ударов;
- сейсмоприемники выбирают таким образом, чтобы их ось чувствительности была параллельна направлению воздействия источника упругих волн, т. е. для исследований в горизонтальной плоскости применяют вертикальные удары и вертикально ориентированные сейсмоприемники и, наоборот, для исследований в вертикальной плоскости используют горизонтальные удары и горизонтально ориентированные сейсмоприемники;
- для разделения отражений, приходящих к линии приема из разных полупространств, используют двухэтапный подход: на полевом этапе наблюдения выполняют по двум параллельным линиям, разнесенным друг от друга на расстояние, равное четверти длины волны, а на камеральном этапе полученные два массива данных позволяют разделить отражения с помощью специально разработанной процедуры.

Благодаря использованию поперечных волн, обладающих значительно большей амплитудой в условиях горных выработок, чем продольные волны, и разработанной авторами процедуры разделения отражений качество и детальность получаемых результатов выведены на новый, недостижимый ранее уровень.

Результаты исследования

Для определения практических возможностей способа ПВРО по решению задач эксплуатационной разведки были выполнены работы на нескольких участках Верхнекамского месторождения солей (ВКМС). Работы проводили с целью получения с помощью способа ПВРО следующих данных:

- мощность и состав водозащитной толщи (ВЗТ), от которой критически

зависит безопасность действующих рудников, наличие и характер в ней внутрисоляных деформаций (ВСД);

- физико-механические свойства (ФМС) пород для планирования горных работ.

Рассмотрим один из наиболее показательных результатов, полученных с помощью способа ПВРО в горной выработке на ВКМС, расположенной на склоне поднятия перпендикулярно его оси. Известно [14], что на поднятиях залегание солей осложняется наличием интенсивной складчатости, растворением солей в верхней части поднятия и уменьшением мощности ВЗТ. Кроме того, при обеспечении некоторой критической скорости поднятия солей может быть достигнут предел текучести, и появляется высокая вероятность возникновения в них трещин, что резко повышает риски при проходке горных выработок на участках поднятий. Все указанные явления оказались сконцентрированными на одном разрезе (рис. 1). До выполнения здесь работ способом ПВРО на основе результатов бурения и проходки горной выработки была построена геологическая модель (см. рис. 1, а), которая претерпела значительные изменения по результатам геофизических исследований (см. рис. 1, б).

Начало профиля находится практически на оси поднятия, в связи с чем от пикета (ПК) 0 до ПК 1300 верхние пласты

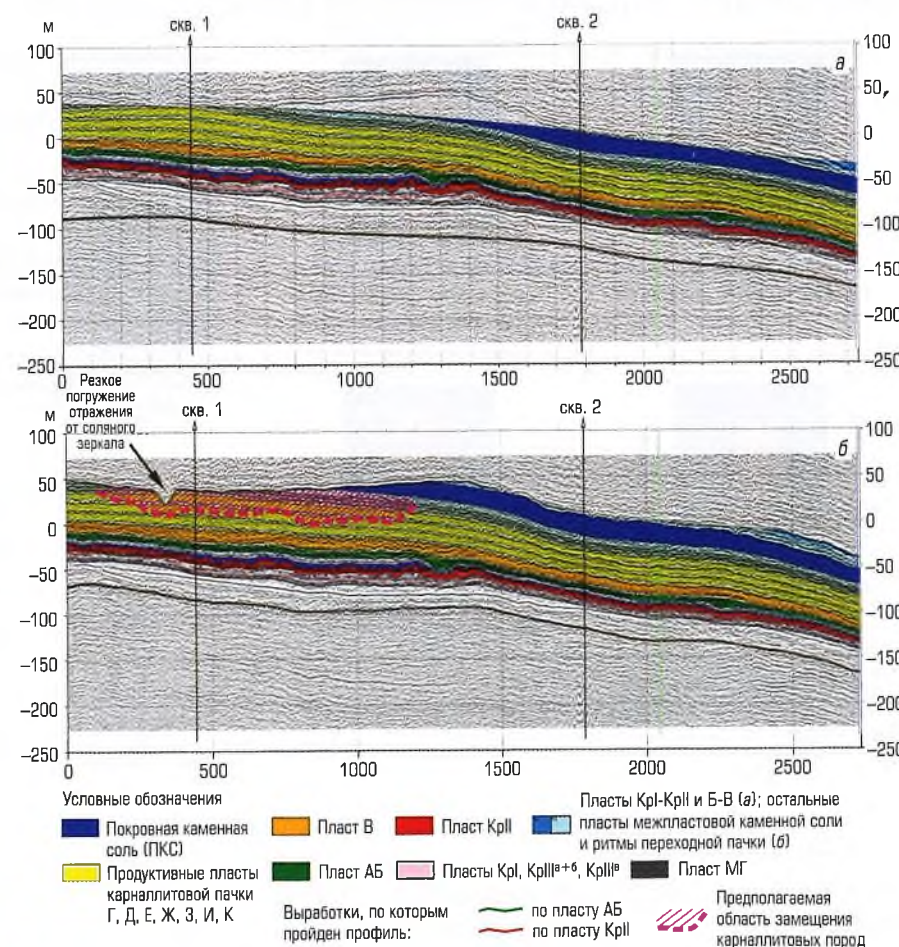


Рис. 1. Сейсмический разрез, полученный способом ПВРО с наложением:

а — исходной геологической модели, полученной по скважинным данным;
б — геологической модели после коррекции по данным сейсморазведки

соли вплоть до верхних карналлитовых пластов полностью растворены, поэтому мощность ВЗТ там значительно меньше, чем в конце профиля. Кроме того, обращают на себя внимание изменения в характере складчатости внутри карналлитовой и сильвинитовой пачек на протяжении профиля — до ПК 1600 она весьма интенсивная, амплитуда складок достигает 10 м и более, а после ПК 1600 складки становятся едва различимыми, за исключением отдельных случаев (рис. 2). Данное явление связано с интенсивностью стекания солей: там, где оно было наиболее активным, сформировалась и наиболее интенсивная складчатость.

Особого внимания заслуживает резкое локальное погружение отражения от «соляного зеркала» (СЗ) — самого верхнего по разрезу слоя соли, относительно которого определяют мощность ВЗТ (см. рис. 1, б, рис. 3, ПК 350). Наличие указанного погружения вызвано эрозийным врезом, сформированным пресными водами, получившими доступ к солям в результате их интенсивного поднятия. В настоящее время обнаруженный эрозийный врез не представляет опасности для рудника, поскольку мощность ВЗТ ниже него остается достаточной — более 50 м, а очистные работы на данном участке не ведут. Однако важно понимать, что это первый в истории ВКМС надежно закартированный эрозийный врез такого масштаба — не настолько обширный, чтобы быть обнаруженным бурением, но при этом достаточно значительный, чтобы представлять потенциальную угрозу для рудников. Судя по тому, что на ВКМС существуют и другие участки со схожим геологическим строением, врезы подобного масштаба можно ожидать и на них. Ранее их зафиксировать не удавалось ввиду недостаточной эффективности применяемых методик разведки [9].

Еще одна особенность, зафиксированная в результате выполнения работ способом ПВРО на данном участке, — потеря корреляции отражений в интервале верхних карналлитовых пластов в области рассмотренного эрозийного вреза (см. рис. 1, б, рис. 3). Судя по всему, он способствовал проникновению рассолов внутрь соляной толщи, в результате чего произошло замещение карналлитов на значительной площади. Участки замещения характеризуются высокой вероятностью газодинамических явлений (ГДЯ), в связи с чем возможность выделения таких зон с помощью способа ПВРО является весьма актуальной.

Таким образом, по результатам геофизических работ пересмотрена гипсометрия СЗ, причем изменения его отметок составили до 30 м; как следствие, уточнена мощность ВЗТ, добавилась информация об эрозийном врезе и предполагаемой зоне замещения карналлитов (см. рис. 1, б). Обобщение геологической и геофизической информации по профилям общей длиной более 10 км, полученной на рассматриваемом участке, обусловило значительные корректировки исходной геологической модели, построенной изначально исключительно по данным бурения и проходки горных выработок. Указанные изменения позволили выполнить обоснованную корректировку планов горных работ.

Следующий пример получения новой геологической информации на основе способа ПВРО касается изучения особенностей строения ПдКС. На одном из профилей шахтной сейсморазведки был обнаружен участок, где поведение пласта МГ вызвало сомнения. Ранее взгляды на его гипсометрию базировались исключительно

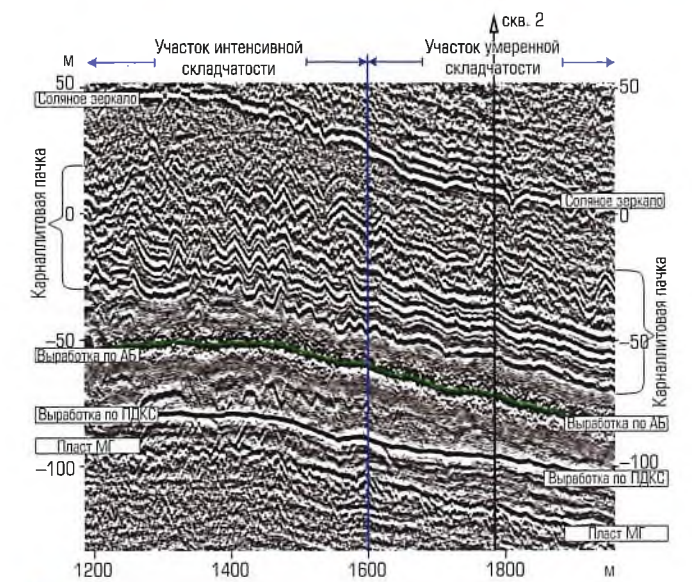


Рис. 2. Укрупненный вид сейсмического разреза в области смены характера складчатости

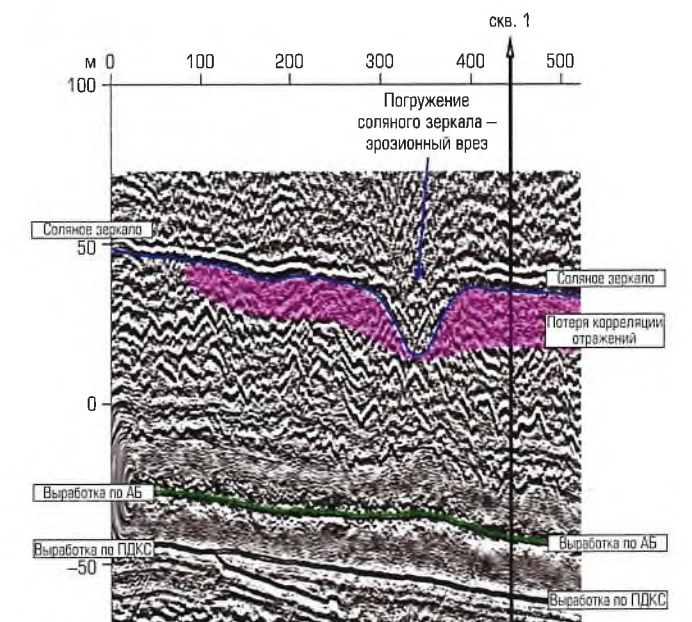


Рис. 3. Укрупненный сейсмический разрез в области эрозийного вреза и потери корреляции отражений от карналлитовых пластов

на единичных пересечениях с горными выработками и скважинами. Поэтому общепринятым считалось мнение, что пласт МГ ведет себя выдержанно, без резких изменений отметок залегания. Однако в рассматриваемом случае способом ПВРО была выявлена складка по пласту МГ с амплитудой порядка 30 м (рис. 4, а). Поскольку на разрезе, помимо отражений от геологических границ, отмечалось отражение еще и от выработки в ПдКС, удалось изучить зарисовки ее стенок. Зарисовки подтвердили корректность сейсмического разреза: в непосредственной близости от забоя выработки ею был вскрыт пласт МГ с гипсометрией, соответствующей отражению на сейсмическом разрезе (см. рис. 4, б).

Помимо определения детального строения и выделения его неоднородностей, предложенный способ шахтной сейсморазведки ПВРО позволяет получить распределение ФМС горного массива, информация о которых крайне необходима на этапе эксплуатации месторождения для расчета параметров системы разработки и оценки возможности развития водопроводящих трещин. Известно, что существует функциональная связь между ФМС и скоростями распространения упругих свойств в среде, что является предпосылкой для построения детальной модели распределения физико-механических свойств [15]. Ранее удалось на образцах керна получить устойчивые корреляционные зависимости между скоростью продольной и поперечной волн и такими параметрами, как предел прочности на одноосное сжатие, модуль упругости, угол внутреннего трения, сцепление, которые в последующем были откорректированы по данным широкополосного акустического каротажа, проведенного в скважинах в месте отбора керна [16]. Общая методика решения задачи определения ФМС массива пород и последующего решения задачи геомеханики на примере одного из рудников ПАО «Уралкалий» сводится к следующему.

1. Проведение шахтных сейсморазведочных исследований способом ПВРО и обработка данных геофизических исследований в скважине, располагающейся в районе штрека, с целью определения динамических ФМС пород ВЗТ и продуктивной толщи.

2. Определение динамических, а затем (по имеющимся формулам) статических ФМС пород ВЗТ в районе исследуемых панелей рудника на основе обработки материалов шахтных сейсморазведочных исследований.

3. Создание геолого-геомеханической модели ВЗТ и продуктивной толщи района исследуемых панелей в специализированном программном обеспечении и выделение зон в ВЗТ и продуктивной толще с различными физико-механическими свойствами. Отметим, что данную методику широко используют при создании геолого-механических моделей продуктивных объектов нефтегазовых месторождений [17].

4. Оценка текущего и перспективного состояния ВЗТ в районе исследуемых панелей рудника методом математического моделирования.

В результате выполнения шахтных сейсморазведочных работ и последующей обработки данных (включая инверсионные преобразования) строят модель распределения скоростей упругих волн в среде (кинематическая модель), а также модели распределения акустического импеданса и физико-механических свойств. На рис. 5 показано распределение предела прочности на одноосное сжатие пород ВЗТ над исследуемыми панелями.

С использованием полученного распределения прочностных и деформационных свойств в ВЗТ и калийных пластах был выполнен расчет оседаний земной поверхности и численный (геомеханический) анализ возникновения зон разрушения в ВЗТ при отработке панелей при проектных параметрах системы разработки.

Выводы

Показано, что данные, получаемые в процессе шахтной сейсморазведки способом ПВРО в условиях месторождений солей, позволяют решать следующие задачи, стоящие перед

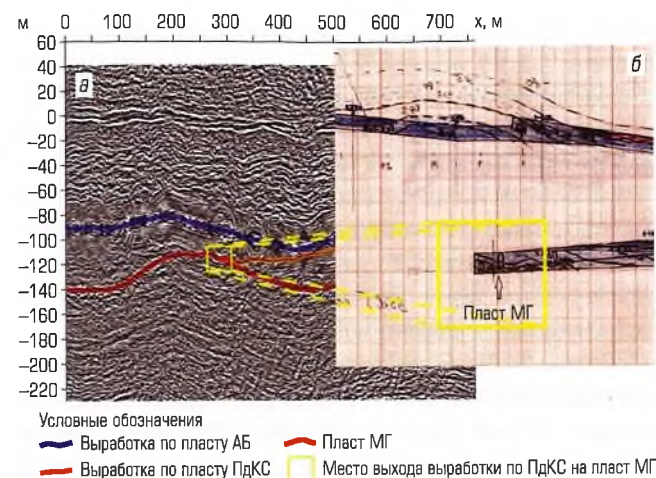


Рис. 4. Сейсмический разрез (а) и зарисовка стен выработки (б)

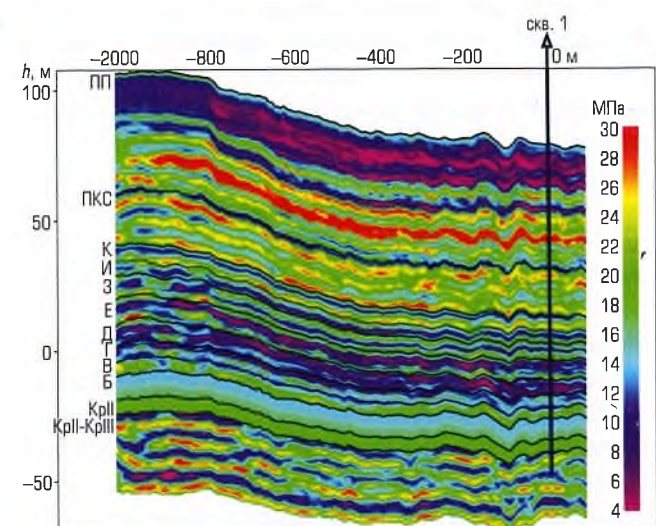


Рис. 5. Распределение прочности пород на одноосное сжатие по профилю линии шахтной сейсморазведки ПВРО

геологическими и горными службами добывающих предприятий на этапах доразведки и эксплуатационной разведки:

- изучение гипсометрии геологических границ, уточнение положения СЗ;
- определение характеристик ВСД;
- обнаружение геологических аномалий, представляющих потенциальную опасность для рудников — областей уменьшения мощности ВЗТ, в том числе эрозионных врезов, областей замещения солей;
- выявление неизвестных ранее особенностей геологического строения и, как следствие, уточнение особенностей формирования месторождений;
- построение модели распределения ФМС в горном массиве, расчет оседаний земной поверхности, геомеханический анализ зон разрушения в ВЗТ;
- уточнение объемов запасов.

Библиографический список

1. Funk C., Isbister J., Leblanc T., Brehm R. Mapping How Geophysics Is Used To Understand Geohazards In Potash Mines // *Recorder*. 2019. Vol. 44. Iss. 7.
2. Прохоров Н. Н., Ефимов А. М., Ущеповский И. Ф., Кафанова Т. П., Барбиков Д. В., Клубук А. М. Определение границы распространения обводненных пород вдоль контура выклинивания Третьего калийного горизонта Старобинского месторождения геофизическими методами // *Горная механика и машиностроение*. 2019. № 3. С. 5–14.
3. Gendzwil D. J., Brehm R. High-resolution seismic reflections in a potash mine // *Geophysics*. 1993. Vol. 58. Iss. 5. P. 741–748.
4. Himanshu Barthwal, Mirko van der Baan. Passive seismic tomography using recorded microseismicity: Application to mining-induced seismicity // *Geophysics*. 2019. Vol. 84. Iss. 1. P. 41–57.
5. Jun Lu, Xinghun Meng, Yun Wang, Zhen Yang. Prediction of coal seam details and mining safety using multicomponent seismic data: A case history from China // *Geophysics*. 2016. Vol. 81. Iss. 5. P. 149–165.
6. Greenhalgh S. A., Mason I. M., Sinadinovski C. In-mine seismic delineation of mineralization and rock structure // *Geophysics*. 2000. Vol. 65. No. 6. P. 1908–1919.
7. Вагин В. Б., Ефимов А. М., Кулагов Е. В. Исследование и оценка состояния водооградной толщи над калийными горизонтами геофизическими методами // *Горный журнал*. 2014. № 2. С. 11–15.
8. Chouteau M., Phillips G., Prugger A. Mapping and Monitoring Softrock Mining // *Geophysics and Geochemistry at the Millenium: Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration*. — Toronto, 1997. P. 927–940.
9. Зубов В. П., Ковальский Е. Р., Антонов С. В., Пачгин В. В. Повышение безопасности рудников при отработке Верхнекамского месторождения калийно-магневых солей // *ГИАБ*. 2019. № 5. С. 22–33.
10. Жуков А. А., Пригара А. М., Царев Р. И., Шусткина И. Ю. Способ шахтной сейсморазведки для изучения особенностей геологического строения ВКМС // *ГИАБ*. 2019. № 4. С. 121–136.
11. Пригара А. М., Аптуков В. Н., Царев Р. И., Ворошилов В. А., Жуков А. А. Исследование процесса распространения волн при сейсмоакустических воздействиях в породном массиве методами математического моделирования // *Инженерная и рудная геофизика: сб. тезисов 16-й науч.-практ. конф. совместно с семинаром «Инженерная и рудная геология 2020»*. — Пермь, 2020.
12. Глухих А. В., Царев Р. И., Жуков А. А., Морошкина Ю. Н., Пригара А. М. Геологическое обоснование результатов шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений ПВРО // *Инженерная и рудная геофизика: сб. тезисов 16-й науч.-практ. конф. совместно с семинаром «Инженерная и рудная геология 2020»*. — Пермь, 2020.
13. Боганик Г. Н., Гурвич И. И. Сейсморазведка: учебник. — Тверь: АИС, 2006. — 744 с.
14. Кудряшов А. И. Верхнекамское месторождение солей. — 2-е изд., перераб. — М.: Эпсилон Плюс, 2013. — 368 с.
15. Jaeger J. C., Cook N. G. W., Zimmerman R. W. *Fundamentals of Rock Mechanics*. 4th ed. — Malden: Blackwell Publishing, 2007. — 475 p.
16. Khvostantsev D., Shustov D., Ermashov A., Kashnikov Yu. The increasing of exploitation safety of potassium salt deposit based on geological-geomechanical simulation // *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium*. — Leiden: CRC Press/Balkema, 2018. Vol. 2. P. 1425–1430.
17. Zoback M. D. *Reservoir Geomechanics*. — Cambridge: Cambridge University Press, 2007. — 480 p.

«GORNYI ZHURNAL», 2021, № 4, pp. 23–27
DOI: 10.17580/gzh.2021.04.02

Improvement of operational exploration and mining safety using the shear-wave reflection method of mine seismology

Information about authors

A. M. Prigara¹, Leading Researcher, Candidate of Engineering Sciences

A. A. Zhukov¹, Head of Geophysics Laboratory, Candidate of Engineering Sciences,

Aleksandr.Zhukov@uralkali.com

R. I. Tsarev¹, Senior Researcher

Yu. A. Kashnikov², Head of Department, Doctor of Engineering Sciences

¹VNI Galurgii, Perm, Russia

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Abstract

During the whole life of mines, the geological survey departments are faced with the critical objectives of operational exploration. These objectives are sometimes impossible to be met adequately without geophysics. Neutrality of geophysical studies is often below the desired level. The shear-wave reflection method of mine seismology, with separation of reflections, which is developed by the present authors, allows: investigating the shape, thickness and dip angles of geologic beds and ore bodies, detecting geological discontinuities such as faults, joints and cavities, as well as determining physical and mechanical properties of rocks. The capacity of the shear-wave reflection method with separation of reflections is described in a case-study of the Upper Kama Potash Salt Deposit. The seismic tests were carried out in a few underground excavations. The developed method in the test conditions is accurate to the first meters at a spacing more than 300 m. Accordingly, it is possible to study the whole thickness of the salt strata in the Upper Kama Deposit, from the salt table to the anhydrous clay roof, specifically, to assess the structure and composition of the waterproof strata, to identify mine-threatening geological discontinuities, and to build the model of physical and mechanical properties of rock mass. Introduction of the newly developed method can greatly enhance efficiency of actual operational exploration. The method has yielded the best results during or immediately after heading of permanent and development openings. Considering similarity of surface and underground mineral mining in terms of access to solid rocks, it is expected to have the same outcomes in open pit mines.

Keywords: seismic exploration, shear waves, separation of reflections, geological seismic model, mine safety, appraisal of mineral resources and mineral reserves, geomechanical parameters.

References

1. Funk C., Isbister J., Leblanc T., Brehm R. Mapping How Geophysics Is Used To Understand Geohazards In Potash Mines. *Recorder*. 2019. Vol. 44. Iss. 7.

2. Prokhorov N. N., Efimov A. M., Ushchapovskiy I. F., Kafanova T. P., Barbikov D. V., Klubuk A. M. Defining the boundaries of the distribution of watered rocks along the contour of thinning of the Third potassium horizon of the Starobin potassium deposit by geophysical methods. *Gornaya mekhanika i mashinostroyeniye*. 2019. No. 3. pp. 5–14.
3. Gendzwil D. J., Brehm R. High-resolution seismic reflections in a potash mine. *Geophysics*. 1993. Vol. 58, Iss. 5. pp. 741–748.
4. Himanshu Barthwal, Mirko van der Baan. Passive seismic tomography using recorded microseismicity: Application to mining-induced seismicity. *Geophysics*. 2019. Vol. 84, Iss. 1. pp. 41–57.
5. Jun Lu, Xinghun Meng, Yun Wang, Zhen Yang. Prediction of coal seam details and mining safety using multicomponent seismic data: A case history from China. *Geophysics*. 2016. Vol. 81, Iss. 5. pp. 149–165.
6. Greenhalgh S. A., Mason I. M., Sinadinovski C. In-mine seismic delineation of mineralization and rock structure. *Geophysics*. 2000. Vol. 65, No. 6. pp. 1908–1919.
7. Vagin V. B., Efimov A. M., Kulagov E. V. Research and assessment of status of waterproof strata over potassium horizons by geophysical methods. *Gornyi Zhurnal*. 2014. No. 2. pp. 11–15.
8. Chouteau M., Phillips G., Prugger A. Mapping and Monitoring Softrock Mining. *Geophysics and Geochemistry at the Millenium: Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration*. Toronto, 1997. pp. 927–940.
9. Zubov V. P., Kovalskiy E. R., Antonov S. V., Pachgin V. V. Improving the safety of mines in developing verkhnekamsk potassium and magnesium salts. *GIAB*. 2019. No. 5. pp. 22–33.
10. Zhukov A. A., Prigara A. M., Tsarev R. I., Shustkina I. Yu. Method of mine seismic survey for studying geological structure features of Verkhnekamskoye salt deposit. *GIAB*. 2019. No. 4. pp. 121–136.
11. Prigara A. M., Aptukov V. N., Tsarev R. I., Voroshilov V. A., Zhukov A. A. Mathematical modeling-based analysis of wave propagation processes under seismic and acoustical effects on rock mass. *Geophysics in Engineering and Mining. The 16th Conference with Seminar on Geology in Engineering and Mining 2020: Head-Notes*. Perm, 2020.
12. Glukhikh A. V., Tsarev R. I., Zhukov A. A., Moroshkina Yu. N., Prigara A. M. Geological validation of data of S-wave exploration with separation of reflections. *Geophysics in Engineering and Mining. The 16th Conference with Seminar on Geology in Engineering and Mining 2020: Head-Notes*. Perm, 2020.
13. Bogani G. N., Gurchik I. I. Seismic exploration: Textbook. Tver: AIS, 2006. 744 p.
14. Kudryashov A. I. Verkhnekamskoye salt deposit. Second revised edition. Moscow: Epsilon Plus, 2013. 368 p.
15. Jaeger J. C., Cook N. G. W., Zimmerman R. W. *Fundamentals of Rock Mechanics*. 4th ed. Malden: Blackwell Publishing, 2007. 475 p.
16. Khvostantsev D., Shustov D., Ermashov A., Kashnikov Yu. The increasing of exploitation safety of potassium salt deposit based on geological-geomechanical simulation. *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium*. Leiden: CRC Press/Balkema, 2018. Vol. 2. pp. 1425–1430.
17. Zoback M. D. *Reservoir Geomechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 480 p.

РАЗВИТИЕ ИНТЕРПРЕТАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ОСВОЕНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВОДОРАСТВОРИМЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ



И. А. САНФИРОВ¹,
директор, проф., д-р техн. наук,
sanf@mi-perm.ru



А. А. ЖИКИН¹,
младший научный сотрудник



Р. А. БОГДАНОВ²,
руководитель направления
по ликвидации рудника



К. Б. ФАТЬКИН¹,
научный сотрудник, канд. техн. наук

¹Горный институт УрО РАН — филиал ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН, Пермь, Россия

²ПАО «Уралкалий», Березники, Россия

Введение

Горные работы на месторождениях водорастворимых полезных ископаемых регламентируются определенными технологическими требованиями, обеспечивающими защиту горных выработок от затопления. В подобных условиях основная задача геофизических исследований — выявление и изучение особенностей строения и свойств водозащитной и продуктивной толщ и их реакции на конкретную горнотехническую ситуацию.

Общеизвестно, что из всех методов разведочной геофизики сейсморазведка выделяется «богатым» информационным содержанием регистрируемых данных. Уже в исходных данных, наряду с прямой фиксацией времени регистрации отражения или прохождения изучаемых упругих волн, содержится информация об амплитудах и частотном составе. Последующая цифровая обработка направлена на выделение конкретных типов и видов волн и обеспечение возможности получения их различных кинематических и динамических параметров.

Стандартный информационный набор интерпретационного этапа при сейсморазведочных исследованиях водозащитной

По результатам исследований в пределах калийной залежи сформирован набор основных параметров интерпретационного этапа сейсморазведочных исследований. В рамках развития качественной интерпретации рассмотрен анализ нерегулярной составляющей волнового поля в результатах обработки по рассеянным волнам, спектральной декомпозиции и RGB-смешивания. Предложен метод для определения возможной трещиноватости массива на основе изменчивости интервальных скоростей, позволяющий в совокупности с данными AVO-анализа оценить динамику дезинтеграции пород в пределах аварийных объектов.

Ключевые слова: малоглубинная 2D- и 3D-сейсморазведка, рассеянные волны, спектральная декомпозиция, RGB-смешивание, AVO-анализ.

DOI: 10.17580/gzh.2021.04.03

и продуктивной толщ как на поверхности, так и во внутренних точках среды до последнего времени [1–4] включал: времена целевых отражений, эффе́ктивные и интервальные скорости, амплитуды, частоты, распределения комплексного параметра. Подобный набор параметров позволяет на уровне экспертных оценок формировать интерпретационные заключения о природе выявляемых осложнений волнового поля. Данные заключения базируются на количественных и качественных оценках изменчивости волнового поля.

Цель качественных заключений — пространственная локализация физико-геологических неоднородностей и возможная оценка их природы. Совместное проявление сейсморазведочных параметров — амплитуд, когерентности и частоты формирует некий волновой «образ», который соответствует модели предполагаемой неоднородности. Подобный анализ лежит в основе сейсмостратиграфических подходов к интерпретации сейсморазведочных данных, хорошо известных из нефтяной сейсморазведки [5, 6]. Очевидно, что при решении горнотехнических задач наборы интерпретационных моделей существенно отличаются от используемых при поисках и разведке залежей углеводородов.

Методика и результаты исследований

В процессе развития сейсморазведочных исследований на Верхнекамском месторождении калийных и магниевых солей (ВКМКС) сформировано несколько типовых волновых «образов» для разного рода неоднородностей водозащитной и продуктивной толщ. Резкое изменение гипсометрии прослеживаемых отражающих горизонтов при наличии контрастных амплитудных

аномалий предполагает влияние складчатости с периодом, меньшим зоны Френеля. Совместно проявляющиеся отклонения от фоновых значений амплитуд и скоростей распространения упругих волн могут свидетельствовать о литологической природе выделяемых осложнений, например участки резкой литофациальной изменчивости водозащитной толщи (ВЗТ).

Изменения в частотном составе результирующих волновых картин при соответствующей гипсометрии отражающих горизонтов рассматривают как индикаторы участков переменной мощности, в пределах которых возможно и полное выклинивание отдельных литологических комплексов.

Конечная цель количественной интерпретации заключается в построении сейсмогеологических моделей, характеризующихся определенными размерами и упругими свойствами, представленными в значениях глубин отражающих границ и скоростей распространения упругих волн в интервалах между ними. Контрастность изменений структурно-физических свойств моделей учитывают в последующих геомеханических обоснованиях безопасного ведения горных работ. Кроме того, оценка временной изменчивости интервальных скоростей по результатам мониторинговых наблюдений с учетом горнотехнической ситуации позволяет судить о техногенной составляющей регистрируемых волновых полей [7].

Практика сейсморазведочных исследований на ВКМКС [1, 7–13] и решение разного рода задач при мониторинге аварийных участков [14] обусловили необходимость включения в интерпретационный набор дополнительных оценок составляющих волнового поля. В рамках развития этапа качественной интерпретации данные оценки в основном направлены на анализ нерегулярной части волнового поля и включают: интенсивность рассеянных волн, спектральную декомпозицию, RGB-смешивание.

При изучении рассеянных волн обычно применяют узкополосный фильтр высокой частоты в сочетании с «жесткой» когерентной фильтрацией и последующим пространственно-временным сглаживанием в результате использования миграционных процедур. Подобные процедуры позволяют картировать контрастные литологические неоднородности с непараллельными отражающими границами в плоскости изучения. Результаты миграционного преобразования суммарного волнового поля рассеянных волн, по данным шахтных сейсмоакустических наблюдений с целью оконтуривания зоны замещения в продуктивном пласте калийных солей, представлены на **рис. 1**.

Направления развития количественной интерпретации связаны с переводом параметров волнового поля в структурно-формационные параметры породного массива. Данный процесс основан на изучении как кинематических, так и динамических параметров отраженных волн, регистрируемых в интервалах малых глубин.

Обоснован прямой пересчет изменчивости значений интервальных скоростей в объемы возможной трещиноватости породного массива. С этой целью применяют формулу средней скорости [5]. Общую мощность зоны трещиноватости h в пределах изучаемого интервала определяют по формуле

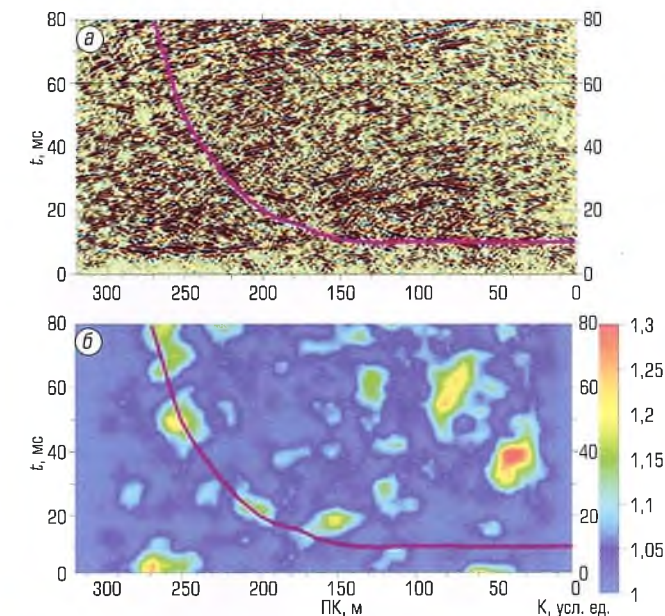


Рис. 1. Результаты цифровой обработки данных шахтных сейсмоакустических исследований:

а — миграция по рассеянным волнам; *б* — разрез комплексного параметра; цветной линией показана граница зоны замещения по результатам сейсмопросвечивания

$$h = \frac{H(V_H - V_M)}{V_M \left(\frac{V_H}{V_T} - 1 \right)},$$

где H — мощность интервала; V_H — скорость в ненарушенных породах; V_M — скорость в изучаемом интервале; V_T — скорость в интервале нарушения пород. Подобного рода пересчет можно применять при контроле эффективности мероприятий по укреплению породного массива и интегральной оценке развития негативных процессов при реализации аварийной ситуации.

По результатам цифровой обработки и интерпретации сейсморазведочных данных в пределах аварийного участка одного из калийных рудников ВКМКС на предыдущих этапах выделены зоны, связанные с процессами дезинтеграции породного массива. Они объединены в одну область, вытянутую в северо-западном направлении. Данная область была сформирована в течение всего периода наблюдений, начиная с 2014 г. и по настоящее время. В качестве примера по данным сейсморазведки представлена пространственная модель ее развития за период 2014–2020 гг. (**рис. 2**). Очевидно, расширение областей с пониженными физическими свойствами происходит за счет разуплотнения и трещинообразования, вызванных негативными гидрогеологическими процессами в районе провала и на северо-западном потенциально опасном участке.

Прогноз характера заполнения прогнозируемого объема зон трещиноватости предусмотрен в процедуре AVO (amplitude vs offset) анализа, в котором разработаны интерпретационные модели для различных закономерностей изменения амплитуд

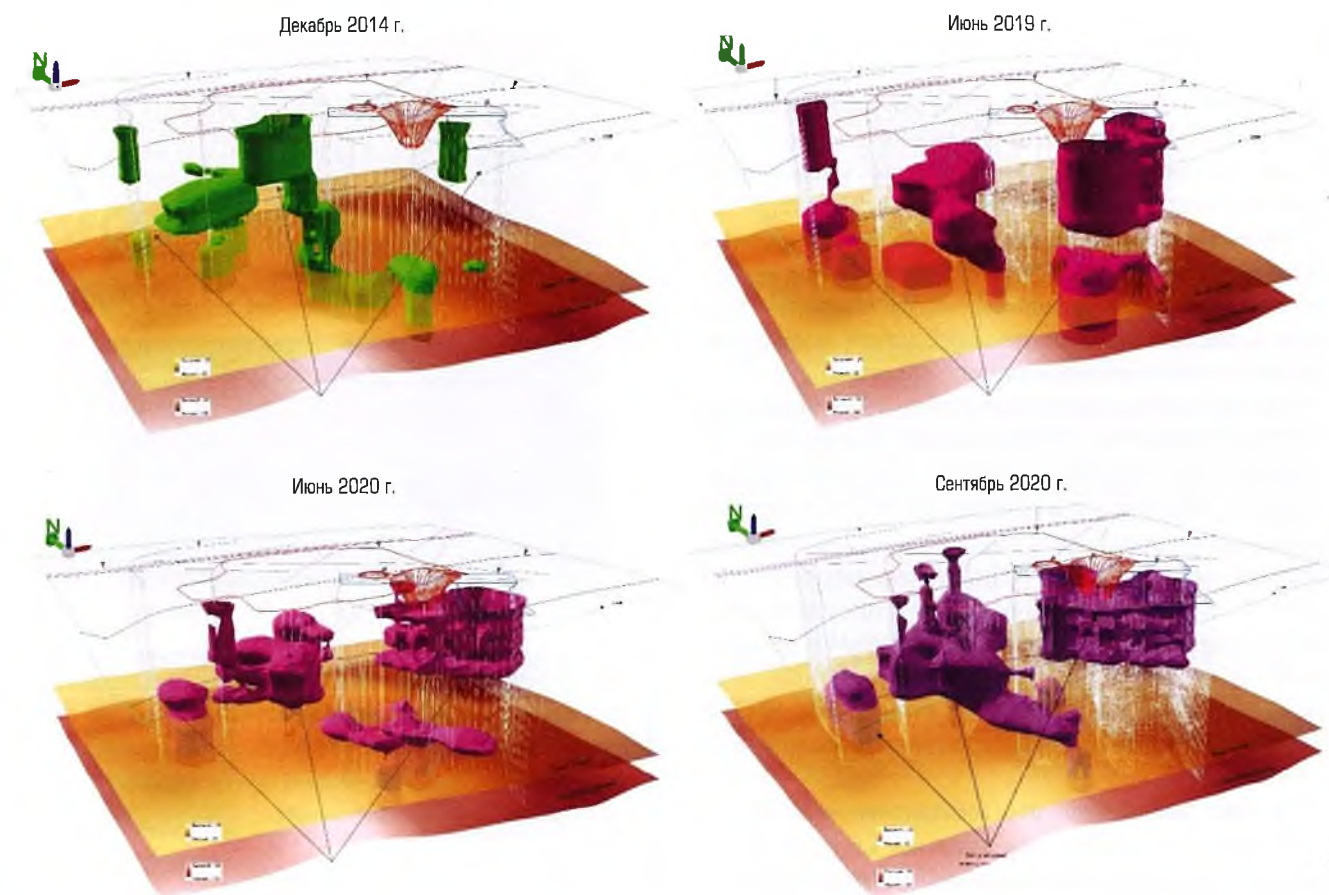


Рис. 2. Изменение состояния породного массива по сейсморазведочным данным в пределах аварийного участка ВКМКС (цветом обозначены зоны повышенного затухания амплитуд отраженных волн продольного типа в интервале глубин от 20 до 250 м)

отраженных волн в зависимости от расстояния источник-приемник, т. е. от угла падения. AVO-анализ относится к одному из видов упругой инверсии, основанному на использовании специфических коэффициентов — AVO-пересечения (intercept-A) и градиента B двучленной аппроксимации Шуэ [15, 16], связанных с изучением поведения коэффициента отражения продольной сейсмической волны при различных углах падения.

Изменения амплитуд возникают в зонах варьирования интегральных оценок физических свойств интервалов геологического разреза пород вследствие флюидо- или газонасыщения (пустоты). Так, для первого случая характерно преобладание положительных значений данных коэффициентов, а для второго — отрицательных. Безусловно, подобные оценки в тонкослоистых средах интервала малых глубин, где причины изменения интенсивности волнового поля обусловлены в основном интерференционными эффектами, носят экспертный и интегральный характер.

Изменения значений интервальных скоростей с учетом результатов AVO-анализа позволяют судить о динамике изменения общего объема пустоты для конкретных интервалов укреплённого породного массива. Наибольший интерес представляют участки несогласованности изменений динамических и кинематических параметров, наличие которых может быть вызвано различным заполнением предполагаемых зон

трещиноватости. Например, в пределах площади распространения пород с повышенной трещиноватостью выявлена несогласованность в распределении амплитуд отраженных волн продольного типа (рис. 3, в), снятых с временных разрезов (см. рис. 3, а), и интервальных скоростей распространения упругих волн. В восточной части площади работ при «сквозном» характере снижения значений интервальных скоростей повышенное затухание амплитуд отмечено только в нижней части разреза (от –350 до –500 м). На западе при «сквозном» характере затухания амплитуд пониженные значения скоростей распространения упругих волн наблюдаются только в интервале абсолютных отметок от –150 до –280 м. Для центральной части характерна промежуточная ситуация.

Преобладание незаполненного пространства усиливает контрастность дополнительных, не обусловленных литологической дифференциацией акустических границ, причем не всегда горизонтальной ориентации. В подобных средах прогнозируют повышенное рассеяние и деструктивную интерференцию отраженных волн, что соответственно и снижает оцениваемую по суммарным временным разрезам интенсивность волнового поля. При появлении какого-либо заполнения контрастность и число дополнительных границ снижаются и в динамических характеристиках они становятся менее выраженные, чем в кинематических.

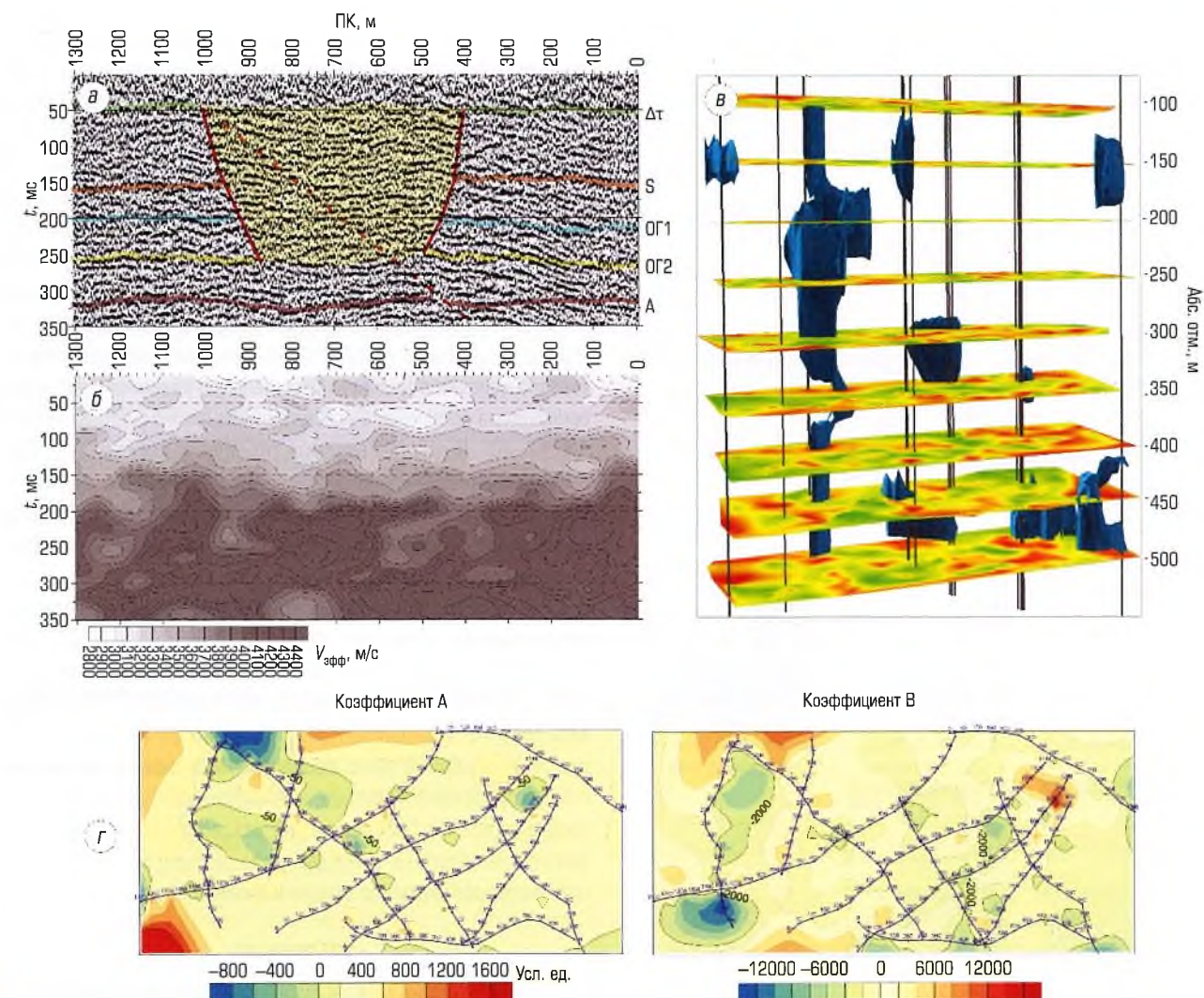


Рис. 3. Результаты малоглубинных сейсморазведочных исследований:

а — временной разрез; б — скоростная характеристика; в — распределение амплитуд отраженных волн продольного типа с выделением зон повышенного затухания; г — горизонтальные срезы распределения коэффициентов Шуэ А и В

Таким образом, если сравнить участки на востоке и на западе, то в распределениях значений коэффициентов (см. рис. 3, г) очевидно преобладание положительных оценок для востока и отрицательных для запада. Для расчета коэффициентов А и В использована система обработки сейсмических данных SPS-PC. На основании данных интерпретационных подходов можно предположить нарастание заполнения зон трещиноватости флюидами с запада на восток и снизу вверх по разрезу. Центральная часть занимает промежуточное положение.

На содержание интерпретационного этапа безусловное влияние оказывают и новые методические подходы при выполнении полевых наблюдений. При осуществлении площадных (квази-3D) и пространственных (3D) наблюдений информационное обеспечение интерпретационного этапа расширяется благодаря возможности анализа пространственных распределений сейсморазведочных параметров [10]. В основном решают задачи качественной интерпретации, связанные с локализацией объектов поиска.

Квазипространственные наблюдения организуют при отсутствии прямого доступа к изучаемым участкам: под зданиями и сооружениями, на аварийных участках. Линии приема и возбуждения упругих колебаний разносят по границам изучаемой территории. Суммирование пространственных выборок по пунктам приема (ОР), пунктам возбуждения (SP) и точкам отражения (ОГТ) позволяет конкретизировать положение аномалии образующих объектов относительно линии точек отражения.

Наблюдения 3D выполняют на участках, требующих детальных исследований. Получаемые кубы сейсмической информации характеризуются повышенной пространственной разрешенностью относительно профильных и площадных систем наблюдений, что позволяет проследивать в амплитудных представлениях пространственные трансформации локальных литолого-структурных неоднородностей ВЗТ (рис. 4, а, б).

Вследствие повышенной пространственной плотности сбора сейсморазведочной информации при реализации

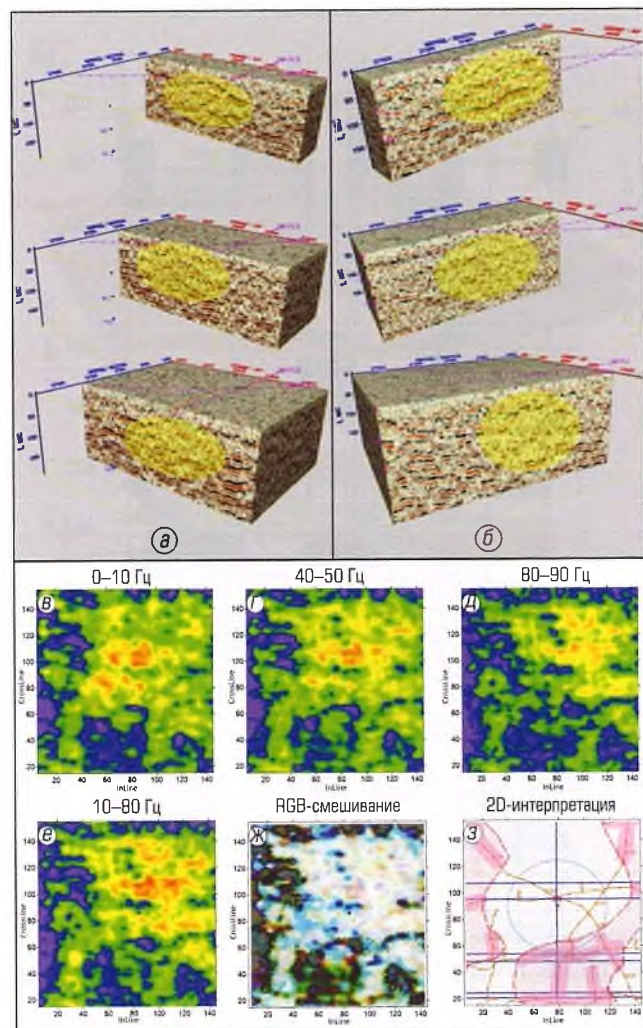


Рис. 4. Результаты обработки данных малоглубинных исследований 3D:

а – вертикальные срезы куба сейсмических данных меридионального простирания; б – то же, широтного простирания; в, г, д, е – среднеарифметическое значение амплитуд колебаний для отражающего горизонта СМТ в интервале частот 0–10, 40–50; 80–90 и 10–80 Гц соответственно; ж – RGB-смешивание; з – схема интерпретации данных сейсморазведки 2D

пространственных систем наблюдений большой информативностью обладают отдельные интерпретационные процедуры. К примеру, применение спектральной декомпозиции направлено на получение дополнительной информации о природе выделяемых осложнений волнового поля. Наличие отрицательных аномалий амплитуд высокочастотной составляющей с наибольшей долей вероятности связано с зонами трещиноватости и большей частью – техногенной, а положительных – с пластами переменной мощности. Для амплитуд низкочастотной составляющей основным определяющим фактором являются особенности геологического строения, характерные для всего исследуемого интервала породного массива. Спектральную декомпозицию можно применять в комплексе с процедурой цветового смешивания [11, 13, 17–20]. В простом варианте технологию спектральной RGB-декомпозиции можно представить через смешение суммарных волновых полей разных частотных компонент. Соответственно более низкочастотная компонента представлена красным, средняя – зеленым, высокая – синим цветом (см. рис. 4).

Так, например, по результатам RGB-смешивания среднеарифметических значений амплитуд колебаний для отражающего горизонта соляно-мергельной толщи (СМТ) удается более точно наметить границы аномальных участков и скорректировать результаты интерпретации площадных 2D-наблюдений (см. рис. 4, в–з). Кроме этого, процедура RGB-смешивания независимых атрибутов (амплитуда, сигнал/помеха, когерентность) на уровне горизонта СМТ позволила разделить природу аномальных зон, выделяемых в верхней части разреза в южной и западной частях потенциально опасного участка.

Заключение

Таким образом, развитие интерпретационного процесса сейсморазведочных исследований ВЗТ за последние тридцать лет затрагивает как качественную, так и количественную составляющие. Расширение информационного обеспечения их практической реализации обусловлено двумя взаимосвязанными процессами: расширением поисковых объектов и развитием методического инструментария для их изучения. Подобный подход типичен для развития во времени любого исследовательского процесса и, как показывают последние результаты исследований, он еще недостаточно отработан.

Библиографический список

1. Барях А. А., Санфинов И. А., Федосеев А. К., Бабкин А. И., Цаюков А. А. Сейсмо-геомеханический прогноз состояния водозащитной толщи на калийных рудниках // ФТПРПИ. 2017. № 6. С. 10–22.
2. Байбакова Т. В. Примеры интерпретации сейсморазведочных данных при изучении сложных геологических объектов в пределах ВКМКС // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. – Пермь, 2018. Вып. 16. С. 224–226.
3. Бобров В. Ю. Необходимость проведения пространственных инженерных сейсморазведочных работ // Восемнадцатая уральская молодежная научная школа по геофизике: сб. науч. матер. – Пермь: ГУ УрО РАН, 2017. С. 21–24.
4. Бобров В. Ю., Герасимова И. Ю. Изучение верхней части разреза методами инженерной 2Д и 3Д сейсморазведки // Инженерная и рудная геофизика 2020: 16-я науч.-практ. конф. совместно с семинаром «Инженерная и рудная геология 2020». – ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ, 2020.
5. Payton Ch. E. Seismic Stratigraphy – applications to hydrocarbon exploration. Series: Memoir 26. 7th ed. – Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1977. – 516 p.
6. Санфинов И. А., Бабкин А. И., Ярославцев А. Г., Прийма Г. Ю., Фаткин К. Б. Сейсморазведочные исследования условий разработки калийной залежи // Геофизика. 2011. № 5. С. 53–58.

7. Ярославцев А. Г. Атрибутивный анализ данных пространственной малоглубинной сейсморазведки на потенциально-опасном участке // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. – Пермь, 2017. Вып. 15. С. 211–213.
8. Ярославцев А. Г. Сейсморазведочные технологии оценки воздействия горных работ на верхнюю часть разреза: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2003. – 152 с.
9. Haibin Di, Dengliang Gao. 3D Seismic Flexure Analysis for Subsurface Fault Detection and Fracture Characterization // Pure and Applied Geophysics. 2017. Vol. 174. Iss. 3. P. 747–761.
10. Froner B., Purves S. J., Lowell J., Henderson J. Perception of visual information: the role of colour in seismic interpretation // First Break. 2013. Vol. 31. Iss. 4. P. 29–34.
11. Alcalde J., Bond C. E., Johnson G., Kloppenburg A., Ferrer O. et al. Fault interpretation in seismic reflection data: an experiment analysing the impact of conceptual model anchoring and vertical exaggeration // Solid Earth. 2019. Vol. 10. P. 1651–1662.
12. Öz Yilmaz. Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, And Interpretation Of Seismic Data. Vol. I, II. Series: Investigations in Geophysics No. 10. In two volumes. 2nd ed. – Tulsa: Society of Exploration Geophysicist, 2001. – 2027 p.
13. Veeken P. C. H. Seismic Stratigraphy, Basin Analysis and Reservoir Characterisation. – Amsterdam: Elsevier, 2006. Vol. 37. – 522 p.

«ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ», 2021, № 4, pp. 28–33
DOI: 10.17580/gzh.2021.04.03

Evolution of interpretation capacities of seismic measurements in mining of water-soluble minerals

Information about authors

I. A. Sanfirov¹, Director, Professor, Doctor of Engineering Sciences, sanfi@mi-perm.ru
A. A. Zhikin¹, Junior Researcher
R. A. Bogdanov², Mine Closure Manager
K. B. Fatkin¹, Researcher, Candidate of Engineering Sciences
¹Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia
²Uralkali, Berezniki, Russia

Abstract

The current development level of geophysical methods for mining monitoring of water-soluble mineral deposits provides opportunities to control the growing variety of potentially hazardous geological and mining conditions, to identify the critical states of rock mass and to monitor the emergency facilities. Seismic surveys for solving the specified problems have proven to be a highly informative method for studying the structural features and properties of productive and water-protective overburden strata, which has a high information richness of the recorded data. The main set of parameters for the interpretation stage of seismic exploration has been formed based on the experience in shallow seismic surveys within a potash deposit; it includes the target reflection times, effective and interval velocities, amplitudes, frequencies and a number of derivatives from these parameters. Improvement and adaptation of world interpretation practices in relation to the indicated seismic studies conditions provides means for increasing reliability of anomalies identification and expanding the set of typical wave 'images' for various kinds of inhomogeneities in a wide range of wave field realizations and its attributes. The analysis of irregular wave field component in the results of scattered waves processing, spectral decomposition and RGB-mixing is considered as an additional techniques of qualitative interpretation. An approach is proposed to determining possible fracturing in rock mass based on the variability of interval velocities. In combination with the AVO-analysis, this approach makes it possible to assess the trend of rock disintegration within the emergency facilities. The interpretation results of the areal (quasi-3D) and spatial (3D) detailed surveys of a shallow potash deposit are presented.

Keywords: shallow 2D and 3D seismic, scattered waves, spectral decomposition, RGB-mixing, AVO analysis.

References

1. Baryakh A. A., Sanfirov I. A., Fedoseev A. K., Babkin A. I., Tsayukov A. A. Seismic–Geomechanical Control of Water-Impermeable Strata in Potassium Mines. *Journal of Mining Science*. 2017. Vol. 53, Iss. 6. pp. 981–992.
2. Baybakova T. V. Interpretation of seismic explorations of complex geological objects within the Upper Kama Potash Salt Deposit. *Strategy and Processes of Georesources Management: Collection of Scientific Papers*. Perm, 2018. Vol. 16. pp. 224–226.

14. Rutherford S. R., Williams R. H. Amplitude-versus-offset variations in gas sands // *Geophysics*. 1989. Vol. 54. No. 6. P. 680–688.
15. Sanfirov I. A., Zhikin A. A., Priima G. U., Nezhdanov A. V. Seismic inspection of the rock mass consolidation grouting in the zone of anthropogenic accident // *Engineering and Mining Geophysics 2018: 14th Conference and Exhibition*. – Almaty, 2018. Vol. 1. P. 121–128.
16. Shuey R. T. A simplification of the Zoeppritz equations // *Geophysics*. 1985. Vol. 50. No. 4. P. 609–614.
17. Yan Ding, Qizhen Du, Liyun Fu, Shikai Jian. Reliability analysis of seismic attribute in the detection of fault-karst // *Interpretation*. 2020. Vol. 8, Iss. 4. P. 61–70.
18. Yaroslavtsev A., Bobrov V., Zhikin A. Engineering 3D Seismic Survey on the Potash Mine Territory // *Engineering Geophysics 2017: 13th Conference and Exhibition*. – Kislovodsk, 2017. P. 43–51.
19. Yinling Guo, Suping Peng, Wenfeng Du, Dong Li. Fault and horizon automatic interpretation by CNN: a case study of coalfield // *Journal of Geophysics and Engineering*. 2020. Vol. 17, Iss. 6. P. 1016–1025.
20. Haibin Di, Dengliang Gao. 3D Seismic Flexure Analysis for Subsurface Fault Detection and Fracture Characterization // *Pure and Applied Geophysics*. 2017. Vol. 174. Iss. 3. P. 747–761. [GA](#)
3. Bobrov V. Yu. Essentiality of 3D seismic surveys. *Proceedings of the 18th Ural Youth School of Geophysics*. Perm: GU Uro RAN, 2017. pp. 21–24.
4. Bobrov V. Yu., Gerasimova I. Yu. The investigation of shallow structure inhomogeneities by 2D and 3D seismic engineering techniques. *Geophysics in Engineering and Mining. The 16th Conference with Seminar on Geology in Engineering and Mining 2020*. EAGE GEOMODEL, 2020.
5. Payton Ch. E. Seismic Stratigraphy – applications to hydrocarbon exploration. Series: Memoir 26. 7th ed. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1977. 516 p.
6. Sanfirov I. A., Babkin A. I., Yaroslavtsev A. G., Priyma G. Yu., Fatkin K. B. Seismic measurements of exploitation conditions of the potash deposit. *Geofizika*. 2011. No. 5. pp. 53–58.
7. Yaroslavtsev A. G. Attribute analysis of data of 3D shallow seismic surveys in a potentially hazardous area. *Strategy and Processes of Georesources Management: Collection of Scientific Papers*. Perm, 2017. Vol. 15. pp. 211–213.
8. Yaroslavtsev A. G. Seismic exploration technologies in assessment of mining-induced impact on the near-surface section: Dissertation ... of Candidate of Engineering Sciences. Perm, 2003. 152 p.
9. Haibin Di, Dengliang Gao. 3D Seismic Flexure Analysis for Subsurface Fault Detection and Fracture Characterization. *Pure and Applied Geophysics*. 2017. Vol. 174, Iss. 3. pp. 747–761.
10. Froner B., Purves S. J., Lowell J., Henderson J. Perception of visual information: the role of colour in seismic interpretation. *First Break*. 2013. Vol. 31, Iss. 4. pp. 29–34.
11. Alcalde J., Bond C. E., Johnson G., Kloppenburg A., Ferrer O. et al. Fault interpretation in seismic reflection data: an experiment analysing the impact of conceptual model anchoring and vertical exaggeration. *Solid Earth*. 2019. Vol. 10. pp. 1651–1662.
12. Öz Yilmaz. Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, And Interpretation Of Seismic Data. Vol. I, II. Series: Investigations in Geophysics No. 10. In two volumes, 2nd ed. Tulsa: Society of Exploration Geophysicist, 2001. 2027 p.
13. Veeken P. C. H. Seismic Stratigraphy, Basin Analysis and Reservoir Characterisation. Amsterdam: Elsevier, 2006. Vol. 37. 522 p.
14. Rutherford S. R., Williams R. H. Amplitude-versus-offset variations in gas sands. *Geophysics*. 1989. Vol. 54, No. 6. pp. 680–688.
15. Sanfirov I. A., Zhikin A. A., Priima G. U., Nezhdanov A. V. Seismic inspection of the rock mass consolidation grouting in the zone of anthropogenic accident. *Engineering and Mining Geophysics 2018: 14th Conference and Exhibition*. Almaty, 2018. Vol. 1. pp. 121–128.
16. Shuey R. T. A simplification of the Zoeppritz equations. *Geophysics*. 1985. Vol. 50, No. 4. pp. 609–614.
17. Yan Ding, Qizhen Du, Liyun Fu, Shikai Jian. Reliability analysis of seismic attribute in the detection of fault-karst. *Interpretation*. 2020. Vol. 8, Iss. 4. pp. 61–70.
18. Yaroslavtsev A., Bobrov V., Zhikin A. Engineering 3D Seismic Survey on the Potash Mine Territory. *Engineering Geophysics 2017: 13th Conference and Exhibition*. Kislovodsk, 2017. pp. 43–51.
19. Yinling Guo, Suping Peng, Wenfeng Du, Dong Li. Fault and horizon automatic interpretation by CNN: a case study of coalfield. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2020. Vol. 17, Iss. 6. pp. 1016–1025.
20. Haibin Di, Dengliang Gao. 3D Seismic Flexure Analysis for Subsurface Fault Detection and Fracture Characterization. *Pure and Applied Geophysics*. 2017. Vol. 174, Iss. 3. pp. 747–761.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ФОРМИРОВАНИЯ НЕУСТОЙЧИВЫХ УЧАСТКОВ ПОРОДНЫХ ОБНАЖЕНИЙ КРОВЛИ ВЫРАБОТОК В СОЛЯНЫХ ПОРОДАХ



Д. Н. ШКУРАТСКИЙ,
генеральный директор, канд. техн. наук



Д. С. ЧЕРНОПАЗОВ,
заведующий лабораторией геомеханики, канд. техн. наук, Dmitry.Chernopazov@uralkali.com



И. Б. ВАУЛИНА,
старший научный сотрудник

АО «ВНИИ Галургии», Пермь, Россия

Введение

Обеспечение устойчивости подземных горных выработок является основой безопасного ведения горных работ. Эту задачу решают на основе реализации мероприятий по охране горных выработок, определяя эффективное положение горной выработки в свите горных пород, обеспечивающее соответствие устойчивости породных обнажений технологическому сроку службы выработки. Для обеспечения безопасных условий эксплуатации горных выработок определяющим условием является устойчивость кровли выработок [1–4].

Риск разрушений и интенсивных деформаций породного контура горных выработок должен быть компенсирован выбором рационального способа крепления породных обнажений горных выработок, обеспечивающего эксплуатационное состояние выработки на заданный срок.

Решение поставленной задачи в условиях Верхнекамского месторождения солей (ВКМС) осложняется складчатой слоистой структурой свиты пологих пластов сильвинитового и карналлитового состава, а также разделяющих их пластов каменной соли и тонких глинистых прослоек. Это

Выполнена оценка параметров устойчивости участков породных обнажений с помощью решения задачи Ламе применительно к условиям одиночной горной выработки на Верхнекамском месторождении солей. На основе выполненных исследований разработан инженерный подход по оценке параметров прогнозных зон нарушений устойчивости породных обнажений в кровле горизонтальных горных выработок, пройденных в соляных породах.

Ключевые слова: Верхнекамское месторождение, соляные породы, прочность, разрушение, горная выработка, математическое моделирование, ползучесть.

DOI: 10.17580/gzh.2021.04.04

приводит к формированию условий для расслоения соляных пород в кровле горных выработок, что связано с длительной эксплуатацией горных выработок. Также наблюдаются деформации ползучести и, как следствие, сдвиги по границам отдельных геологических пачек пород, что является причиной потери устойчивости породных обнажений.

Условия формирования свода обрушения в кровле горной выработки

С целью выбора эффективных видов крепи горной выработки и определения параметров крепления следует выполнять прогнозную оценку зоны возможных обрушений породных обнажений в кровле выработок (рис. 1).



Рис. 1. Пример обрушения кровли выработки на руднике ВКМС

Для решения указанной задачи длительное время использовали критерий Кулона – Мора [5, 6], согласно которому плоскость возможного сдвига связанных пород определяют как

$$\alpha = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}, \quad (1)$$

где φ – угол внутреннего трения породы кровли, градус.

На основании представленного критерия был сформирован подход, согласно которому параметры зоны возможного обрушения определяли как свод возможного обрушения (рис. 2). Параметры свода обрушения можно рассчитать по формуле

$$h_3 = 0,5 \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) L_p = 0,7 L_p, \quad (2)$$

$$L_p = l_{nn} + 0,75 r_0,$$

где L_p – расчетный пролет выработки, м; φ – угол внутреннего трения породы кровли, градус; l_{nn} – ширина плоской части кровли выработки, м; r_0 – радиус сводчатой части кровли выработки, м.

Высота свода обрушения в соответствии со сформированным критерием (2) зависит только от ширины выработки и угла внутреннего трения пород. Следовательно, для выработок равной ширины, расположенных на различных глубинах, параметры крепления будут одинаковыми. Реализация данного способа приводит к выбору недостаточных или избыточных параметров крепления горных выработок.

Для исключения данного противоречия рассмотрим известные методы определения условий потери устойчивости пород, слагающих кровлю горных выработок. В частности, оценка формирования разрушений пород кровли может быть выполнена с использованием теории изгиба балок [7]. Авторы [8] рассматривали разрушение образовавшейся в кровле выработки породной балки при достижении максимальными напряжениями в ней уровня предела длительной прочности пород.

На ВКМС соляные породы имеют сложное строение, для них характерны неоднородная мощность породных слоев, наличие разномошных глинистых прослоев, складчатость, ярко выраженные реологические свойства пород. Расчет зоны возможного разрушения пород в кровле по теории устойчивости балок для ВКМС обладает низкой практической эффективностью в связи с невозможностью точного определения параметров породных слоев, залегающих в кровле каждой выработки.

В работах [9, 10] авторы используют метод М. М. Протодяконова для определения высоты свода обрушения:

$$h_3 = a/f, \quad (3)$$

где a – полупролет выработки, м; f – коэффициент крепости породы.

В данном случае высота свода обрушения также не зависит от глубины расположения выработки и других горно-геологических факторов. Согласно [5] применение такого подхода целесообразно до тех пор, пока боковые породы деформируются упруго. Таким образом, область реализации данного метода ограничивается небольшими глубинами (60–70 м) или достаточно крепкими породами. Как известно, разработку соляных пород на

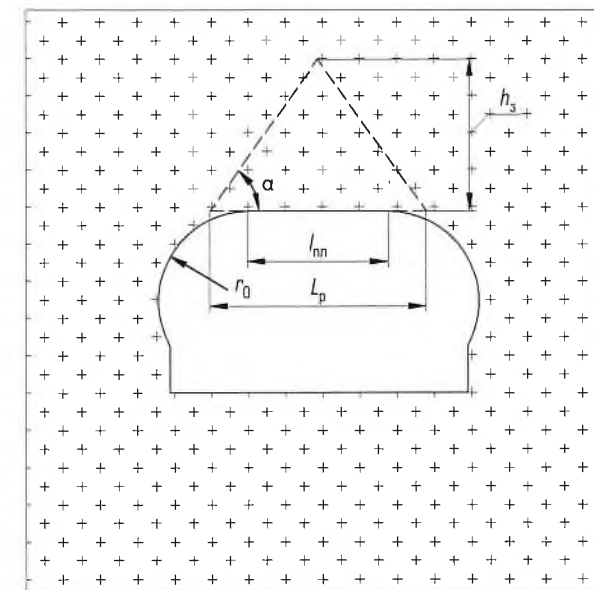


Рис. 2. Принципиальная схема определения свода возможного обрушения пород в кровле

ВКМС проводят на глубинах до 450 м, и породы обладают ярко выраженными пластическими свойствами.

В качестве альтернативы способу оценки высоты зоны возможного разрушения по методу Кулона и Протодяконова авторы [11–14] определяли зону разрушения в хрупких вмещающих выработку породах по критерию Хука – Брауна [15].

На рис. 3 проиллюстрированы результаты численного моделирования направлений главных действующих напряжений в соляном породном массиве, вмещающем горную выработку, полученные с применением пакета программ [16]. Так как породный контур выработки находится в напряженном состоянии, близком к одноосному (см. рис. 3), то постановка задачи по оценке напряженного состояния рассматриваемой части массива горных пород в значительной степени упрощается: можно ограничиться использованием критерия Кулона – Мора [6].

Капитальные выработки (выработки околостольного двора и выработки главных направлений) на рудниках ВКМС сооружают, как правило, в достаточно однородных пластичных породах (например, в подстилающей каменной соли). Поэтому размеры области неупругих деформаций, определяющих формирование зоны расслоения в породах кровли горных выработок, можно определить из аналитического решения упругопластической задачи о напряженно-деформированном состоянии пород вокруг выработки круглой формы на основе известного решения задачи Ламе [17].

Условия, влияющие на величину размера свода обрушения в кровле выработки

Используем решение задачи о необходимой активной длине анкера [18] для определения величины h_{∞} , характеризующей расстояние от контура горной выработки круглой формы

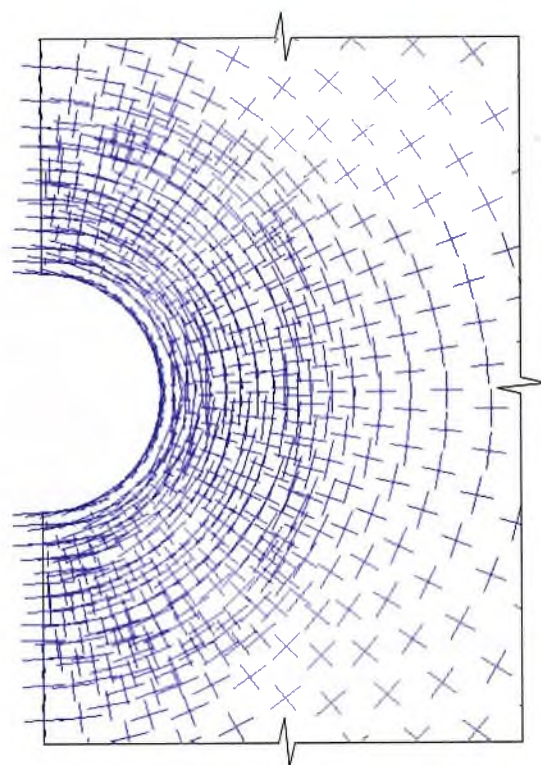


Рис. 3. Результаты численного моделирования направлений главных действующих напряжений в породном массиве, вмещающем горную выработку

до границы области породного массива, не подвергающегося деформациям ползучести в приконтурном массиве. Это соответствует условию $\sigma_i \leq \sigma_\infty$:

$$h_\infty = R \sqrt[4]{\frac{3}{(\sigma_\infty / \gamma H_{\text{пр}})^2 - (1 - 2\mu)^2}}, \quad (4)$$

где σ_i — интенсивность действующих напряжений; σ_∞ — предел длительной прочности пород кровли выработки; R — радиус

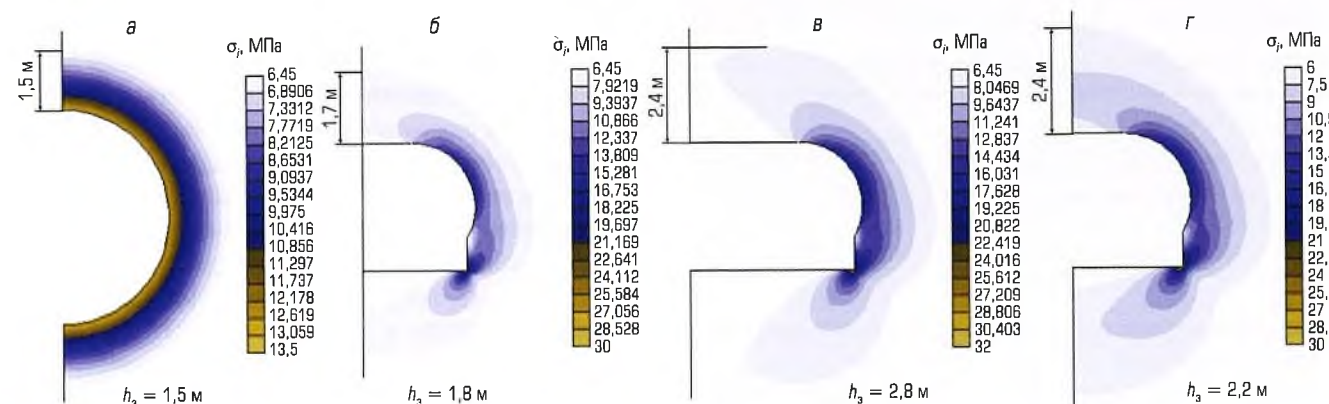


Рис. 4. Области распределения интенсивности напряжений при условии $\sigma_i \geq \sigma_\infty$:

а — $L = h = 5,5$ м, $\gamma H_{\text{пр}}/\sigma_{\text{сж}} = 0,3$, $k_\infty = 0,3$; б — $L = 5,5$ м, $h = 3,1$ м, $\gamma H_{\text{пр}}/\sigma_{\text{сж}} = 0,3$, $k_\infty = 0,3$; в — $L = 8$ м; $h = 3,1$ м; $\gamma H_{\text{пр}}/\sigma_{\text{сж}} = 0,3$, $k_\infty = 0,3$; г — $L = 5,5$ м; $h = 3,1$ м; $\gamma H_{\text{пр}}/\sigma_{\text{сж}} = 0,4$, $k_\infty = 0,3$; h_3 — величина, рассчитанная по формуле (5)

поперечного сечения горной выработки; γ — удельный вес вышележащих пород; $H_{\text{пр}}$ — приведенная глубина залегания кровли горной выработки, μ — коэффициент Пуассона.

В таком случае мощность зоны возможного разрушения пород для упругого решения задачи о круглой выработке определяются по формуле

$$h_3 = h_\infty - R = R \left(\sqrt[4]{\frac{3}{(\sigma_\infty / \gamma H_{\text{пр}})^2 - (1 - 2\mu)^2}} - 1 \right). \quad (5)$$

В действительности капитальные (и подготовительные) выработки на ВКМС преимущественно имеют размеры, когда ширина выработки превышает ее высоту.

Рассмотрим решение плоской задачи формирования напряженно-деформированного состояния изотропного упругопластического породного массива, вмещающего одиночную горную выработку, методом математического моделирования в конечно-элементной постановке [16] для выработок разного размера. Применяемую в [16] модель деформирования соляных пород широко используют для решения задач различных типов, связанных с вязкоупругопластическим поведением соляных пород во вмещающем выработки массиве. Апробацию модели проводили на основе имеющихся натурных данных. Более подробно результаты описаны в [19, 20].

Результаты расчетов приведены на рис. 4. Величина h_3 рассчитана по формуле (5).

Результаты выполненных расчетов показывают, что условия формирования зон концентрации интенсивности напряжений во вмещающем одиночную выработку породном массиве обуславливают их округлую форму.

С учетом того, что применяемые на рудниках ВКМС комбайновые комплексы с целью обеспечения устойчивости горных выработок формируют их поперечное сечение сводчатой формы, созданные зоны концентрации напряжений определяют в кровле и почве выработок.

Сопоставление результатов исследований, проведенных методом математического моделирования, с результатами расчетов,

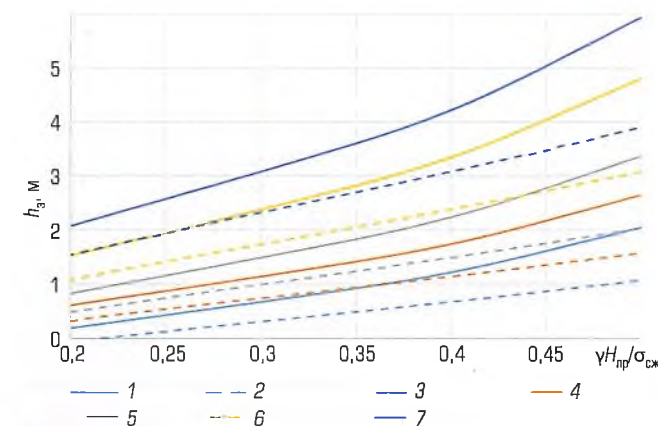


Рис. 5. Зависимости h_3 от $\gamma H_{\text{пр}}/\sigma_{\text{сж}}$:

1 — $k_\infty = 0,3$ м; 2 — $k_\infty = 0,4$ м; 3 — $L = 3,2$ м, $h = 3,1$ м; 4 — $L = 4,3$ м, $h = 2,6$ м; 5 — $L = 5,5$ м, $h = 3,1$ м; 6 — $L = 8$ м, $h = 3,1$ м; 7 — $L = 10$ м, $h = 3,1$ м

выполненных с использованием соотношения (5), показывает удовлетворительную сходимость при различных условиях действующего горного давления.

Для вариантов, представленных на рис. 4, б–г, в формуле (5) полагали $R = (L + h)/4$, где L — максимальная ширина выработки в проходке, h — высота выработки.

Таким образом, при определении характерных параметров горных выработок формула (5) примет следующий вид:

$$h_3 = \frac{(L + h)}{4} \sqrt[4]{\frac{3}{(k_\infty \sigma_{\text{сж}} / \gamma H_{\text{пр}})^2 - (1 - 2\mu)^2}} - \frac{h}{2}, \quad (6)$$

где k_∞ — коэффициент длительной прочности пород кровли выработки; $\sigma_{\text{сж}}$ — предел мгновенной прочности пород кровли выработки.

Формула (6) справедлива для соотношения горного давления и прочности вмещающих пород, соответствующего неравенству

$$\frac{k_\infty}{\sqrt{3 + (1 - 2\mu)^2}} < \frac{\gamma H_{\text{пр}}}{\sigma_{\text{сж}}} < \frac{k_\infty}{\sqrt{1 - 2\mu}}. \quad (7)$$

Графики зависимости высоты зоны возможного разрушения пород в кровле от отношения горного давления к прочности вмещающих пород в соответствии с формулой (6) представлены

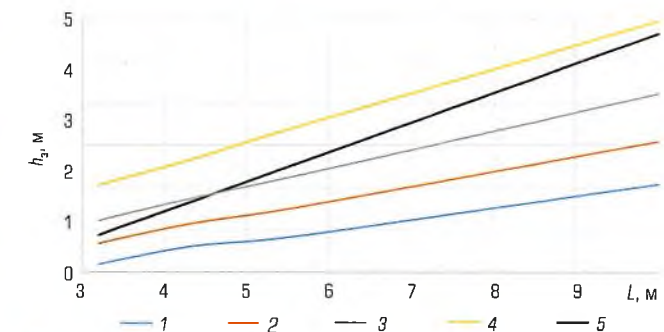


Рис. 6. Зависимости h_3 от L :

1, 2, 3, 4 — $\gamma H_{\text{пр}}/\sigma_{\text{сж}} = 0,2; 0,3; 0,4$ и $0,5$ соответственно; 5 — $h_3 = 0,7 L_p$

на рис. 5. Графики построены для $\sigma_\infty = 0,3 \sigma_{\text{сж}}$; $\sigma_{\text{сж}} = 21,5$ МПа.

Полученные зависимости (см. рис. 5) показывают, что с ростом глубины расположения выработки, уменьшением прочности вмещающих пород, увеличением ширины выработки в проходке высота зоны возможного разрушения в кровле увеличивается.

На рис. 6 приведены графики зависимости высоты зоны возможного разрушения в кровле выработки от ширины выработки: цветные линии соответствуют формуле (6), черная — формуле (2).

Установлено, что при значении горного давления $\frac{\sigma_{\text{сж}}}{\gamma H_{\text{пр}}} \leq 0,3$ высота свода возможного разрушения, определенная по формуле (2), значительно превышает ее величину, рассчитанную по формуле (6). Это приводит к избыточной материалоемкости при выборе параметров крепления и типа крепи горных выработок.

Заключение

Таким образом, в рамках проведенных исследований выполнено уточнение расчетных методов определения высоты зоны возможного разрушения пород в кровле выработки h_3 . Она определяется высотой зоны реализации необратимых пластических деформаций в кровле в соответствии с соотношением (6). В границах этой зоны определяют риск формирования разрушений и последующих вывалов пород для горных выработок ВКМС.

Библиографический список

1. Eremenko V. A., Neguritsa D. L. Efficient and active monitoring of stresses and strains in rock masses // Eurasian Mining. 2016. No. 1. P. 21–24. DOI: 10.17580/em.2016.01.02
2. Cheskidov V. V., Lipina A. V., Melnichenko I. A. Integrated monitoring of engineering structures in mining // Eurasian Mining. 2018. No. 2. P. 18–21. DOI: 10.17580/em.2018.02.05
3. Трофимов А. В., Кириин А. П., Румянцев А. Е., Яваров А. В. Применение численного моделирования для определения оптимальных параметров метода полной раз-
4. Krinitsyn R. V., Khudyakov S. V. Designing support for narrow rib pillars with subvertical fractures // Eurasian Mining. 2017. No. 2. P. 16–19. DOI: 10.17580/em.2017.02.04
5. Максимов А. Л. Горное давление и крепь выработок. — М.: Недра, 1973. — 287 с.
6. Wittke W. Felsmechanik: Grundlagen für wirtschaftliches Bauen im Fels. — Berlin: Springer-Verlag, 1984. — 1054 s.
7. Napola J. R., Vining C. A. Considerations for effective ground support in evaporites // International Journal of Mining Science and Technology. 2019. Vol. 29. Iss. 1. P. 113–118.

8. Zhao Yanhai, Wang Shuren, Zou Zhengsheng, Ge Linlin, Cui Fang. Instability characteristics of the cracked roof rock beam under shallow mining conditions // International Journal of Mining Science and Technology. 2018. Vol. 28. Iss. 3. P. 437–444.
9. Разумов Е. А., Зайтдинов Д. Ф., Гречишкин П. В., Позолотин А. С., Грабовский В. А. Опыт поддержания широких сопряжений горных выработок с применением двухуровневой анкерной крепи в условиях шахты МУК-96 // Уголь. 2013. № 7. С. 31–34.
10. Гречишкин П. В., Позолотин А. С., Зайтдинов Д. Ф., Шаров В. Н. Оценка эффективности двухуровневого анкерного крепления сопряжений горных выработок угольных шахт // Горный журнал. 2015. № 8. С. 48–52. DOI: 10.17580/gzh.2015.08.11
11. Barton N., Baotang Shen. Risk of shear failure and extensional failure around over-stressed excavations in brittle rock // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2017. Vol. 9. Iss. 2. P. 210–225.
12. Perras M. A., Diederichs M. S. Predicting excavation damage zone depths in brittle rocks // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2016. Vol. 8. Iss. 1. P. 60–74.
13. Гирфанов И. И., Ремеев М. М., Сотников О. С., Лутфуллин А. А., Мухлиев И. Р. Выбор оптимального критерия прочности для терригенных отложений пашийского горизонта Ташлийской площади Ромашкинского месторождения // Георесурсы. 2019. Т. 21. № 4. С. 114–118.
14. Ескалиев М. Е., Кожамкулова Ж. Ж., Суранчиева З. Т., Отелбаева А. К. Алгоритм численного моделирования упругопластической задачи вблизи горной выработки

«GORNYI ZHURNAL», 2021, № 4, pp. 34–38
DOI: 10.17580/gzh.2021.04.04

Assessment of instability initiation in exposed salt rock roofs

Information about authors

D. N. Shkuratskiy¹, CEO, Candidate of Engineering Sciences
D. S. Chernopazov¹, Head of Laboratory of geomechanics, Candidate of Engineering Sciences, Dmitry.Chernopazov@uralkali.com
I. B. Vaulina¹, Senior Researcher

¹Geomechanics Research Laboratory, VNIIGalurgii, Perm, Russia

Abstract

Stability of rocks is the main requirement for the safe operation of mines. For this purpose, certain measures are applied for the protection and support of underground openings, including roof support design and roof arrangement in the most stable rocks. Stability assessment of underground excavations is largely related to their roof stability. Determination of possible instability conditions in mine roofs governs the choice of support system design and parameters of mine excavations. The Upper Kama Potash Salt Deposit represents a stratified layer of solid salt rocks. Roof instability develops as stratification and roof collapse. The Mohr–Coulomb criterion of coherent rocks is currently used to estimate parameters of a possible damage zone in the exposed roof. This criterion allows evaluating shear plane angles in roof rocks and, as a result, finding parameters of the possible collapse zone. The experience of mining operations in the Upper Kama deposit shows different failure conditions as against the Mohr–Coulomb criterion as the stress state is scarcely included in the criterion used. This study is an attempt to assess parameters of rock exposures by solving a Lamé problem in terms of a single mine excavation.

The analytical results were compared with the parameters obtained from the plane elasticity solutions by the finite element method. Based on the implemented studies, an engineering approach is developed for the assessment of anticipated instability parameters in exposed roofs in horizontal excavations driven in salt rocks.

Keywords: Upper Kama Potash Salt Deposit, salt rocks, strength, failure, mine excavation, mathematical modeling, creep.

References

1. Eremenko V. A., Neguritsa D. L. Efficient and active monitoring of stresses and strains in rock masses. *Eurasian Mining*. 2016. No. 1. pp. 21–24. DOI: 10.17580/em.2016.01.02
2. Cheskidov V. V., Lipina A. V., Melnichenko I. A. Integrated monitoring of engineering structures in mining. *Eurasian Mining*. 2018. No. 2. pp. 18–21. DOI: 10.17580/em.2018.02.05
3. Trofimov A. V., Kirkin A. P., Rumyantsev A. E., Yavarov A. V. Use of numerical modeling 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

- в транстном массиве // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли : сб. тр. Всероссийской конф., посвященной 80-летию ад. М. В. Курлени, с участием иностранных ученых. – Новосибирск : Ин-т горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 2011. Т. 1.
15. Jianping Zuo, Jiayi Shen. The Hoek-Brown Failure criterion – From theory to application. – Singapor : Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2020. – 225 p.
16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011610648. Программа для решения плоских задач упруговязкопластичности методом конечных элементов (Earth – 2D.1) / М. В. Гилев, С. А. Константинова, С. А. Чернопазов, Д. С. Чернопазов // Единый реестр российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных ; дата регистрации 11.01.2011.
17. Самуль В. И. Основы теории упругости и пластичности. – М. : Высшая школа, 1982. – 264 с.
18. Константинова С. А., Поносова Т. И. Расчет параметров анкерной крепи распорного типа выработок в соляных породах // Известия вузов. Горный журнал. 1984. № 1.
19. Константинова С. А., Чернопазов С. А. Оценка реологических показателей соляных пород по данным натурных наблюдений за вертикальными деформациями междукammerных целиков // ФТПРПИ. 2007. № 1. С. 21–27.
20. Константинова С. А., Чернопазов С. А. Развитие наследственной модели деформирования и разрушения соляных пород // ФТПРПИ. 2004. № 1. С. 50–61. **ГЖ**

4. Krinitsyn R. V., Khudyakov S. V. Designing support for narrow rib pillars with subvertical fractures. *Eurasian Mining*. 2017. No. 2. pp. 16–19. DOI: 10.17580/em.2017.02.04
5. Maksimov A. P. Overburden pressure and mine support design. Moscow : Nedra, 1973. 287 p.
6. Wittke W. Felsmechanik: Grundlagen für wirtschaftliches Bauen im Fels. Berlin : Springer-Verlag, 1984. 1054 s.
7. Napola J. R., Vining C. A. Considerations for effective ground support in evaporites. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019. Vol. 29, Iss. 1. pp. 113–118.
8. Zhao Yanhai, Wang Shuren, Zou Zhengsheng, Ge Linlin, Cui Fang. Instability characteristics of the cracked roof rock beam under shallow mining conditions. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018. Vol. 28, Iss. 3. pp. 437–444.
9. Razumov E. A., Zayatinov D. F., Grechishkin P. V., Pozolotin A. S., Grabovskiy V. A. Experience of active and passive support and reinforcement to maintain wide span junctures in mine MUK-96. *Ugol*. 2013. No. 7. pp. 31–34.
10. Grechishkin P. V., Pozolotin A. S., Zayatinov D. F., Sharov V. N. Estimate of efficiency of two-level rock bolting at junctions in coal mines. *Gornyi Zhurnal*. 2015. No. 8. pp. 48–52. DOI: 10.17580/gzh.2015.08.11
11. Barton N., Baotang Shen. Risk of shear failure and extensional failure around over-stressed excavations in brittle rock. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2017. Vol. 9, Iss. 2. pp. 210–225.
12. Perras M. A., Diederichs M. S. Predicting excavation damage zone depths in brittle rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2016. Vol. 8, Iss. 1. pp. 60–74.
13. Girfanov I. I., Remeev M. M., Sotnikov O. S., Lutfullin A. A., Mukhliev I. R. Selection of optimal strength criteria for the terrigenous Pashiy horizon of the Romashkinskoe field Tashliyskaya area. *Georesources*. 2019. Vol. 21, No. 4. pp. 114–118.
14. Eskaliev M. E., Kozhamkulova Zh. Zh., Suranchieva Z. T., Otelbaeva A. K. Numerical modeling algorithm for elastoplastic problem in surrounding transtropic rock mass around an underground excavation. *Geodynamics and Stress State of the Earth's Interior : Proceedings of the All-Russian Conference on Commemoration of the 80th Anniversary of Academician M. V. Kurlenya with Participation of Foreign Scientists*. Novosibirsk : Institut gornogo dela im. N. A. Chinalaka SO RAN, 2011. Vol. I.
15. Jianping Zuo, Jiayi Shen. The Hoek-Brown Failure criterion – From theory to application. Singapor : Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2020. 225 p.
16. Gilev M. V., Konstantinova S. A., Chernopazov S. A., Chernopazov D. S. Software State Registration Certificate No. 2011610648. The FEM-based elasto-visco-plasticity program (Earth – 2D.1). *Unified Register of Russian Programs for Computers and Databases*. Registered: 11.01.2011.
17. Samul V. I. Fundamentals of elasticity and plasticity. Moscow : Vysshaya shkola, 1982. 264 p.
18. Konstantinova S. A., Ponosova T. I. Expandable rock bolt design for salt mines. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 1984. No. 1.
19. Konstantinova S. A., Chernopazov S. A. Estimating salt rocks rheology by in-situ observations of vertical deformation of interchamber pillars. *Journal of Mining Science*. 2007. Vol. 43, Iss. 1. pp. 17–23.
20. Konstantinova S. A., Chernopazov S. A. Development of hereditary model for deformation and failure of salt rocks. *Journal of Mining Science*. 2004. Vol. 40, Iss. 1. pp. 45–56.

УДК 553.63

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕЛЬНОГО ВЕСА ПОРОД, ПЕРЕКРЫВАЮЩИХ ПРОМЫШЛЕННУЮ ТОЛЩУ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СОЛЕЙ



Д. С. ЧЕРНОПАЗОВ,
заведующий лабораторией геомеханики,
канд. техн. наук,
Dmitriy.Chernopazov@uralkali.com



Д. Н. ШКУРАТСКИЙ,
генеральный директор, канд. техн. наук



А. И. СЕКУНЦОВ,
старший научный сотрудник, канд. техн. наук

АО «ВНИИ Галургии», Пермь, Россия

Введение

Подземный способ добычи полезных ископаемых основывается на выборе системы разработки, обеспечивающей безопасные условия ведения горных работ [1–3]. К основной сложности реализации подземного способа освоения запасов месторождений соляных пород относится легкая растворимость последних. В связи с этим при обосновании системы подземной разработки соляных пород и определении ее параметров следует исходить из условия обеспечения сохранности перекрывающих пород, слагающих водозащитную толщу, с целью защиты рудника от затопления [4–6].

Оработку запасов Верхнекамского месторождения солей (ВКМС) ведут по камерной системе разработки с оставлением жестких междукammerных ленточных целиков и закладкой очистных камер.

Оценка несущей способности междукammerных целиков

Требуемую жесткость междукammerных целиков с целью исключения разрушения пород водозащитной толщи обеспечивают на основе оценки их параметров, которые определяют, исходя из несущей способности целиков и действующей на

Выполнен анализ геологических условий залегания пород надсоляной толщи Верхнекамского месторождения солей с целью определения зависимостей распределения различных геологических разностей, формирующих горное давление на уровне промышленных пластов.

С учетом выявленных особенностей геологического строения оценен удельный вес перекрывающих пород.

Результаты исследований приведены в виде площадного распределения величины удельного веса пород подрабатываемой толщи в пределах Верхнекамского месторождения солей.

Ключевые слова: Верхнекамское месторождение солей, надсоляная толща, горное давление, удельный вес пород, плотность пород, подземный способ добычи, параметры системы разработки.

DOI: 10.17580/gzh.2021.04.05

них нагрузок по критерию степени нагружения междукammerных целиков [7]:

$$C = \frac{\xi \gamma H_0}{b k_f \sigma_{от}}$$

где ξ – коэффициент, учитывающий изменение нагрузки на междукammerные целики вследствие влияния горнотехнических факторов; γ – удельный вес налегающей толщи пород, Н/м³; H_0 – максимальное значение расстояния от земной поверхности до кровли отрабатываемого пласта на рассматриваемом участке шахтного поля, м; l – межосевое расстояние, м; b – расчетная ширина междукammerных целиков, м; k_f – коэффициент формы междукammerного целика; $\sigma_{от}$ – прочность пород в массиве в пределах расчетной высоты междукammerных целиков m , МПа, определяемая по формуле [7]

$$\sigma_{от} = k_0 \sigma_0$$

где k_0 – коэффициент, учитывающий влияние горнотехнических факторов; σ_0 – эквивалентная (приведенная) прочность пород, слагающих междукammerные целики, МПа.

Эквивалентная прочность пород, слагающих междукammerные целики в пределах их расчетной высоты m , определяется по формуле

$$\sigma_0 = \frac{m}{\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\sigma_{ci}}}$$

где m_i – мощность i -го слоя породы ($i = 1, 2 \dots n$), м; n – число слоев разнопрочных пород, слагающих междукammerные целики в пределах их расчетной высоты; σ_{ci} – расчетная прочность при сжатии стандартных образцов i -го слоя породы, МПа.

© Чернопазов Д. С., Шкуратский Д. Н., Секунцов А. И., 2021

Несущую способность целиков оценивают по данным испытаний физико-механических свойств пород.

Условия формирования естественного горного давления в массиве горных пород до начала ведения горных работ на единицу выделенного элементарного объема определяются значениями нормальных напряжений $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ (рис. 1) [8].

Естественное напряженное состояние массива горных пород формируется главным образом силами гравитации и зависит от горно-геологических условий залегания пород подрабатываемой толщи и гипсометрии отрабатываемых пластов.

Для пластичных горных пород, согласно гипотезе А. Гейма, распределение природных (естественных) напряжений в породном массиве является гидростатическим [9].

Гравитационная составляющая горного давления при горизонтальном напластовании различных горных пород изменяется по глубине, т. е. $\gamma = \gamma(z)$. Вертикальная составляющая естественных напряжений может быть определена как

$$\sigma_z = \int_0^H \gamma(z) dz,$$

где H — глубина рассматриваемой точки массива, м; γ — удельный вес пород, 10^4 Н/м^3 .

Таким образом, в упрощенном виде действующая на разрабатываемую породную толщу нагрузка определяется исходя из условия

$$\sigma_z = \gamma H.$$

При этом зачастую величину удельного веса пород принимают усредненно равной $\gamma = 2,2 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$ [7, 10]. Данная величина была определена ранее в процессе исследований [11], которые проводили в условиях меньшей степени изученности месторождения (главным образом, на первых введенных в строй рудниках — Соликамском и Березниковском участках ВКМС).

Анализ плотностных характеристик пород по геологоразведочным скважинам

Следует отметить, что первоочередное освоение ВКМС осуществляли в наиболее благоприятных горно-геологических условиях, характеризующихся небольшими глубинами залегания пластов и большими их мощностями, а также низким содержанием нерастворимого остатка, который главным образом определяет прочность вмещающих пород и, следовательно, устойчивость выработок.

В настоящее время происходит активное вовлечение в разработку новых площадей месторождения, характеризующихся увеличением глубины залегания промышленных пластов. Возникает необходимость более детального учета факторов, определяющих безопасное ведение горных работ. Поставленная задача может быть решена как путем уточнения действующих инженерных подходов [7], так и использования средств математического моделирования [5, 6, 12, 13].

Анализ более современных данных, полученных по результатам бурения детальных геологоразведочных и контрольно-стволовых скважин в различных частях Верхнекамского месторождения, демонстрирует существенную неоднородность удельного веса породных слоев как по разрезу скважин, так и в зависимости от их расположения и находится в диапазоне $(1,44 \div 3,51) \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$, в среднем составляя $2,35 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$. В табл. 1 приведены средние значения удельного веса пород по данным геологических

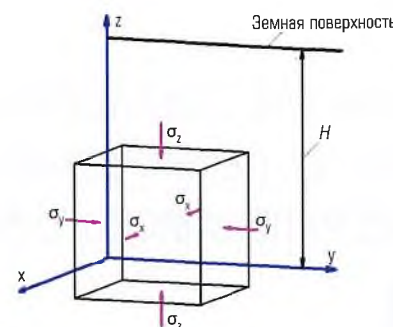


Рис. 1. Схема к определению главных нормальных напряжений в массиве горных пород

исследований плотности пород надсоляной толщи в границах ВКМС.

Результаты анализа условий распределения пород, перекрывающих промышленные сильвинитовые пласты ВКМС [14], показывают их значительную неоднородность. С учетом сложного геологического залегания породной толщи была поставлена задача по оценке распределения удельного веса пород перекрывающей промышленные пласты толщи в границах средней и южной частей ВКМС, на площадях которых ведут освоение запасов месторождения.

Решение поставленной задачи основывалось на использовании полученных средних значений удельного веса пород в границах ВКМС.

Для этого по данным колонок геологоразведочных скважин выполнена оценка удельного веса путем использования осредненных данных, представленных в табл. 1 для геологоразведочных скважин, по которым отсутствуют данные об удельном весе опробованных пород. Средневзвешенные значения удельного веса пород (Н/м^3) можно определить из выражения

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i m_i}{H_{AB}},$$

где n — число учитываемых породных слоев до кровли пласта АБ; γ_i — удельный вес i -го породного слоя, Н/м^3 ; m_i — мощность i -го породного слоя, м; H_{AB} — глубина залегания кровли пласта АБ, м.

На основе полученных данных выполнена оценка площадного распределения удельного веса пород над верхним промышленным сильвинитовым пластом АБ путем площадной интерполяции данных расчета среднего удельного веса пород, определенных для геологоразведочных скважин. Полученные результаты интерпретации представлены на рис. 2 и 3.

В результате выполненных исследований подтверждены ранее полученные представления об удельном весе вышележащих пород. Так, для условий Соликамского и Березниковского участков ВКМС удельный вес этих пород составляет $(2,15 \div 2,3) \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$.

Однако в целом по месторождению выявлено неоднородное изменение значений удельного веса. Так, за границами Соликамского, Березниковского, Боровского и северной части Половодского участков ВКМС удельный вес в основном превышает значение $2,2 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$.

Таблица 1. Данные исследований по определению удельного веса пород подрабатываемой толщи

Породная толща	Порода	Среднее значение удельного веса пород, 10^4 Н/м^3	Породная толща	Порода	Среднее значение удельного веса пород, 10^4 Н/м^3
Четвертичные отложения Q	Дресва, глина	1,74	Соляно-мергельная толща (СМТ)	Глины и мергели	2,55
	Дресва, аргиллит, суглинок	1,64		Мергель	2,41
	Суглинок	2,21		Песчаник	2,30
	Суглинок	2,00		Ангидрит с мергелем	2,60
	Супесь (песчаник)	2,20		Алеврит	2,75
	Глина с гравием	2,21		Гипс	2,28
	Щебень и дресва	2,45		Глинисто-гипсовая порода	2,39
	Глина	2,60		Мергель доломитизированный	2,34
Пестроцветная толща (ПЦТ)	Песчаник	2,47		Мергель-гипсовая порода	2,24
	Аргиллит	2,48		Мергель глинистый	2,23
	Алеврит	2,44		Известняк	2,52
	Конгломерат	2,61		Ангидрит	2,52
	Песчаник известковистый	2,49		Доломитовая порода	1,49
Терригенно-карбонатная толща (ТКТ)	Известняк	2,55		Конгломерат	2,24
	Мергель	2,50		Песчаник известковистый	2,56
	Известняк	2,52		Известняк загипсованный	2,30
	Глина	2,41		Каменная соль	2,19
	Песчаник	2,47		Брекчиевая порода	2,28
	Аргиллит	2,55		Известняк окремененный	2,33
	Алеврит	2,55		Мергель кавернозный	2,27
	Доломит	2,75		Мергель глинистый алевритистый	2,38
	Известняк окремененный	2,65		Мергель глинистый известково-доломитовый	2,14
	Известняк с мергелем	2,31		Брекчия	2,05
	Известняк доломитизированный	2,47	Переходная пачка (ПП)	Мергель с прослоями гипса и доломита	2,25
	Известняк глинистый	2,58		Мергель	1,95
	Известняк с гипсом	2,53		Каменная соль	2,17
	Гипс	2,75	Покровная каменная соль (ПКС)	Карбонатно-сульфатная порода	1,88
	Мергель-гипсовая порода	2,53		Мергель глинистый	2,17
	Гравелит	2,52	Сильвинито-карналлитовая зона (СКЗ)	Каменная соль	2,14
	Суглинок	2,09		Карналлит	1,66
	Песчаник известковистый	2,49		Каменная соль	2,21
	Алеврит известковистый	2,53		Сильвинит пестрый	2,15
				Галит-карналлитовая порода	1,50
				Сильвинит гипергенный	2,07

В результате выполненных исследований установлено, что в средней части ВКМС (см. рис. 2) на 56 % площади участков удельный вес пород налегающей толщи составляет $(2,08 \div 2,3) \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$ с увеличением в восточной части Половодского — $(2,3 \div 2,47) \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$ и южной части Ново-Соликамского — $(2,3 \div 2,44) \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$ участков.

В южной части ВКМС (см. рис. 3) наименьшие значения $(2,14 \div 2,3) \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$ удельного веса пород отмечены на 14 % площади участков в контуре Березниковского, западной части Быгельско-Троицкого и центральной части Усть-Яйвинского участков. На остальной площади южной части месторождения удельный вес подрабатываемой толщи пород возрастает в южном и восточном направлениях до значения $2,45 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$.

Полученное распределение удельного веса пород в условиях ВКМС позволяет более корректно оценивать степень нагружения междукамерных целиков.

Так, установлено, что степень нагружения междукамерных целиков линейно зависит от удельного веса пород подрабатываемой толщи. Это позволяет определить влияние данного параметра на характеристики системы разработки в части оценки изменения ширины междукамерных целиков при заданной степени нагружения и изменения степени нагружения при фиксированных параметрах системы разработки.

В табл. 2 приведены параметры системы разработки, определенные согласно нормативным требованиям [7]. Степень нагружения целиков рассчитана для значений γ в диапазоне $(2 \div 2,6) \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$

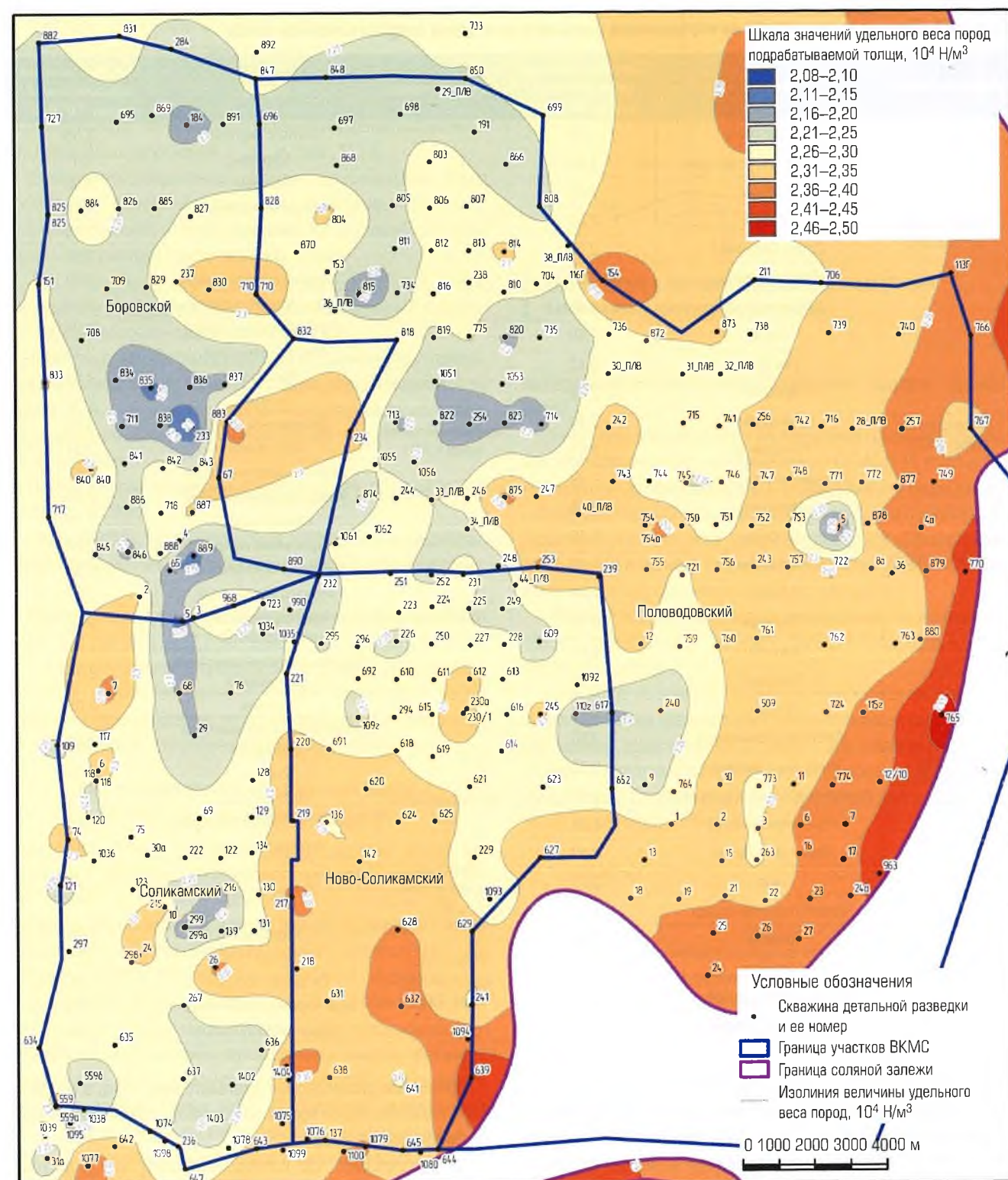


Рис. 2. Изообласти распределения удельного веса подрабатываемой толщи пород в средней части ВКМС

при фиксированных параметрах системы разработки (ширине и высоте междукammerных целиков). По результатам выполненных расчетов установлено, что степень нагружения целиков по пласту Крп1, отработка которого на Верхнекамском месторождении является приоритетной в силу большей мощности пласта, при повышенном

значении γ превышает допустимое значение [7]. Это обуславливает риск низкой устойчивости таких целиков, что противоречит безопасным условиям подработки водозащитной толщи.

Количественная оценка зависимости изменения удельного веса подрабатываемой толщи пород на величину извлечения

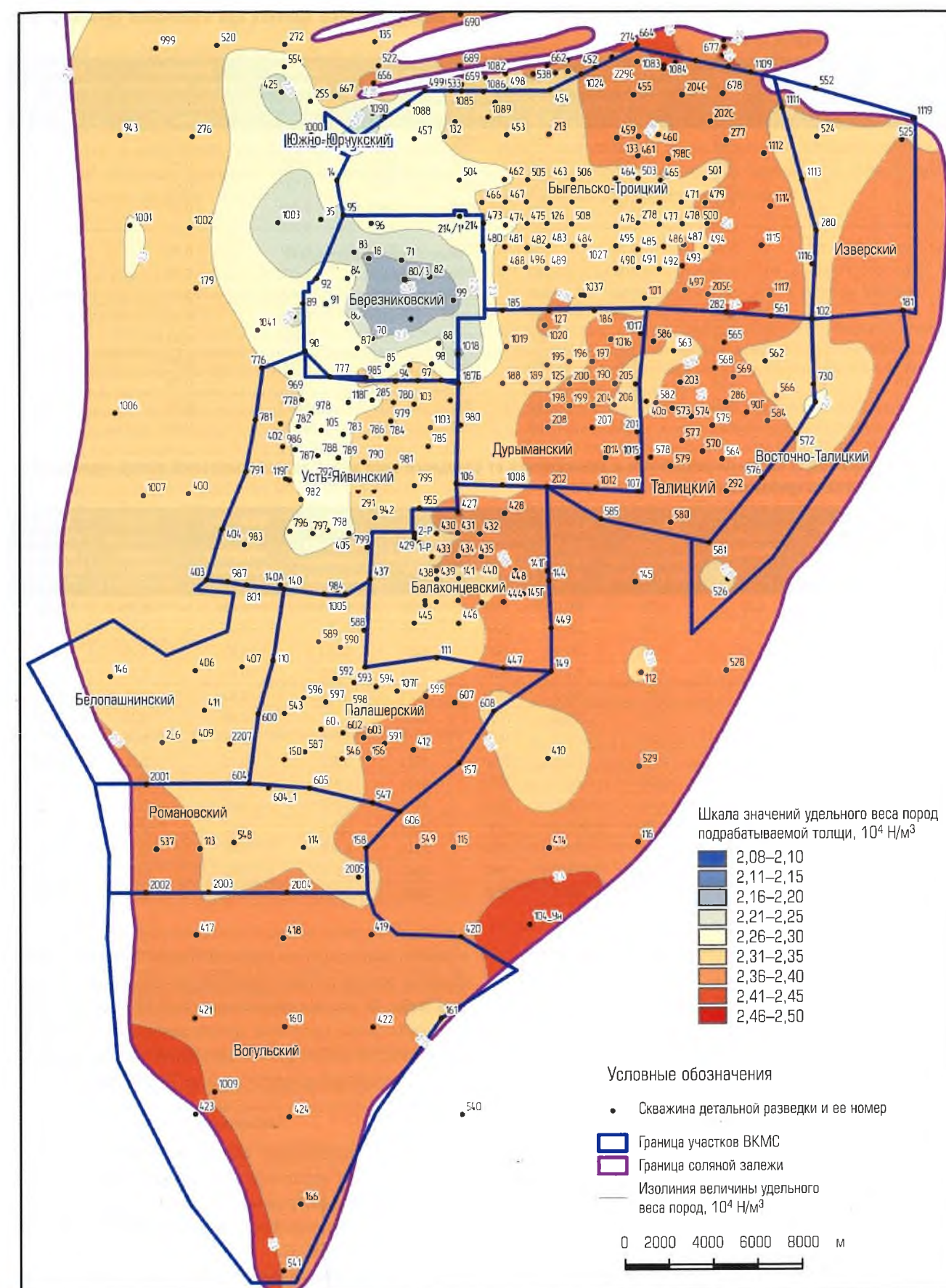


Рис. 3. Изообласти распределения удельного веса подрабатываемой толщи пород в южной части ВКМС

Таблица 2. Параметры системы разработки и степень нагружения междукammerных целиков при изменении удельного веса пород подрабатываемой толщи

Плост	Ширина камеры a_0 , м	Ширина междукammerного целика b_0 , м	Вынимаемая мощность m_0 , м	Удельный вес пород подрабатываемой толщи γ , 10^4 Н/м ³	Глубина кровли пласта H , м	Эквивалентная прочность пород $\sigma_{\text{см}}$, МПа	Прочность пород $\sigma_{\text{см}}$, МПа	Степень нагружения междукammerного целика C	Допустимая степень нагружения междукammerного целика $[C]$	Степень заполнения камер закладочным материалом A
АБ	3,2	8,3	3,20	2,00	350	1892	4338	0,188	0,40	0,75
КрII	5,5	6	5,34	2,00	358	2050	3372	0,361	0,40	0,75
АБ	3,2	8,3	3,20	2,10	350	1892	4338	0,197	0,40	0,75
КрII	5,5	6	5,34	2,10	358	2050	3372	0,379	0,40	0,75
АБ	3,2	8,3	3,20	2,20	350	1892	4338	0,206	0,40	0,75
КрII	5,5	6	5,34	2,20	358	2050	3372	0,397	0,40	0,75
АБ	3,2	8,3	3,20	2,30	350	1892	4338	0,216	0,40	0,75
КрII	5,5	6	5,34	2,30	358	2050	3372	0,415	0,40	0,75
АБ	3,2	8,3	3,20	2,40	350	1892	4338	0,225	0,40	0,75
КрII	5,5	6	5,34	2,40	358	2050	3372	0,433	0,40	0,75
АБ	3,2	8,3	3,20	2,50	350	1892	4338	0,235	0,40	0,75
КрII	5,5	6	5,34	2,50	358	2050	3372	0,451	0,40	0,75
АБ	3,2	8,3	3,20	2,60	350	1892	4338	0,244	0,40	0,75
КрII	5,5	6	5,34	2,60	358	2050	3372	0,469	0,40	0,75

Таблица 3. Параметры системы разработки в зависимости от удельного веса пород подрабатываемой толщи, удовлетворяющие нормативным требованиям [4]

Плост	Ширина камеры a_0 , м	Ширина междукammerного целика b_0 , м	Вынимаемая мощность m_0 , м	Удельный вес пород подрабатываемой толщи γ , 10^4 Н/м ³	Глубина кровли пласта H , м	Эквивалентная прочность пород $\sigma_{\text{см}}$, МПа	Прочность пород $\sigma_{\text{см}}$, МПа	Степень нагружения междукammerного целика C	Допустимая степень нагружения междукammerного целика $[C]$	Степень заполнения камер закладочным материалом A	Степень извлечения полезного ископаемого ω
АБ	3,2	7,9	3,20	2,00	350,0	1892	4195	0,199	0,40	0,75	0,288
КрII	5,5	5,6	5,34	2,00	358,0	2050	3255	0,394	0,40	0,75	0,495
АБ	3,2	8,1	3,20	2,10	350,0	1892	4267	0,203	0,40	0,75	0,283
КрII	5,5	5,8	5,34	2,10	358,0	2050	3314	0,396	0,40	0,75	0,487
АБ	3,2	8,3	3,20	2,20	350,0	1892	4338	0,206	0,40	0,75	0,278
КрII	5,5	6	5,34	2,20	358,0	2050	3372	0,397	0,40	0,75	0,478
АБ	3,2	8,5	3,20	2,30	350,0	1892	4410	0,210	0,40	0,75	0,274
КрII	5,5	6,2	5,34	2,30	358,0	2050	3431	0,398	0,40	0,75	0,470
АБ	3,2	8,7	3,20	2,40	350,0	1892	4482	0,213	0,40	0,75	0,269
КрII	5,5	6,4	5,34	2,40	358,0	2050	3489	0,399	0,40	0,75	0,462
АБ	3,2	8,9	3,20	2,50	350,0	1892	4554	0,216	0,40	0,75	0,264
КрII	5,5	6,6	5,34	2,50	358,0	2050	3548	0,400	0,40	0,75	0,455
АБ	3,2	9,2	3,20	2,60	350,0	1892	4662	0,216	0,40	0,75	0,258
КрII	5,5	6,9	5,34	2,60	358,0	2050	3636	0,393	0,40	0,75	0,444

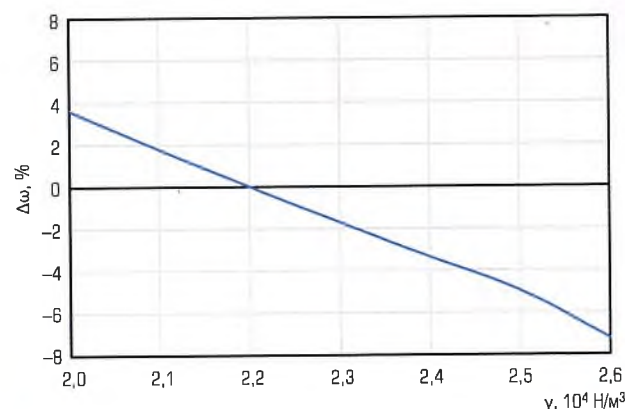


Рис. 4. Зависимость изменения степени извлечения полезного ископаемого от удельного веса пород подрабатываемой толщи

полезного ископаемого при заданной степени нагружения междукammerных целиков согласно нормативным требованиям [7] показала (табл. 3), что при увеличении γ от $2 \cdot 10^4$ Н/м³ до $2,6 \cdot 10^4$ Н/м³ необходимо извлечение ценного компонента из отработанных пластов требует увеличения ширины целиков на 1 м, что приводит к снижению ценности сырья на 10,9 % (рис. 4).

Заключение

В рамках выполненных исследований проанализированы условия залегания надсоляной толщи пород в пределах ВКМС и проведена оценка распределения удельного веса пород по данным геолого-геофизического опробования на площади центральной и южной частей ВКМС.

В результате выполненных исследований установлено, что удельный вес вышележащих пород составляет $(2,08 \div 2,5) \cdot 10^4$ Н/м³. При этом результаты выполненных исследований

показывают рост удельного веса пород налегающей толщи в восточном и южном направлениях в границах ВКМС, что обуславливает снижение устойчивости горных выработок, характерное для южной части месторождения.

В целом по результатам исследований установлено, что удельный вес вышележащих пород, равный или меньший $2,2 \cdot 10^4$ Н/м³, характерен для менее чем 5 % площади исследуемой части месторождения.

Библиографический список

1. Трофимов А. В., Румянцев А. Е., Господариков А. П., Киркин А. П. Неразрушающий ультразвуковой метод контроля прочности закладочного бетона на глубоких рудниках Талнаха // Цветные металлы. 2020. № 12. С. 28–33. DOI: 10.17580/tsm.2020.12.04
2. Кравцова О. А., Максимов В. И., Лебедева А. А., Коптев К. В. Опыт геолого-технологического картирования руд на примере Ждановского месторождения (Кольский полуостров) // Цветные металлы. 2020. № 12. С. 22–27. DOI: 10.17580/tsm.2020.12.06
3. 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
4. Poborska-Mlynarska K. Katastrofy wodne w górnictwie solnym na świecie – przyczyny, sposoby zwalczania, skutki // Przegląd Górniczy. 2018. Vol. 74. No. 6. P. 33–41.
5. Minkley W., Mühlbauer J., Lüdeling C. Dimensioning Principles in Potash and Salt: Stability and Integrity // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2016. Vol. 49. Iss. 11. P. 4537–4555.
6. Барях А. А., Губанова Е. А. О мерах охраны калийных рудников от затопления // Записки Горного института. 2019. Т. 240. С. 613–621.
7. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей (технологический регламент). – СПб.: ВНИИГ, 2008. – 95 с.
8. Баклашов И. В. Геомеханика: учебник: в 2 т. – М.: Изд-во МГГУ, 2004. – 457 с.
9. Макаров А. Б. Практическая геомеханика. Пособие для горных инженеров. – М.: Горная книга, 2006. – 391 с.
10. Völkner E., Liu W., Kühnlenz T., Hammer J., Fahland S. et al. Geological and constitutive models of generic bedded salt repositories for high-level radioactive waste in Germany // The Mechanical Behavior of Salt IX: Proceedings of the 9th Conference on the Mechanical Behavior of Salt. – Hannover, 2018.
11. Указания по охране зданий, сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок и охране рудников от затопления в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей. – Л.: ВНИИГ, 1985.
12. Vriens B., Seigneur N., Mayer K. U., Beckie R. D. Scale dependence of effective geochemical rates in weathering mine waste rock // Journal of Contaminant Hydrology. 2020. Vol. 234. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2020.103699
13. Wang G., Hou Z., Liao J., Liu J. The experimental study of the short- and long-term strength of Chinese highly impure rock salt // The Mechanical Behavior of Salt IX: Proceedings of the 9th Conference on the Mechanical Behavior of Salt. – Hannover, 2018.
14. Милютин А. Г. Геология полезных ископаемых: учебник и практикум. – М.: Юрайт, 2018. – 197 с. [ГК](#)

«GORNYI ZHURNAL», 2021, № 4, pp. 39–45
DOI: 10.17580/gzh.2021.04.05

Unit weight patterns of overlying rocks above commercial-value salt strata in the Upper Kama deposit

Information about authors

D. S. Chernopazov¹, Head of Laboratory of geomechanics, Candidate of Engineering Sciences, Omitriy.Chernopazov@uralkali.com

D. N. Shkuratskiy¹, CEO, Candidate of Engineering Sciences

A. I. Sekuntsov¹, Senior Researcher, Candidate of Engineering Sciences

¹Geomechanics Research Laboratory, VNIIG Galurgii, Perm, Russia

Abstract

Overburden pressure in commercial-value salt beds in the Upper Kama deposit governs the geotechnical conditions of underground mining operations.

Generally, the overburden pressure is determined by the gravitational effect of the overlying rocks. Therefore, the overburden pressure is mainly evaluated based on the unit weight of the overlying rocks. In this respect, the effective engineering estimate of the overburden pressure can use the averaged value of the unit weight of the overlying rocks.

This study is aimed to obtain patterns of unit weight of the overlying rocks within the limits of the Upper Kama Potash Salt Deposit.

The authors have analyzed the geological conditions of bedding above the rock salt strata in order to obtain the patterns of geological varieties which govern the overburden pressure in the commercial-value salt beds.

Using the revealed geological structure features, the unit weight of the overlying rocks is analyzed.

The research findings are presented as the unit weight per unit area of the overlying rocks in the Upper Kama deposit.

Keywords: Upper Kama Potash Salt Deposit, over-salt strata, overburden pressure, unit weight of rocks, rock density, underground mining method, mining parameters.

References

1. Trofimov A. V., Rumyantsev A. E., Gospodarikov A. P., Kirkin A. P. Non-destructive ultrasonic method of testing the strength of backfill concrete at deep Talnakh mines. *Tsvetnye Metally*. 2020. No. 12. pp. 28–33. DOI: 10.17580/tsm.2020.12.04

Неправильный учет удельного веса пород при выборе системы разработки может привести к излишнему нагружению сильвинитовых междукammerных целиков.

Поэтому использование в инженерных геомеханических расчетах уточненных значений удельного веса пород подрабатываемой толщи позволит более корректно определять параметры системы разработки, обеспечивая безопасность ведения горных работ и подработку перекрывающих пород.

2. Kravtsova O. A., Maksimov V. I., Lebedeva A. A., Koptev K. V. The practice of geological mapping of the Zhdanov deposit ores in the Kola peninsula. *Tsvetnye Metally*. 2020. No. 12. pp. DOI: 10.17580/tsm.2020.12.06
3. Trofimov A. V., Kirkin A. P., Rumyantsev 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. Poborska-Mlynarska K. Katastrofy wodne w górnictwie solnym na świecie – przyczyny, sposoby zwalczania, skutki. *Przegląd Górniczy*. 2018. Vol. 74. No. 6. pp. 33–41.
5. Minkley W., Mühlbauer J., Lüdeling C. Dimensioning Principles in Potash and Salt: Stability and Integrity. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016. Vol. 49. Iss. 11. pp. 4537–4555.
6. Baryakh A. A., Gubanov E. A. On flood protection measures for potash mines. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 240. pp. 613–621.
7. Guidelines for Mine Flooding Safety and Undermined Object Protection in the Upper Kama Potash Salt Deposit (Technical Regulations). Saint-Petersburg: VNIIG, 2008. 95 p.
8. Baklashov I. V. Geomechanics: tutorial: in two volumes. Moscow: Izdatelstvo MGGU, 2004. 457 p.
9. Makarov A. B. Practical geomechanics: tutorial for mining engineers. Moscow: Gornaya kniga, 2006. 391 p.
10. Völkner E., Liu W., Kühnlenz T., Hammer J., Fahland S. et al. Geological and constitutive models of generic bedded salt repositories for high-level radioactive waste in Germany. *The Mechanical Behavior of Salt IX: Proceedings of the 9th Conference on the Mechanical Behavior of Salt*. Hannover, 2018.
11. Guidelines for Underground Mining Impact Protection of Buildings, Structures and Natural Objects for Mine Flooding Safety in the Upper Kama Potash Salt Deposit. Leningrad: VNIIG, 1985.
12. Vriens B., Seigneur N., Mayer K. U., Beckie R. D. Scale dependence of effective geochemical rates in weathering mine waste rock. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2020. Vol. 234. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2020.103699
13. Wang G., Hou Z., Liao J., Liu J. The experimental study of the short- and long-term strength of Chinese highly impure rock salt. *The Mechanical Behavior of Salt IX: Proceedings of the 9th Conference on the Mechanical Behavior of Salt*. Hannover, 2018.
14. Milyutin A. G. Geology of mineral resources: Textbook and laboratory course. Moscow: Yurayt, 2018. 197 p.

УДК 622.363.2:622.25

Уважаемый Дмитрий Николаевич!

От лица компании Autodesk, одного из лидеров в области разработки решений для архитектуры, проектирования, строительства, промышленного производства, анимации и графики, хочу поблагодарить Вас за многолетнее плодотворное сотрудничество и выбор наших решений для автоматизации работы специалистов Вашей компании. АО «ВНИИ Галургии», безусловно, является для нас ключевым и очень ценным клиентом.

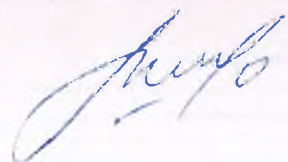
За время нашего многолетнего сотрудничества (в общей сложности на протяжении порядка 15 лет, а начиная с 2015 года сотрудничество осуществляется в рамках единственного в России прямого контракта) сотрудники АО «ВНИИ Галургии» продемонстрировали неустанный стремление к использованию передовых технологий информационного моделирования, внесли неоценимый вклад в подготовку BIM-стандарта для промышленных объектов, чем, в частности, способствовали развитию использования технологий информационного моделирования промышленных объектов в регионе Россия и других стран СНГ.

Наша компания благодарит и высоко ценит помощь, которую оказывает руководство института в Вашем лице при реализации совместных инициатив.

С уважением,

Л. В. Шнитко,

генеральный директор ООО «Аутодеск (Си-Ай-Эс)»



О НЕКОТОРЫХ АСПЕКТАХ ПЕРЕМЕННОЙ ФАКТИЧЕСКОЙ ЖЕСТКОСТИ НАПРАВЛЯЮЩИХ ПРОВОДНИКОВ В ШАХТНЫХ СТВОЛАХ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ



В. С. ПЕСТРИКОВА,

старший научный сотрудник,
канд. техн. наук

Pestrikova.Varvara@uralkalii.com



А. Д. ЯРУШИН,

инженер



В. В. ТАРАСОВ,

заведующий лабораторией
строительства и эксплуатации
шахтных стволов, канд. техн. наук



Д. Н. ШКУРАТСКИЙ,

генеральный директор, канд. техн. наук

АО «ВНИИ Галургии», Пермь, Россия

Введение

В последнее время вопросам работоспособности армировок в шахтных стволах уделяется повышенное внимание. Это актуально как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации систем армировок шахтных стволов. Данному вопросу особое внимание было уделено во второй половине XX в., в период резкого увеличения пропускной способности шахтных стволов, когда недостаточная изученность процессов, возникающих в системе «подъемный сосуд — армировка», послужила причиной возникновения аварийных ситуаций в шахтных стволах. В результате в дальнейшем получило развитие математическое обоснование динамических процессов в системе «подъемный сосуд — армировка» [1–3].

Известно [2, 4–6], что одной из основных причин возникновения динамических нагрузок в системе армировки ствола является изменение ее жесткости. При этом жесткость направляющих проводников является периодической функцией пути подъемного сосуда. При постоянной скорости его движения даже при прямолинейных направляющих проводниках в системе «подъемный сосуд — армировка» неизбежно будут возникать динамические нагрузки, в результате действия которых система армировки ствола может потерять свою работоспособность. Практика эксплуатации шахтных стволов [7–9] показывает, что учесть только

Выполнена оценка жесткости направляющих проводников армировки в шахтных стволах калийных рудников.

Приведена методика определения фактической жесткости проводников.

Проведены экспериментальные исследования и сопоставление фактической и расчетной жесткости направляющих проводников в стволах. Для характеристики жесткости введен коэффициент переменной жесткости армировки, показывающий величину ее снижения в пролете между ярусами.

Ключевые слова: шахтный ствол, подъемный сосуд, динамическая нагрузка, направляющий проводник, жесткостные характеристики, расстрел, работоспособность армировки.

DOI: 10.17580/gzh.2021.04.06

расчетным путем совокупность всех факторов, влияющих на эксплуатационное состояние армировки, затруднительно. Поэтому весьма актуальной задачей является определение фактических параметров армировки в реальных условиях ее эксплуатации при инструментальном контроле.

Методика и результаты исследований

С целью выяснения пределов и характера изменения жесткости армировки шахтных стволов были проведены экспериментальные замеры ее действительных величин. Замеры жесткости армировки осуществляли следующим образом. Направляющий проводник деформировали домкратом в лобовом и боковом направлениях. По динамометру с индикатором часового типа определяли величину приложенной к проводнику силы P . Величину перемещения проводника, в свою очередь, устанавливали по индикатору часового типа. Перемещения проводника под действием силы P в пролете между расстрелами замеряли в 6–7 точках. Результаты проведенных замеров показали, что полученные зависимости величины перемещения проводника от приложенной нагрузки для каждой замеренной точки близки к линейным, поэтому фактическая жесткость направляющих проводников может быть определена как тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс, т. е. по формуле

$$C = (P_2 - P_1) / (l_2 - l_1),$$

где C — жесткость направляющего проводника; P_2, P_1 — нагрузки в любых двух точках прямолинейного участка зависимости; l_2, l_1 — величины перемещений проводника в точках приложения нагрузки.

По полученным аналитическим значениям фактической жесткости балок расстрелов были построены кривые изменения жесткости направляющих проводников для участков армировки

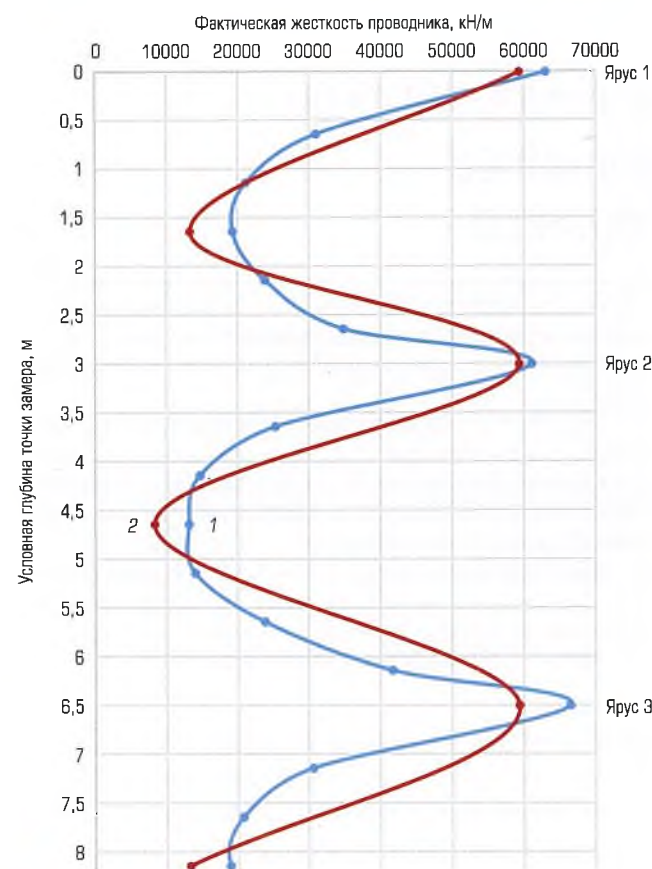


Рис. 1. Кривая изменения фактической (1) и расчетной (2) жесткости направляющего проводника на участке скипового ствола (шаг армировки 3 м)

действующих шахтных стволов Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. В частности, были проанализированы величины фактической жесткости направляющих проводников одного из действующих скиповых стволов Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. Основные параметры шахтного подъема и системы армировки ствола приведены ниже.

Диаметр ствола, м	7
Назначение шахтного подъема	Скиповой
Тип подъемного сосуда	Скип с неподвижным кузовом
Геометрическая вместимость кузова скипа, м ³	19
Максимальная скорость движения подъемного сосуда, м/с	8,1
Материал для изготовления элементов армировки	Металл
Геометрическое сечение направляющих проводников, мм	180×180×12
Геометрическое сечение балок расстрелов, мм	190×190×12
Шаг армировки, м	3

Замеры фактической жесткости по вышеприведенной методике осуществляли для одного из направляющих проводников шахтного ствола на участке длиной 9,5 м со средней частотой измерений 0,5 м. Точки замеров фактической жесткости проводников расположены как на уровне яруса армировки, так и в пролете между ярусами. Полученная в результате замеров кривая изменения замеренной жесткости направляющих проводников для

участка армировки ствола приведена на рис. 1. Также на рис. 1 показана кривая изменения расчетной жесткости проводников. Последнюю величину определяли расчетным путем как обратную податливость направляющего проводника в пролете между ярусами под действием расчетной динамической нагрузки. Как видно из рис. 1, колебания расчетной жесткости проводника на уровне яруса и в пролете между ярусами несколько больше аналогичной величины фактической жесткости проводников. Также на кривой изменения фактической жесткости армировки отмечается тенденция к значительному снижению жесткости проводника на уровне яруса и в пролете между ярусами. Максимальное значение коэффициента разности величины жесткости на уровне яруса и в пролете между ярусами достигает 4,6.

С позиций безопасной эксплуатации системы «подъемный сосуд — армировка» [10–17] наибольший интерес представляет полученное значение коэффициента разности жесткости на уровне яруса и в пролете между ярусами, поскольку этот показатель может свидетельствовать об увеличении прогиба направляющих проводников в пролете между ярусами, что, в свою очередь, может привести к выходу подъемного сосуда из направляющих проводников [18, 19].

На основании полученной кривой фактической жесткости (см. рис. 1) также можно предположить обратно пропорциональную зависимость между шагом армировки ствола и фактической жесткостью направляющих проводников. Для подтверждения указанной зависимости были проанализированы замеры фактической жесткости направляющих проводников шахтного ствола с увеличенным шагом армировки 6 м. Основные параметры шахтного подъема и системы армировки ствола приведены ниже.

Диаметр ствола, м	7
Назначение шахтного подъема	Скиповой
Тип подъемного сосуда	Скип с неподвижным кузовом
Геометрическая вместимость кузова скипа, м ³	19,5
Максимальная скорость движения подъемного сосуда, м/с	11
Материал для изготовления элементов армировки	Металл
Геометрическое сечение направляющих проводников, мм	180×180×12
Геометрическое сечение балок расстрелов, мм	135×120×14
Шаг армировки, м	6

Полученные в результате замеров кривые изменения жесткости направляющих проводников для участка армировки ствола приведены на рис. 2. Как видно из рисунка, выдвинутое предположение об обратно пропорциональной зависимости между величинами шага армировки и жесткости направляющего проводника между ярусами армировки подтверждается.

Таким образом, полученные в результате замеров и отраженные на рис. 1, 2 закономерности изменения фактической жесткости направляющих проводников позволяют вывести коэффициент переменной жесткости армировки k , количественно характеризующий величину снижения жесткости направляющего проводника в пролете между ярусами армировки. Как уже было отмечено выше, данный коэффициент в значительной степени зависит от шага армировки. На рис. 3 приведены зависимости коэффициента k от величины Δh , где Δh — расстояние от точки замера до

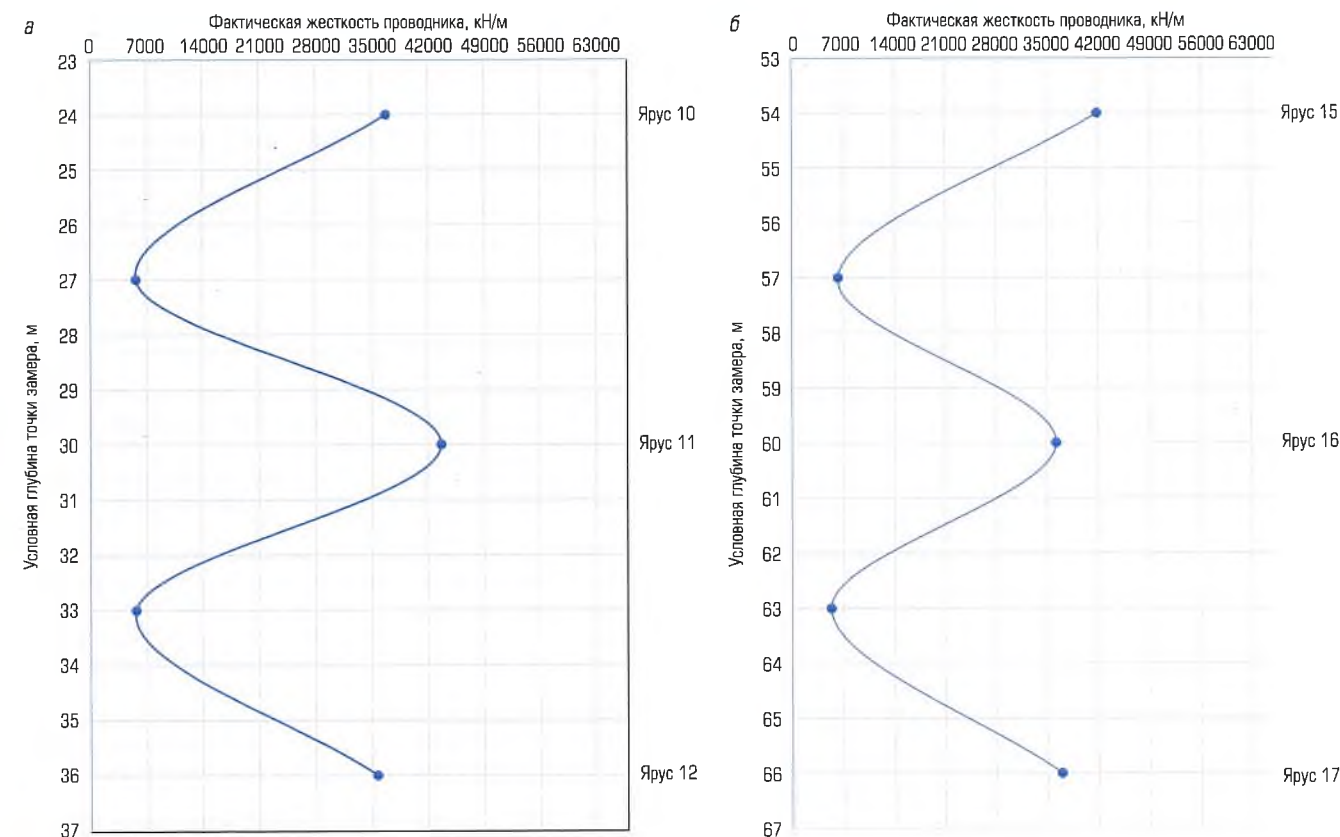


Рис. 2. Изменение фактической жесткости направляющего проводника в интервале ярусов 10–12 (а) и 15–17 (б) скипового ствола (шаг армировки 6 м)

яруса армировки, м. За единицу при этом приняты величины замеренной жесткости на ярусе.

Как видно из рис. 3, наименьшее значение коэффициента $k = 0,15$ характерно для шага армировки 6 м, для шага армировки 3 м коэффициент переменной жесткости армировки снижается более плавно и в среднем составляет 0,32.

Заключение

Таким образом, на основании результатов проведенных исследований можно сформулировать следующие выводы:

- жесткость направляющих проводников является величиной переменной и изменяется в пределах одного яруса армировки ствола;
- фактически замеренные величины жесткости направляющих проводников в целом совпадают с расчетными значениями жесткости как на уровне яруса армировки, так и в пролете между ярусами, что свидетельствует о достоверности полученных результатов;

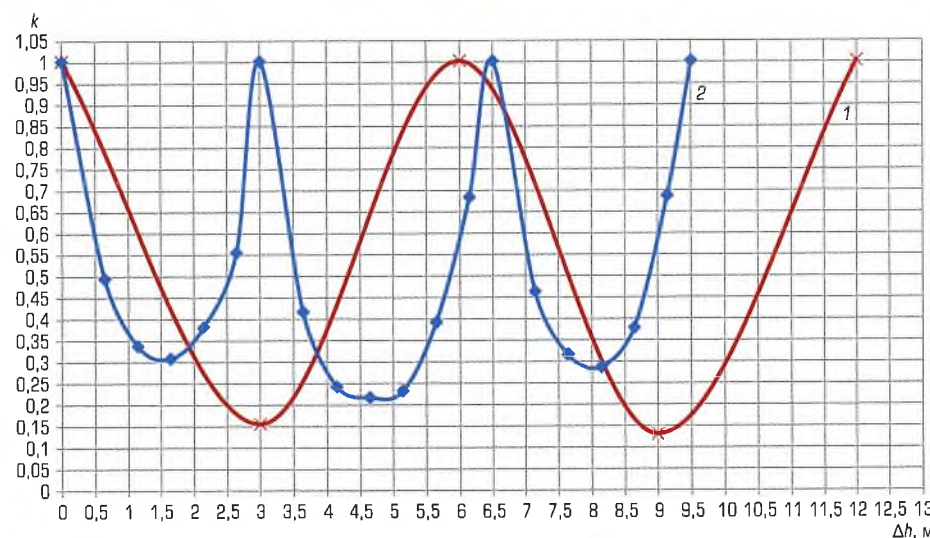


Рис. 3. Изменение коэффициента переменной жесткости направляющего проводника в скиповом стволе при шаге армировки 6 м (1) и 3 м (2)

- количественно оценить переменную жесткость направляющего проводника между двумя соседними ярусами армировки можно посредством коэффициента k ; характер изменения коэффициента k показан на рис. 3;

• изменение коэффициента переменной жесткости направляющего проводника k в значительной степени зависит от шага армировки; так, для увеличенного шага армировки 6 м отмечено снижение коэффициента k с 1 (замер на уровне яруса) до 0,15 (замер в пролете между двумя соседними ярусами армировки); подобное снижение может свидетельствовать о пониженной (в том числе и относительно расчетного значения) жесткости направляющего проводника в пролете между ярусами при увеличенном до 6 м шаге армировки.

Библиографический список

1. Баклашов И. В. Расчет, конструирование и монтаж армировки стволов шахт. — М.: Недра, 1973. — 248 с.
2. Залесов О. А. Армировка вертикальных стволов шахт и ее исследование на электронных моделирующих установках. — М.: Недра, 1966. — 220 с.
3. Ильин С. Р., Трифанов Г. Д. Динамическая диагностика систем «сосуд–армировка» вертикальных шахтных стволов // Горное оборудование и электромеханика. 2009. № 8. С. 29–34.
4. Ильин С. Р., Трифанов Г. Д., Воробель С. В. Комплексные экспериментальные исследования динамики скипов рудоподъемного ствола // Горное оборудование и электромеханика. 2011. № 5. С. 30–35.
5. Прокопов А. Ю., Богомазов А. А., Басакевич С. В. О расчете дополнительной вертикальной нагрузки на проводники жесткой армировки при их отклонении от проектного положения // Научно-технические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых, шахтного и подземного строительства: сб. науч. тр. — Новочеркасск: Изд-во Южно-Российского государственного технического ун-та (Новочеркасский политехнический ин-т), 2006. С. 234–242.
6. Пестрикова В. С. Алгоритм расчета долговечности жестких армировок шахтных стволов, эксплуатируемых в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. № 4. С. 332–339.
7. Пестрикова В. С., Тарасов В. В. Исследование распределения скорости коррозионного износа элементов жесткой армировки на примере шахтных стволов Соликамского калийного рудоуправления № 3 Верхнекамского месторождения калийных солей // ГИАБ. 2016. № 8. С. 326–332.
8. Ольховиков Ю. П. Крепь капитальных выработок калийных и соляных рудников. — М.: Недра, 1984. — 238 с.
9. Ольховиков Ю. П., Гоменюк В. И., Ярушин А. Д. Рекомендации по проектированию армировок шахтных стволов калийных рудников. — Березники, 1974. — 42 с.

«GORNYI ZHURNAL», 2021, № 4, pp. 47–51
DOI: 10.17580/gzh.2021.04.06

Variable actual stiffness of guides in potash mine shafts

Information about authors

V. S. Pestrikova¹, Senior Researcher, Candidate of Engineering Sciences, Pestrikova.Varvara@uralkali.com
A. D. Yarushin¹, Engineer

V. V. Tarasov¹, Head of Laboratory of Mine Shaft Construction and Operation, Candidate of Engineering Sciences

D. N. Shkuratskiy¹, CEO, Candidate of Engineering Sciences

¹VNII Galurgii, Perm, Russia

Abstract

The article addresses serviceability of reinforcement in vertical mine shafts. The mathematical framework is presented for the dynamic processes in the capsule–reinforcement system. The main causes of the dynamic loads in the capsule–reinforcement system are discussed. The importance of the processes in the capsule–reinforcement system during movement of hoists in vertical mine shafts is emphasized. It is asserted that solely computational methods are not enough to analyze processes inside the capsule–reinforcement systems in shafts. It is required to examine actual parameters of shaft reinforcement, in particular, the actual stiffness of shaft guides. The actual measurement procedure of guide stiffness in potash mine shafts is presented. The full-scale tests data are set out in connection with the actual step of reinforcement in shafts. The actual and calculated values of stiffness of shaft guides are compared. Based on the obtained results, the variable stiffness

В целом проведенные исследования позволили уточнить закономерности изменения жесткости направляющих проводников в шахтных стволах с различными параметрами систем армировок и показали необходимость учета фактической переменной жесткости направляющих проводников. Последнее особенно важно принимать во внимание при проектировании строящихся шахтных стволов, в том числе с увеличенным шагом армировки.

10. Волошин А. И., Рубель А. А., Рубель А. В. Армировки вертикальных шахтных стволов и методы их совершенствования // Геотехническая механика: сб. науч. тр. — Днепропетровск, 2016. Вып. 126. С. 137–145.
11. Булат А. Ф., Слащев И. Н., Иконникова Н. А. Принципы построения систем удаленного контроля безопасности шахт // Геотехническая механика: сб. науч. тр. — Днепропетровск, 2017. Вып. 137. С. 3–17.
12. Гоменюк В. И. Исследование проявления динамических нагрузок в шахтных стволах, закрепленных чугунной тубинговой крепью: на примере Верхнекамского калийного месторождения: дис. ... канд. техн. наук. — Пермь, 1974. — 211 с.
13. Ильин С. Р., Радченко В. К., Адорская Л. Г. Рискообразующие процессы при работе шахтных подъемных установок // Геотехническая механика: сб. науч. тр. — Днепропетровск, 2017. Вып. 134. С. 22–35.
14. Рубель А. А. Исследование существующих конструкций ярусов армировки вертикальных стволов и разработка схем ярусов с канатно-профильными проводниками // Геотехническая механика: сб. науч. тр. — Днепропетровск, 2017. Вып. 134. С. 211–227.
15. Ozturk H., Guler E. A methodology for lining design of circular mine shafts in different rock masses // International Journal of Mining Science and Technology. 2016. Vol. 26. Iss. 5. P. 761–768.
16. Yagodka F., Pleshko M., Prokopov A. Perspective Schemes Equipment Ultra-deep Shafts // Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. P. 293–298.
17. Muhamedin Hetemi, Rafet Zegiri. Concept Paper on Shaft Sinking of the Mine “Trepca” in Stanterg New Horizons XIth to XIIIth // Journal of International Environmental Application and Science. 2016. Vol. 11. Iss. 1. P. 65–71.
18. Brady B. H. G., Brown E. T. Rock Mechanics For underground mining. 3rd ed. — Dordrecht: Springer, 2006. — 628 p.
19. Konicek P., Schreiber J. Heavy rockbursts due to longwall mining near protective pillars: A case study // International Journal of Mining Science and Technology. 2018. Vol. 28. Iss. 5. P. 799–805. [PM](#)

coefficient is derived for the shaft guide stiffness for a few alternative of reinforcement step. Considering the described research findings and the many years-long experience gained in operation of mine shafts, the authors have drawn a conclusion on the necessity to take into account the factor of variable stiffness of guides in shaft design and construction in potash mines in the Upper Kama Potash–Magnesium Salt Deposit, especially in case when the shaft reinforcement step exceeds the project design standards.

Keywords: mine shaft, hoisting capsule, dynamic load, guides, stiffness characteristics, bunton, reinforcement serviceability.

References

1. Baklashov I. V. Reinforcement design, engineering and installation in mine shafts. Moscow: Nedra, 1973. 248 p.
2. Zalesov O. A. Reinforcement of vertical mine shafts and the analysis on electronic simulators. Moscow: Nedra, 1966. 220 p.
3. Ilin S. R., Trifanov G. D. Run-time diagnostics of hoist capsule–reinforcement systems in vertical mine shafts. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2009. No. 8. pp. 29–34.
4. Ilin S. R., Trifanov G. D., Vorobel S. V. Integrated experimental research into dynamics of capsules in hoisting mine shafts. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2011. No. 5. pp. 30–35.
5. Prokopov A. Yu., Bogomazov A. A., Basakevich S. V. Calculation of additional vertical load on stiff reinforcement guides in case of their deviation from the design position. *Mineral Mining, Mine and Underground Construction: Science and Technology. Collection of Scientific Papers*. Novocherkassk: Izdatelstvo Yuzhno-Rossiyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (Novocherkasskiy politekhnicheskii institut), 2006. pp. 234–242.

6. Pestrikova V. S. Algorithm for calculating the durability of rigid reinforcements of shaft operating under the conditions of Verkhnekamsky deposits of potassium salts. *Izvestiya Tulkogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2019. No. 4. pp. 332–339.
7. Pestrikova V. S., Tarasov V. V. Survey on distribution of corrosion wear rate of rigid equipment elements by the example of the mine shafts of Solikamsk potash mine № 3 of Verkhnekamskoye potash salt deposit. *GIAB*. 2016. No. 8. pp. 326–332.
8. Olkhovikov Yu. P. Support of permanent workings of potassium and salt deposits. Moscow: Nedra, 1984. 238 p.
9. Olkhovikov Yu. P., Gomenyuk V. I., Yarushin A. D. Recommendations on shaft reinforcement in potash mines. *Berezniki*, 1974. 42 p.
10. Voloshin A. I., Rubel A. A., Rubel A. V. Equipment for vertical mine shafts and methods for its improvement. *Geo-Technical Mechanics: Collected Scientific Papers*. Dnepropetrovsk, 2016. Vol. 126. pp. 137–145.
11. Bulat A. F., Slashev I. N., Ikonnikova N. A. Principles for the development of remote control systems of the mine safety. *Geo-Technical Mechanics: Collected Scientific Papers*. Dnepropetrovsk, 2017. Vol. 137. pp. 3–17.
12. Gomenyuk V. I. Dynamic loads in mine shafts with cast-iron tubing support: A case-study of the Upper Kama Potash Deposit. Dissertation ... of Candidate of Engineering Sciences. Perm, 1974. 211 p.

УДК 622.363.2:622.25

ОСОБЕННОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ДОЗАТОРНЫХ КОМПЛЕКСОВ В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ ВЕРХНЕКАМЬЯ



В. Н. АПТУКОВ,
главный научный сотрудник,
проф., д-р техн. наук



В. В. ТАРАСОВ,
заведующий лабораторией
строительства и эксплуатации
шахтных стволов, канд. техн. наук,
vladislav.tarasov@uralkali.com



В. С. ПЕСТРИКОВА,
старший научный сотрудник,
канд. техн. наук



О. В. ИВАНОВ,
ведущий инженер

АО «ВНИИ Галургии», Пермь, Россия

Введение

Комплекс дозаторных устройств является неотъемлемой частью вертикального шахтного ствола и относится к наиболее ответственным объектам подземного строительства. Его сооружение характеризуется сложностью, трудоемкостью выполнения работ, а также большим объемом капитальных вложений.

13. Ilin S. R., Radchenko V. K., Adorskaya L. G. Risk-forming processes in the work of mine lifting units. *Geo-Technical Mechanics: Collected Scientific Papers*. Dnepropetrovsk, 2017. Vol. 134. pp. 22–35.
14. Rubel A. A. Study of existing structures of floors of vertical shaft equipment and development of schemes for floors with the rope-profiled guides. *Geo-Technical Mechanics: Collected Scientific Papers*. Dnepropetrovsk, 2017. Vol. 134. pp. 211–227.
15. Ozturk H., Guler E. A methodology for lining design of circular mine shafts in different rock masses. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2016. Vol. 26. Iss. 5. pp. 761–768.
16. Yagodka F., Pleshko M., Prokopov A. Perspective Schemes Equipment Ultra-deep Shafts. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 206. pp. 293–298.
17. Muhamedin Hetemi, Rafet Zegiri. Concept Paper on Shaft Sinking of the Mine “Trepca” in Stanterg New Horizons XIth to XIIIth. *Journal of International Environmental Application and Science*. 2016. Vol. 11. Iss. 1. pp. 65–71.
18. Brady B. H. G., Brown E. T. Rock Mechanics For underground mining. 3rd ed. Dordrecht: Springer, 2006. 628 p.
19. Konicek P., Schreiber J. Heavy rockbursts due to longwall mining near protective pillars: A case study. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018. Vol. 28. Iss. 5. pp. 799–805.

Исследовано взаимодействие жесткой крепи горных выработок с обладающими высокой ползучестью соляными породами. Проведен комплекс геомеханических натурных наблюдений и установлены основные причины разрушения бетонной и железобетонной крепи в месте сопряжений ствола с выработками дозаторных устройств и шахтных бункеров. На основании проведенных исследований предложены проектные решения по обеспечению длительной безремонтной эксплуатации дозаторных комплексов в калийных рудниках Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей.

Ключевые слова: шахтный ствол, дозатор, шахтный бункер, ползучесть соляного массива, бетонная крепь, чугунно-бетонная крепь, податливый слой, сопряжение.

DOI: 10.17580/gzh.2021.04.07

Современный бункерный комплекс — это сложный механизированный околоствольный объект, состоящий из взаимосвязанных между собой различных устройств и выработок, которые обеспечивают перегрузку горной массы из транспортной системы шахты в систему шахтного подъема для доставки руды на поверхность [1].

Наиболее сложными объектами как по конструкции, так и по технологии горнопроходческих работ являются камеры скипового загрузочного комплекса или околоствольного двора, в который входят бункер-накопитель, дозаторное устройство и соединяющий их ленточный конвейер или питатель. На калийных и соляных рудниках сопряжения шахтного ствола с дозаторными комплексами проходят в устойчивых соляных породах подстилающей каменной соли (ПдКС).

Комплекс геомеханических исследований

В практике строительства и эксплуатации вертикальных шахтных стволов на рудниках Верхнекамья получили распространение четыре основные схемы компоновки дозаторных камер и бункеров-накопителей (рис. 1):

- камеры дозаторов 1-го и 2-го скиповых подъемов разнесены по высоте на 2–3 диаметра ствола, бункер-накопитель расположен в 20–30 м от оси ствола (скиповой ствол Усть-Яйвинского рудника) (см. рис. 1, а);
- камеры дозаторов 1-го и 2-го скиповых подъемов расположены близко, бункер-накопитель расположен на 20–30 м от оси ствола (скиповые стволы рудника СКРУ-3 и БКПРУ-4) (см. рис. 1, б);
- бункер-накопитель находится непосредственно у ствола (скипоклетевые стволы рудника БКПРУ-2) (см. рис. 1, в);
- камера дозаторов и бункер-накопитель расположены непосредственно у ствола (скиповой ствол рудника СКРУ-2) (см. рис. 1, г).

Как правило, околоствольные дворы стволов, оборудованных только скиповыми подъемами, отличаются большим числом выработок и существенными объемами со сложной конфигурацией, поскольку загрузочные устройства располагаются по разные стороны ствола. В таких случаях суммарный объем пространства околоствольных выработок достигает 4–7 тыс. м³. Несколько меньшими объемами характеризуются околоствольные дворы скипоклетевых стволов калийных рудников [2].

На основе теоретических и экспериментальных исследований установлено, что соляные породы под действием горного давления испытывают необратимые деформации без видимого разрушения (неограниченная ползучесть) [3–8]. На сегодняшний день такое представление достаточно широко изучено и распространено. При проектировании стволов на Верхнекамском месторождении в 1960–1970-х годах данный фактор не учитывали, поэтому при строительстве стволов на Верхнекамском месторождении в то время использовали опыт возведения дозаторных комплексов, заимствованный из горнорудной промышленности [2], где для крепления стенок ствола была выбрана жесткая, монолитная бетонная и железобетонная крепь. Как показывает практика, подобные проектные решения были неэффективными, поскольку монолитная бетонная и железобетонная крепь не способна длительно сдерживать давление соляного массива. Учитывая, что дозаторные комплексы располагают на глубине более 400 м, при таком размещении создаются условия для интенсификации процессов деформирования соляной толщи с последующим разрушением крепи стволов [5, 6].

Так, например, в скиповом стволе Третьего Соликамского калийного рудника дозаторный комплекс скомпонован таким образом, что наклонный бункер-накопитель цилиндрического сечения с западной и восточной сторон отдален от ствола на 30 м (см. рис. 1, б). Подачу руды осуществляют по взвешивающему конвейеру и далее через дозаторное устройство загружают в скип. Камеры бункеров, конвейеров и питателей восточного и западного комплексов пройдены в 1980 г. в подстилающей каменной соли на глубине 380 м. При компоновке загрузочных комплексов

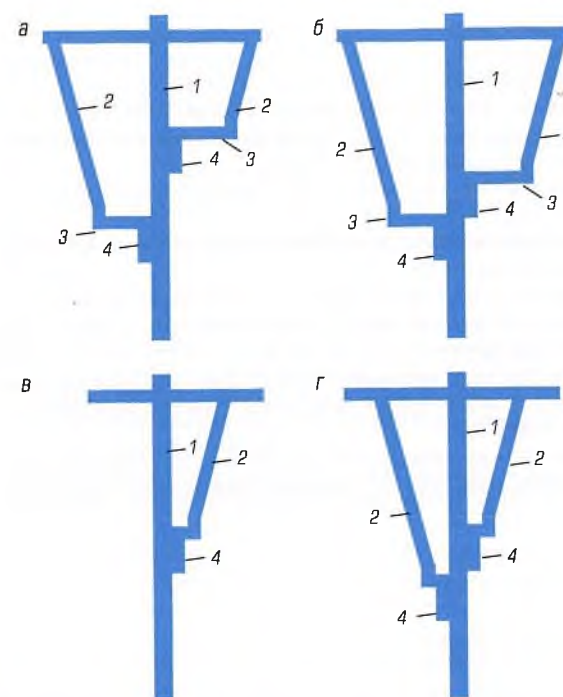


Рис. 1. Комплекс камер загрузочного устройства скипового подъема:

1 – шахтный ствол; 2 – бункер-накопитель; 3 – камера конвейеров и питателей; 4 – дозатор

принята схема с двухсторонним (относительно ствола) расположением выработок без разнесения по вертикали одного относительно другого. Бункеры расположены в наклонных выработках в одной плоскости с углом падения 70° (рис. 2). В комплексе дозатора ствола в интервале глубин 418,7–428,7 м на востоке и 435,2–445,3 м на западе в местах примыкания к стволу камер дозаторов сооружена двойная крепь – бетонная (стена ствола) и железобетонная (стена дозатора с гибкой арматурой).

Между двумя стенками заложен деформационный шов из дерева толщиной 50 мм. Согласно проекту, крепь ствола и крепь дозаторов имеют возможность «проскальзывания» относительно друг друга, т. е. существует возможность некоторой радиальной податливости. Горизонтальные швы бетонирования при заходках в некоторой степени могут выполнять роль вертикальной разгрузки крепи за счет ослабленного контакта бетона между соседними заливками. При этом в крепи ствола отсутствуют горизонтальные (круговые) деформационные швы для вертикальной податливости крепи. Таким образом, крепь скипового ствола в районе дозаторных комплексов обладает высокими показателями жесткости.

При обследовании крепи скипового ствола установлено, что из-за деформации соляных пород кровли и усилий бокового распора имели место локальные расслоения пород кровли. Для количественной оценки устойчивости пород кровли по рекомендациям ОАО «Галургия» в 2003 г. были оборудованы наблюдательные станции, установленные в шпурах, пробуренных в кровле на длину до 3 м [7]. Перед установкой реперов шпуры были обследованы

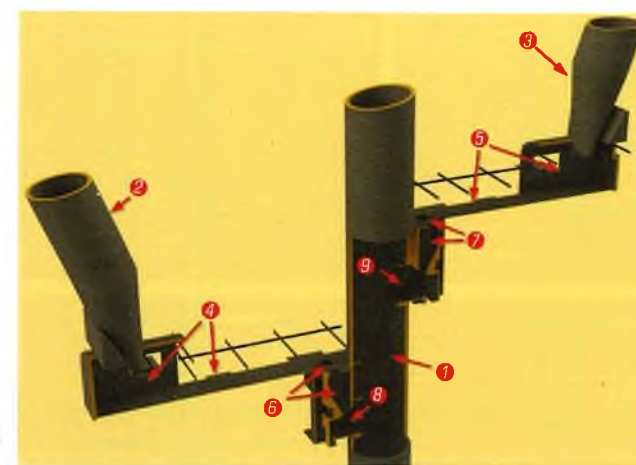


Рис. 2. Комплекс камер загрузочного устройства скипового ствола № 1:

1 – ствол; 2, 3 – западный и восточный бункеры; 4, 5 – западная и восточная камеры питателей и конвейеров; 6, 7 – западный и восточный дозаторы; 8, 9 – западная и восточная камеры загрузочных устройств

эндоскопом на всю длину. Результаты осмотра показали, что вся толща кровли имеет систему трещин расслоения. Результаты геомеханических исследований показали, что кровля камер конвейеров западного и восточного отделений по высоте 2,8 м прогибается с расслоением до 0,6–0,7 мм/мес, горизонтальная конвергенция составила 0,7 мм/мес. Измерениями вертикальной конвергенции в дозаторных камерах зафиксировано пучение почвы величиной от 13 до 28 мм для восточной стороны, и от 8 до 12 мм – для западной.

Таким образом, на сегодняшний день в камерах дозаторного комплекса скипового ствола фиксируются повреждения бетонной крепи в виде многочисленных трещин и вывалов. В 2019 г. в стенках дозаторных камер установлено 12 парных реперов с целью ежемесячного измерения раскрытия трещин и сдвижения стен внутренних помещений камер в западном и восточном отделениях. По итогам мониторинга на протяжении года отмечено, что раскрытие (закрытие) трещин по стенкам камер варьируется в пределах не более 0,2–0,6 мм. При этом численные значения, полученные при замерах смещения (сужения) боковых стен камер дозаторов, показали смещение выработки на 11 мм (или приблизительно 0,92 мм/мес). Таким образом, происходит сжатие выработок под действием горного давления и ползучести соляных пород.

На примере скипоклетевых стволов Второго Березниковского калийного рудника, введенных в эксплуатацию в 1969–1970 гг., установлено, что уже на следующий год после запуска в эксплуатацию были обнаружены значительные деформации сводов и стенок камер дозаторного комплекса, а также смещение ярусов армировки в стволе. Необходимо отметить, что у скипоклетевых стволов Второго Березниковского калийного рудника общешахтные бункеры построены без отнесения их от дозаторных комплексов, имеют прямоугольную форму

размером 4000×6000 мм высотой 26470 мм с углом наклона 60° (см. рис. 1, в).

Дальнейшими длительными исследованиями было установлено, что за период 1980–1985 гг. (т. е. через 12–15 лет после окончания строительства) смещение стенок дозаторной камеры достигает 130–160 мм (0,7–0,9 мм/мес). При таких деформациях происходят: растрескивание бетонной крепи, потеря продольной устойчивости стальных опорных конструкций, имеющих жесткое защемление обоих концов, а также наблюдается передача усилий от деформируемых конструкций дозатора на бетонную крепь и армировку ствола. При этом имело место искривление (сужение) колеи проводников, что, в свою очередь, приводило к зажатию подъемных сосудов и аварийной остановке подъема. Впоследствии для исправления аварийной ситуации в 2008–2011 гг. были реализованы мероприятия по реконструкции бетонной крепи. Проект реконструкции включал в себя замену разрушенной бетонной крепи в скипоклетевых стволах на комбинированную чугунно-бетонную.

Негативная ситуация с крепью скипоклетевых стволов на сопряжении с дозаторными комплексами Второго Березниковского калийного рудника послужила поводом для разработки мер охраны крепи дозаторного комплекса при строительстве скипоклетевого ствола № 2-бис Первого Соликамского калийного рудника. В соответствии с проектом, выполненным ВНИИГ, вокруг комплекса «ствол – дозаторная камера» в соляном массиве были пройдены разгрузочные полости размером от 1000×1000 до 1000×2000 мм и высотой от 4 до 17 м. Кроме того, благодаря применению пластинчатого питателя длиной 7 м было увеличено расстояние между общешахтным бункером и стволом. Выполненные меры охраны по истечении 46 лет эксплуатации ствола показали положительный эффект. В первую очередь следует отметить более рациональные формы, размеры и местоположение отдельных элементов камеры дозатора по сравнению с другими дозаторными комплексами. Тем не менее в целом избежать разрушений бетонной крепи камер и выработок не удалось. Это стало возможным по причине того, что принятые в проекте технические решения на практике оказались не соответствующими реальным условиям. К таким решениям можно отнести следующие:

- использование в качестве крепления для вертикальных стен и сводов камеры дозаторов железобетонной крепи в жестком исполнении (без податливого слоя);
- жесткое защемление обоих концов несущих металлоконструкций различного назначения, что в условиях деформации ползучести соляного массива привело к их прогибу и потере осевой устойчивости;
- устройство рядом со стволом камеры большого сечения в соляном массиве высотой 16700 мм, шириной 12000 мм и глубиной до 8000 мм, что предопределило высокую интенсивность проявления деформаций.

Предпринятые в течение 2008–2010 гг. защитные меры в настоящее время обеспечивают безопасные условия эксплуатации комплекса скипоклетевого ствола № 2-бис, но полностью не исключают дальнейшего деформирования и разрушения крепи ствола и камер дозаторов.

В скиповом стволе рудника БКПРУ-4 при сооружении дозаторного комплекса принято, что наклонный бункер-накопитель цилиндрического сечения с западной и восточной сторон отделен от ствола на 30 м (см. рис. 1, б). При проектировании скипового ствола на руднике БКПРУ-4 было признано достаточным применить железобетон для крепления стенки, а примыкание выработок выполнить через деформационный шов толщиной 50 мм, заполненный древесиной, для защиты крепи ствола и выравнивания внешней нагрузки. По проекту деформационный шов должен был располагаться по окружности на внешней поверхности кольцевой крепи ствола. Однако на сопряжениях с отступлением от проекта деформационный шов выполнен прямолинейным, что существенно изменило геометрию крепи в узлах примыкания выработок дозаторных комплексов к стволам. Вследствие изменения формы деформационного шва на прямолинейный элементы железобетонной крепи ствола превратились в мощные блоки, и деформационный шов не защищает крепь ствола от внешних нагрузок радиального направления. Такое расположение деформационного шва может гасить лишь нагрузки, направленные параллельно оси конвейерной выработки. В результате вся конструкция — блок крепи ствола, деформационный шов и приствольная стенка — работают на сжатие вдоль деформационного шва. Уже по итогам первых 5–10 лет эксплуатации были зафиксированы первые признаки деформирования крепи, в том числе изменение геометрии ярусов армировки, деформация бетонной крепи в виде трещин, отслоений и вывалов.

Таким образом, в том и другом случае для стволов с четырьмя скипами и взаимно параллельным расположением дозаторных комплексов относительно друг друга уже в процессе эксплуатации выявляются допущенные при проектировании и строительстве недостатки. Из них можно выделить основные:

- дозаторные комплексы следовало разнести по высоте на расстояние 2–3 диаметров ствола, как это было сделано в скиповом стволе Усть-Яйвинского рудника;
- в качестве крепи выбрана жесткая железобетонная крепь, которая не способна противостоять деформациям ползучести соляного массива;
- реализовано жесткое защемление концов всех металлических балок различного назначения, что приводит к их продольным деформациям.

При утверждении проектных решений следует принимать во внимание реологические характеристики соляного массива месторождения и понимать, что это естественный (природный) фактор, который не может быть устранен [9, 10].

В скиповом стволе Второго Соликамского калийного рудника дозаторный комплекс скомпонован таким образом, что камера дозаторов и бункер-накопитель расположены непосредственно у ствола (см. рис. 1, г). Здесь воплощены наиболее рациональные технические решения, которые обеспечили длительную безремонтную эксплуатацию сложного узла на протяжении 40 лет.

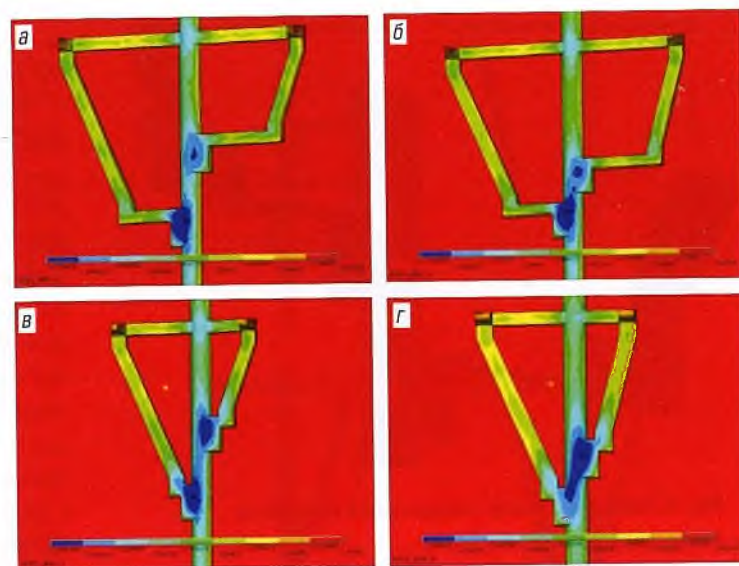


Рис. 3. Горизонтальная конвергенция в дозаторных камерах (ДК) перпендикулярно плоскости чертежа, м:

а — базовый вариант (УКК); б — расстояние между кровлей нижней ДК и почвой верхней ДК составляет 5 м; в — длина выработки с ДК минимальная; г — объединенные варианты б и в

В качестве основных таких решений можно выделить следующие:

- общешахтные бункеры не отнесены от ствола, но при этом выработки пройдены по одной оси с камерами дозаторов;
- реализованы компактное размещение камер, ходовых отделений и рациональное размещение оборудования;
- бетонная крепь ствола и дозаторного комплекса покрыта антикоррозионным составом и соответствует проекту без нарушений технологии ее возведения и времени на набор прочности.

При этом зафиксированные при обследовании незначительные нарушения крепи ствола в виде шелушения поверхности бетона и небольших трещин не представляют какой-либо угрозы для безопасной эксплуатации дозаторного комплекса [11, 12]. Наряду с инженерными оценками прочности стволов и натурными наблюдениями (мониторингом) в настоящее время широко применяют методы математического моделирования для прогнозирования деформирования и потери устойчивости различных горно-технических сооружений в соляных породах [13–15].

Ниже приведены результаты математического моделирования по оценке влияния расстояния между дозаторными камерами (ДК) и расстояния между нижней частью бункеров и стволом на деформирование породного массива с течением времени. Породный соляной массив описывали моделью вязкоупругого материала с учетом пластического упрочнения. Расчеты выполняли в 3D-постановке (рис. 3) с использованием пакета ANSYS. Верификацию расчетной модели осуществляли на основе натурных измерений [13, 14].

На рис. 4 показаны две группы кривых:

- нижняя группа — временные зависимости вертикальной конвергенции в подходящей выработке нижней ДК вблизи ее сопряжения с ДК;

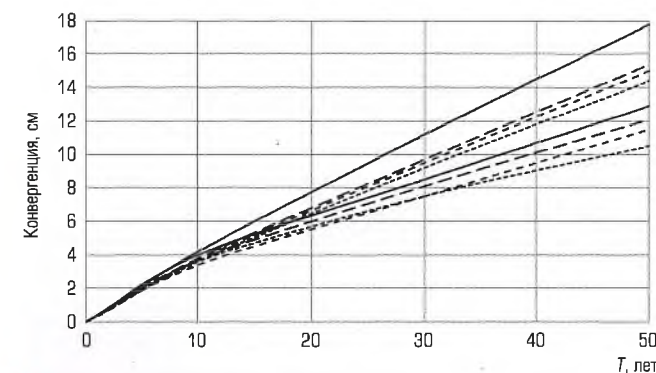


Рис. 4. Временная зависимость вертикальной и горизонтальной конвергенции

- верхняя группа — временные зависимости горизонтальной конвергенции (перпендикулярно плоскости чертежа, см. рис. 1) в нижней ДК вблизи ее сопряжения со стволом (для варианта рис. 1, г — в верхней ДК).

Сплошной линией обозначен вариант рис. 1, а; длинным пунктиром — вариант рис. 1, б; коротким пунктиром — вариант рис. 1, в; точечной линией — вариант рис. 1, г.

Как можно заметить, различие между вариантами а и г по величине вертикальной и горизонтальной конвергенции составляет 20–25 %. Именно горизонтальная конвергенция при большой боковой площади дозаторной камеры и является основной причиной разрушения бетонной крепи как ДК, так и ствола. Во всех вариантах наклон дозаторных камер сохраняли одинаковым. Наилучший вариант — базовый (см. рис. 1, а), наихудший вариант для сближенных ДК и минимального расстояния между бункерами и стволом представлен на рис. 1, г.

Библиографический список

1. Соловьев В. А., Аптуков В. Н., Тарасов В. В., Котляр Е. К. Охрана общешахтных бункеров в соляных породах калийных рудников // Горный журнал. 2019. № 7. С. 96–99. DOI: 10.17580/gzh.2019.07.09
2. Ольховиков Ю. П. Крепь капитальных выработок калийных и соляных месторождений. — М.: Недра, 1984. — 238 с.
3. Тарасов В. В., Аптуков В. Н., Пестрикова В. С. Особенности деформирования и разрушения бетонной крепи вертикального ствола на сопряжении с горизонтальными выработками // ФТПРПИ. 2020. № 5. С. 54–59.
4. Барях А. А., Константинова С. А., Асанов В. А. Деформирование соляных пород. — Екатеринбург: УрО РАН, 1996. — 204 с.
5. Проскуряков Н. М., Пермяков Р. С., Черников А. К. Физико-механические свойства соляных пород. — Л.: Недра, 1973. — 272 с.
6. Judeel G. du T., Keyter G. J., Harte N. D. Shaft sinking and lining design for a deep potash shaft in squeezing ground // 12th International Congress on Rock Mechanics. — London: Taylor & Francis, 2012. P. 1697–1704.
7. Mansouri H., Ajalloeian R. Mechanical behavior of salt rock under uniaxial compression and creep tests // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018. Vol. 110. P. 19–27.
8. Wei Liu, Xiong Zhang, Jinyang Fan, Jiangjiang Zuo, Zhixin Zhang, Jie Chen. Study on the mechanical properties of man-made salt rock samples with impurities // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2020. Vol. 84. 103683. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103683.
9. Соловьев В. А., Аптуков В. Н., Тарасов В. В., Котляр Е. К. Охрана сопряжений шахтных стволов с примыкающими выработками в соляных породах // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 3. С. 18–23.
10. Плешко М. С., Насонов А. А., Дымникова О. В., Рябова Н. В. Обеспечение комплексной безопасности работ по восстановлению и реконструкции шахтных стволов // ГИАБ. 2020. № 7. С. 104–112.
11. Боликов В. Е., Константинова С. А. Прогноз и обеспечение устойчивости капитальных горных выработок. — Екатеринбург, 2003. — 373 с.
12. Elnabolsy K. Shaft Construction Methods Comparison. 2015. URL: <https://ru.scribd.com/document/321024640/Shaft-Construction-Methods-Comparison> (дата обращения: 19.12.2020).
13. Булычев Н. С., Абрамсон Х. И. Крепь вертикальных стволов шахт. — М.: Недра, 1978. — 301 с.
14. Renani H. R., Martin C. D., Hudson R. Back Analysis of Rock Mass Displacements Around a Deep Shaft Using Two- and Three-Dimensional Continuum Modeling // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2016. Vol. 49. Iss. 4. P. 1313–1327.
15. Wang L., Lérest P., Brouard B. Mechanical Behavior of Salt Caverns: Closed-Form Solutions vs Numerical Computations // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2015. Vol. 48. Iss. 6. P. 2369–2382.
16. Грязев М. В., Качурин Н. М., Афанасьев И. А., Стась П. П. Динамика деформаций и нормальных тангенциальных напряжений в бетонной крепи вертикальных стволов при замене разрушенных тюбингов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2018. № 4. С. 127–134.
17. Плешко М. С., Сильченко Ю. А., Панкратенко А. Н., Насонов А. А. Совершенствование расчетно-экспериментальных методов проектирования шахтных стволов // ГИАБ. 2019. № 12. С. 55–66.

Расчеты проведены для чистого породного массива без бетонной крепи и податливого слоя. Поэтому размеры ствола, выработок и бункеров приняты не в чистом виде. Например, диаметр ствола в расчетах принят 8,7 м = 7 м (чистый) + 1 м (бетонная крепь) + 0,7 м (податливый слой).

Заключение

Таким образом, по результатам обследований и длительного опыта промышленной эксплуатации рекомендуется при проектировании и строительстве подземных дозаторных комплексов в соляных породах калийных рудников учитывать комплекс мер, способствующих безаварийной их эксплуатации:

- дозаторные комплексы ствола следует разносить по высоте на расстояние 2–3 диаметров ствола;
- в качестве постоянной крепи принять монолитную бетонную крепь с податливым слоем либо более устойчивую комбинированную чугунно-бетонную крепь, которая способна длительно противостоять деформациям ползучести соляного массива;
- крепление металлических балок расстрелов к крепи ствола осуществлять с элементами податливости, обеспечивающими компенсацию продольных и боковых деформаций расстрела при смещении массива и крепи ствола.

Дополнительным способом защиты ствола от негативного воздействия соляного массива является использование деформационных швов, отделяющих бетонную крепь ствола от бетонной крепи его сопряжения с горизонтальными выработками [16, 17].

Учитывая особенности соляных пород на вновь строящихся рудниках Верхнекамья, в настоящее время при разработке сопряжений с дозаторными комплексами предусматривают меры, обеспечивающие существенную надежность, долговечность и безопасность эксплуатации как самого «узла сопряжения», так и сопряженной выработки в целом.

«GORNYI ZHURNAL», 2021, № 4, pp. 51–56
DOI: 10.17580/gzh.2021.04.07

Construction and operation of batching plants in difficult geological conditions of Upper Kama potash mines

Information about authors

V. N. Aptukov¹, Chief Researcher, Professor, Doctor of Engineering Sciences

V. V. Tarasov¹, Head of Laboratory of Mine Shaft Construction and Operation, Candidate of Engineering Sciences, vladislav.tarasov@uralkali.com

V. S. Pestrikova¹, Senior Researcher, Candidate of Engineering Sciences

O. V. Ivanov¹, Leading Engineer

¹VNI Galurgii, Perm, Russia

Abstract

Scenarios of the component arrangement of batching plants in the system of a vertical mine shaft are discussed. The features of operation of batching plants in vertical shafts of potash mines are identified. The actual recorded damages generated in the lining of batching plants in the course of their long-term operation in potash mines are described. The geomechanical researches aimed to determine vertical convergence in batching rooms of mine shafts, as well as for monitoring of crack opening and displacements in sidewalls in the batching chambers are presented. The major results of the full-scale geomechanical observations are reported, and the main causes of fractures in concrete and reinforced concrete lining at junctures of shafts and batching rooms and shaft bins are identified. The set of the engineering solutions implemented for the protection of lining in batching facilities during construction of mine shafts is described, and its efficiency is evaluated. The mathematical modeling is carried out to estimate various negative impacts on deformation and fracture of concrete lining in shafts with regard to the time factor. From the modeling results, the dominant cause of concrete lining damage in batching chambers and in mine shaft is found. Based on the accomplished research results and actual long-term experience of operation of mine shafts, the most favorable factors are determined for the best design choices in construction and long-term maintenance-free operation of batching plants in potash mines of the Upper Kama Potash–Magnesium Salt Deposit.

Keywords: mine shaft, batching plant, shaft bin, salt rock mass creep, concrete lining, cast iron concrete lining, yielding layer, juncture.

References

1. Solovyev V. A., Aptukov V. N., Tarasov V. V., Kotlyar E. K. Protection of mine bins in saliferous rock mass of potash mines. *Gornyi Zhurnal*. 2019. No. 7. pp. 96–99. DOI: 10.17580/gzh.2019.07.09

2. Olkhovikov Yu. P. Support of permanent workings of potassium and salt deposits. Moscow: Nedra, 1984. 238 p.
3. Tarasov V. V., Aptukov V. N., Pestrikova V. S. Deformation and failure of concrete lining in vertical shaft at intersections with horizontal tunnels. *Journal of Mining Science*. 2020. Iss. 5. pp. 54–59.
4. Baryakh A. A., Konstantinova S. A., Asanov V. A. Rock salt deformation. Ekaterinburg: UrO RAN, 1996. 204 p.
5. Proskuryakov N. M., Permyakov R. S., Chernikov A. K. Physico-mechanical properties of salt rocks of the Verkhnekamskoe potash deposit. Leningrad: Nedra, 1973. 272 p.
6. Judeel G. du T., Keyter G. J., Harte N. D. Shaft sinking and lining design for a deep potash shaft in squeezing ground. *12th International Congress on Rock Mechanics*. London: Taylor & Francis, 2012. pp. 1697–1704.
7. Mansouri H., Ajalloeian R. Mechanical behavior of salt rock under uniaxial compression and creep tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018. Vol. 110. pp. 19–27.
8. Wei Liu, Xiong Zhang, Jinyang Fan, Jiangjiang Zuo, Zhixin Zhang, Jie Chen. Study on the mechanical properties of man-made salt rock samples with impurities. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2020. Vol. 84. 103683. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103683.
9. Solov'ev V. A., Aptukov V. N., Tarasov V. V., Kotlyar E. K. Mine shafts intersections with adjoining mine workings in saliferous rocks protection. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 2017. No. 3. pp. 18–23.
10. Pleshko M. S., Nasonov A. A., Dymnikova O. V., Ryabova N. V. Overall safety of recovery and reconstruction of mine shafts. *GIAB*. 2020. No. 7. pp. 104–112.
11. Bolikov V. E., Konstantinova S. A. Forecast and guaranteeing of stability of permanent mine openings. Ekaterinburg, 2003. 373 pp.
12. Elnabolsy K. Shaft Construction Methods Comparison. 2015. Available at: <https://ru.scribd.com/document/321024640/Shaft-Construction-Methods-Comparison> (accessed: 19.12.2020).
13. Bulychev N. S., Abramson Kh. I. Vertical mine shaft support. Moscow: Nedra, 1978. 301 p.
14. Renani H. R., Martin C. D., Hudson R. Back Analysis of Rock Mass Displacements Around a Deep Shaft Using Two- and Three-Dimensional Continuum Modeling. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016. Vol. 49. Iss. 4. pp. 1313–1327.
15. Wang L., Bérest P., Brouard B. Mechanical Behavior of Salt Caverns: Closed-Form Solutions vs Numerical Computations. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2015. Vol. 48. Iss. 6. pp. 2369–2382.
16. Gryazev M. V., Kachurin N. M., Afanasev I. A., Stas P. P. Dynamics of deformations and normal tangential stresses in concrete lining vertical shafts by replacing destroyed tubings. *Izvestiya Tskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2018. No. 4. pp. 127–134.
17. Pleshko M. S., Silchenko Yu. A., Pankratenko A. N., Nasonov A. A. Improvement of the analysis and calculation methods of mine shaft design. *GIAB*. 2019. No. 12. pp. 55–66.



УДК 622.363

ОБОСНОВАНИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ КРИТЕРИЕВ БЕЗОПАСНОЙ ПОДРАБОТКИ ВОДОЗАЩИТНОЙ ТОЛЩИ НА ВЕРХНЕКАМСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ СОЛЕЙ*



А. А. БАРИАХ¹,
академик РАН, д-р техн. наук



Л. О. ТЕНИСОН²,
начальник Проектно-аналитического управления,
канд. техн. наук, tenisonl@mail.ru

¹Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия

²ПАО «Уралкалий», Березники, Россия

Введение

Водорастворимые руды характерны для месторождений, связанных с галогенными формациями, и представлены главным образом каменной солью, сильвинитом, бишофитом, карналлитовыми и полиминеральными соляными породами. Подземным способом в основном добывают каменную и калийно-магниевые соли.

В геологическом строении соляных месторождений обычно выделяется надсолевой комплекс пород, соляная толща и подсолевые отложения. Непосредственно над соляной толщей часто залегает пачка водоупорных или слабопроницаемых пород, предохраняющая соляное тело от разрушения подземными водами. Остальная часть вмещающих отложений насыщена подземными водами различной минерализации. Сама соляная толща, как правило, безводная [1].

Главной особенностью подземного способа разработки месторождений водорастворимых руд является необходимость сохранения водонепроницаемости пачки пород, расположенной между кровлей верхнего обрабатываемого пласта и подошвой первого снизу водоносного горизонта, называемой в горной практике водозащитной толщей (ВЗТ). Эта особенность в значительной мере осложняет разведку и разработку данных месторождений, которые необходимо вести способами, исключающими возможность проникновения воды в горные выработки. При нарушении сплошности ВЗТ пресные или слабоминерализованные воды, растворяя соляные породы, способны размыть трещины, что зачастую приводит к затоплению калийных рудников и соляных шахт

Описаны основные особенности разработки месторождений водорастворимых руд. Отмечено, что одним из важнейших элементов системы геомеханического сопровождения горных работ является построение инженерных критериев, ориентированных на адекватную оценку безопасных условий подработки водозащитной толщи (ВЗТ). По результатам выполненных на Верхнекамском месторождении солей исследований рекомендовано за обобщенный критерий, определяющий безопасные условия подработки ВЗТ, принять отношение величины максимальных оседаний к глубине ведения горных работ, которое прямо пропорционально наклону земной поверхности.

Ключевые слова: калийные рудники, водозащитная толща, сдвигание, разрушение, оседания, наклон, деформация.

DOI: 10.17580/gzh.2021.04.08

[2–6] и, как следствие, к интенсивным ускоренным оседаниям земной поверхности [7, 8], вплоть до образования провалов значительных размеров [9–12]. Эти негативные процессы создают угрозу разрушения зданий и объектов инженерной инфраструктуры, расположенных над затопленными горными выработками. Таким образом, обеспечение целостности ВЗТ является крайне актуальной задачей для безопасной и эффективной разработки соляных и калийных месторождений.

Крупнейшее Верхнекамское месторождение солей (ВКМС) уже в течение более 85 лет остается единственным в Российской Федерации, находящимся в плановой разработке. ВЗТ на месторождении отличается тонкослоистым строением, включающим чередование пластов каменной соли, карналлитов и мергелей в интервале переходной пачки. Мощность ВЗТ варьируется в диапазоне 40–150 м. Отработку свиты рабочих пластов осуществляют камерной системой с поддержанием вышележащей толщи на междуканальных целиках. В качестве дополнительной меры охраны ВЗТ и снижения деформаций земной поверхности применяют закладку очистных камер солеотходами.

Обеспечение безопасных условий подработки ВЗТ на Верхнекамском месторождении регламентируется действующим нормативным документом [13]. Для детальной оценки состояния ВЗТ, отражающей горно-геологические и горнотехнические условия отработки конкретных участков шахтных полей, и прогноза ее устойчивости в последние десятилетия на ВКМС достаточно широко используют подходы, основанные на математическом моделировании геомеханических процессов [14–18]. Однако, несмотря на их несомненную востребованность, геомеханическое обеспечение, особенно на стадии проектирования горных работ,

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-77-30008).

© Барях А. А., Тенисон Л. О., 2021

не может обойтись без наличия обоснованных инженерных методов, регламентирующих безопасные условия подработки ВЗТ.

Анализ действующих нормативных документов

Согласно существующей методике, безопасные условия подработки ВЗТ определяются суммарной мощностью развитых в разрезе ВЗТ пластов каменной соли $[M]$, в которых не образуются секущие субвертикальные трещины. Для «нормальных» в геологическом отношении условий $[M] = 10$ м. По сути, это «договорной» показатель, характеризующий «запас» несущей способности ВЗТ и обеспечивающий в среднем приемлемый уровень извлечения руды из недр. Как представляется, такой подход в целом является вполне разумным.

Число ненарушенных пластов каменной соли определяется их максимальным прогибом V_m , который не должен превышать допустимую величину $[V_m]$. Максимальный прогиб пластов ВЗТ характеризуется оседаниями земной поверхности, а показатель $[V_m]$ зависит от мощности каменносоляного пласта и его пространственного положения в геологическом разрезе. Чем больше мощность пласта каменной соли и чем ближе он расположен к кровле верхнего отработываемого пласта, тем меньше его допустимый прогиб (рис. 1). Не касаясь пока количественных оценок, отметим, что в целом этот подход во многом базируется на методах сопротивления материалов — балочных и плиточных инженерных расчетах. Вместе с тем совершенно очевидно, что отождествлять подработанную толщу с системой плит является не вполне корректным. Но, пожалуй, основной недостаток действующей методики определения безопасных условий подработки ВЗТ связан с тем, что единственный ее критерий основан на расчете максимальных прогибов подработанных пластов. В этом случае из анализа полностью «выпадает» учет характера деформирования краевых частей ВЗТ, в пределах которых собственно локализируются максимальные горизонтальные деформации растяжения и существует наибольшая опасность формирования зон субвертикальной трещиноватости [19–21]. Возможно эти издержки нивелируются при идеальном плавном деформировании ВЗТ, когда длина полумульды сдвига $L = H(\text{ctg}\psi + \text{ctg}\delta) \approx 1,54H$, где H — глубина горных работ; $\psi = 55^\circ$ — граничный угол сдвижений; $\delta = 50^\circ$ — угол полных сдвижений. Как правило, это достигается при равномерной отработке продуктивных пластов с постоянными параметрами, обеспечивающими степень нагружения междукамерных целиков (отношение действующей нагрузки к его несущей способности) $C \leq [C] = 0,4$.

Однако в производственной практике достаточно часто возникают ситуации, когда отношение L/H становится существенно меньше 1,54. Это, как правило, связано с ускоренным разрушением междукамерных целиков и имеет место при технологическом увеличении степени их нагружения (например, уменьшении ширины целиков), пониженных механических свойствах соляных пород, обрушении кровли, значительных по времени остановках очистных работ и др. В этих случаях формируется «крутая» краевая часть мульды сдвига, что обуславливает значимое увеличение техногенной нагрузки на пласты ВЗТ. Приведем один из примеров.

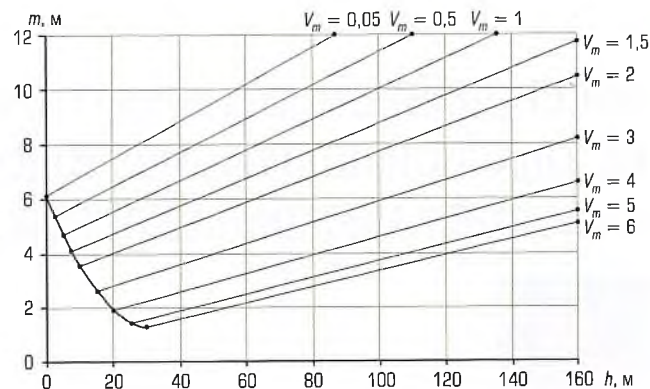


Рис. 1. Определение допустимых прогибов пластов ВЗТ [13]

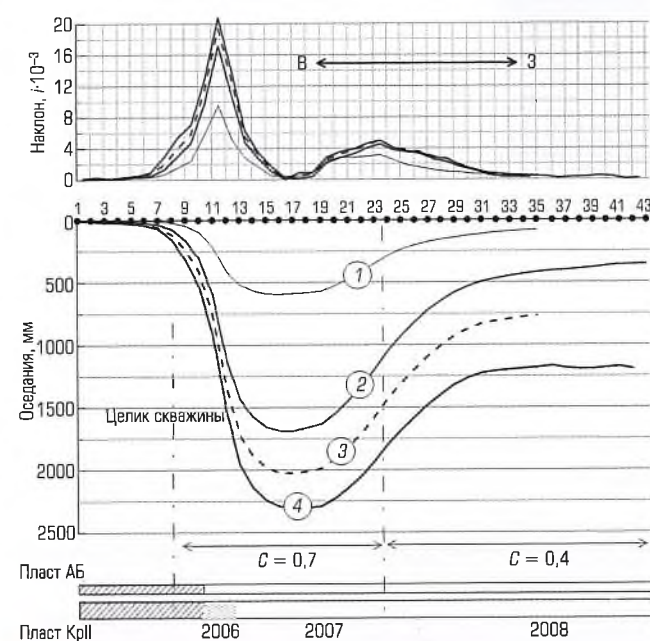


Рис. 2. Изменение оседаний и наклонов земной поверхности по маркшейдерской профильной линии во времени: 1, 2, 3, 4 — 2208, 2010, 2014 и 2020 гг. соответственно

На одном из участков рудника БКПРУ-2 ПАО «Уралкалий» отработаны два сильвинитовых пласта — АБ и КрпII. Целики в восточной части панели на нижнем пласте КрпII имели степень нагружения $C = 0,7$. Скорости оседаний земной поверхности в первые годы после очистной выемки достигали порядка 800 мм/год, над участком сформировалась несимметричная мульда сдвига (рис. 2) с восточным «крутым» и западным «пологим» бортами. В табл. 1 приведены показатели деформаций, достигнутые на данном участке к 2020 г.

Представленные фактические данные отчетливо показывают, что величина деформаций земной поверхности и, следовательно, ВЗТ, непосредственно зависят от геометрии краевых частей мульды сдвига. Чем меньше длина краевой части и больше разность оседаний на границе смены параметров системы разработки, тем больше показатели наклона и кривизны и выше уровень

техногенной нагрузки на ВЗТ. Согласно «Указаниям...» [13], допустимая величина прогиба в восточной части данного участка составляет $[V_m] = 2,8$ м, достигнутый прогиб $V_m = 2,3$ м. Таким образом, условие безопасной подработки ВЗТ $V_m < [V_m]$ безусловно выполняется. Вместе с тем результаты детального математического моделирования, проведенного с учетом геофизических исследований состояния подработанного массива, показывают, что если в западной части участка прогнозируется стабильная геомеханическая ситуация, то в районе восточной границы нарушение сплошности ВЗТ вероятно в ближайшие годы. Таких примеров на месторождении достаточно. При этом существуют и обратные, не вполне корректные оценки, когда де-факто допустимые прогибы уже превышены, а ВЗТ сохраняет свою устойчивость. Например [15], на действующем до настоящего времени Первом Соликамском руднике на отдельных участках отработки 1950–1970-х годов допустимое значение прогиба было превышено еще до 2000 г. Таким образом, очевидно, что критерий допустимого прогиба недостаточен для адекватного анализа безопасных условий подработки ВЗТ.

Общие сведения о развитии процесса сдвижения

В большинстве методов инженерных геомеханических расчетов принимают, что подработанная толща породного массива деформируется по тем же законам, что и земная поверхность. Эти определенные допущения обусловлены сложностью проведения прямых инструментальных измерений во внутренних точках массива, тем более на месторождениях водорастворимых руд, где каждая скважина создает потенциальную опасность прорыва пресных вод в горные выработки.

На ВКМС изучение закономерностей процесса сдвижения земной поверхности при извлечении запасов калийных солей проводили с 1940-х годов. К 1980-м годам в результате обобщения экспериментальных и теоретических исследований, а также с учетом практического опыта установлены значения углов сдвижения и разработаны процедуры расчета ожидаемых оседаний земной поверхности. В качестве основных показателей, определяющих степень влияния подработки на земную поверхность, приняты: наклон, радиус кривизны, кривизна и горизонтальные деформации растяжения-сжатия.

Закономерность распределения оседаний в краевой части мульды сдвига при различных условиях подработки описывается типовыми кривыми, полученными на основании многолетних фактических наблюдений. Характер распределения зависит от скорости формирования краевой части (чем выше скорость оседания, тем может быть «круче» краевая часть мульды сдвига). В свою очередь, скорость оседания подработанной толщи определяется устойчивостью целиков, выраженной степенью их нагружения. При степени нагружения $C \leq 0,4$ целики считаются условно «жесткими» и относительно длительное время сохраняют свою устойчивость. Целики, соответствующие $C = 0,7$, так называемые податливые, обычно разрушаются в первые 5–7 лет.

На рис. 3 представлены типовые кривые распределения оседаний и наклонов земной поверхности для условий ее подработки

Таблица 1. Показатели деформаций, достигнутых к 2020 г.

Краевая часть мульды	Степень нагружения целиков	Длина полумульды L , м	Разность оседаний $\Delta\eta$, мм	Максимальный наклон i , мм/м	Максимальная кривизна $k \cdot 10^{-4}$ 1/м
Восток	0,7	476	2,3	23,8	3,49
Запад	0,4	537	1,1	8	0,95

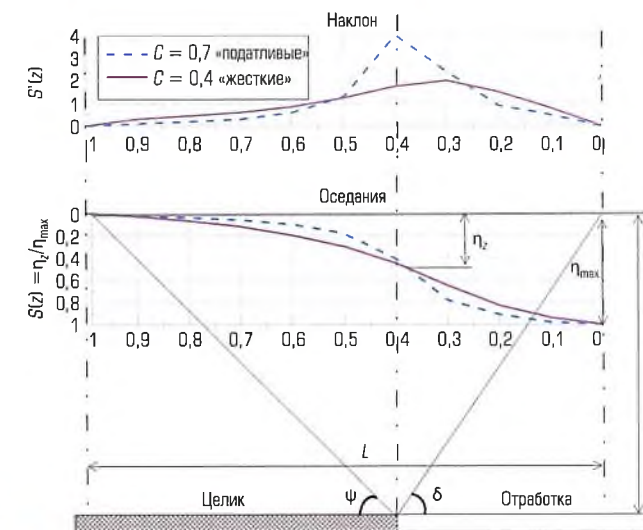


Рис. 3. Типовые кривые распределения оседаний и наклонов земной поверхности для условий ВКМС

с оставлением «жестких» или «податливых» целиков. В инженерной практике для удобства применения типовые кривые представлены численными значениями функций безразмерного распределения оседаний $S(z)$ [13]. Величина безразмерной функции оседаний в произвольной точке мульды сдвига определена из отношения оседания в этой точке к величине максимального оседания на внутренней границе краевой части мульды сдвига $S(z) = \eta/\eta_{\max}$. Значения функции безразмерных распределений наклона $S'(z)$ являются первой производной от функции оседаний и отражают «крутизну» краевой части мульды сдвига (см. рис. 3).

Дифференцирование выполняют на интервале, равном десятой части длины краевой части мульды сдвига. Безразмерная координата z определяется отношением расстояния от границы до искомой точки к общей длине полумульды сдвига. Как следует из представленных графиков (см. рис. 3), максимальный наклон достигается в ее центральной части (непосредственно над границей отработки) в зоне действия наибольших горизонтальных деформаций растяжения.

В безразмерном выражении этот участок расположен в промежутке от $z = 0,2$ до $z = 0,4$. При этом распределение наклона при $C = 0,4$ равно $S'(z) = 2$, что в два раза ниже величины при $C = 0,7$, которая составляет $S'(z) = 4$.

Расчет оседаний и наклонов земной поверхности в произвольной точке полумульды сдвига выполняют по следующим формулам [13]:

$\eta(z) = \eta_{ок} S(z); i(z) = \eta_{ок} S'(z) q_i / L$, (1)
где $\eta_{ок}$ – максимальное оседание на период окончания процесса сдвижения; $S(z)$, $S'(z)$ – значения функций распределения относительных (безразмерных) оседаний и наклонов в краевой части мульды сдвижения; z – относительная координата рассматриваемой точки в краевой части мульды сдвижения, равная отношению x/L (x – расстояние от точки с максимальным оседанием земной поверхности до рассматриваемой точки); L – длина полумульды сдвижения; q_i – коэффициент приведения значений наклона к 15-метровому интервалу.

Максимальная величина оседания земной поверхности или прогиба слоев ВЗТ от отработки одного пласта на период окончания процесса сдвижения определяется по формуле: $\eta_{ок} = 0,9 \omega m_0 p$, где ω – расчетный коэффициент извлечения, m_0 – вынимаемая мощность при отработке пласта; p – параметр, учитывающий влияние закладки очистных камер, $p = 1 - A(1 - B)$, A – коэффициент заполнения очистных камер закладочным материалом, B – коэффициент усадки закладочного массива в зависимости от технологии и вида закладочной смеси (сухая или гидравлическая).

По приведенной методике определены расчетные значения наклонов земной поверхности при различной глубине горных работ и реализованных оседаниях. Результаты вычислений представлены в графическом виде на **рис. 4**. Характеристики условий подработки для каждого графика и значения максимальных наклонов сведены в **табл. 2**.

Представленные результаты маркшейдерских наблюдений (см. рис. 4, табл. 2) наглядно свидетельствуют о зависимости максимальных наклонов от глубины ведения горных работ. Так, при средних для ВКМС горно-геологических условиях ($H = 320$ м, график 1) значение максимального наклона земной поверхности составляет $i = 10$ мм/м. При увеличении глубины отработки до 400 м (см. рис. 4, график 2) этот показатель снижается до $i = 8,1$ мм/м, а с уменьшением глубины ($H = 250$ м, график 3) – возрастает до $i = 13$ мм/м и даже 20,8 мм/м (см. рис. 4, график 4). Аналогичная тенденция, только еще более выражено, просматривается при поддержании ВЗТ на «податливых» междуканальных целиках (см. рис. 4, графики 5–7). Обобщенная зависимость максимального наклона, достигаемого при различной длине полумульды сдвижения, от глубины горных работ приведена на **рис. 5**.

Выполненный анализ показывает, что при других равных условиях с уменьшением глубины горных работ увеличиваются максимальные наклоны в краевой части мульды сдвижения, что однозначно указывает на повышение опасности нарушения сплошности ВЗТ. Эта зависимость уже была отмечена по результатам теоретического анализа [18], но не отражена в действующем нормативном документе [13].

Оценка безопасных условий подработки ВЗТ

Значения максимальных наклонов краевой части мульды сдвижения определяют степень ее «крутизны» и характеризуют уровень техногенной нагрузки на пласты ВЗТ. Для установления количественных значений максимальных наклонов, принимаемых в качестве критериев нарушения сплошности ВЗТ, рассмотрены 5

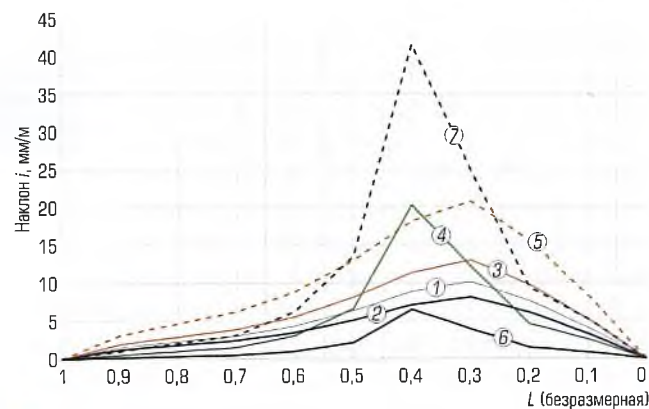


Рис. 4. Графики расчетных наклонов земной поверхности для различных условий подработки

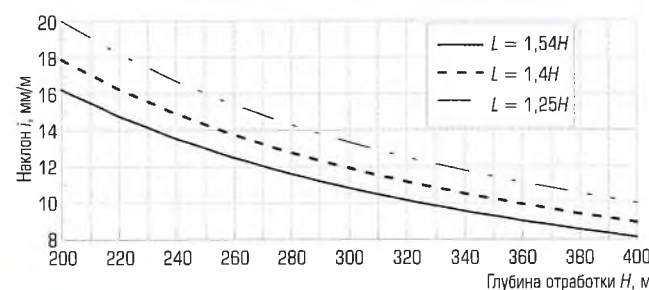


Рис. 5. Зависимость максимального наклона от глубины отработки при оседании 2,5 м

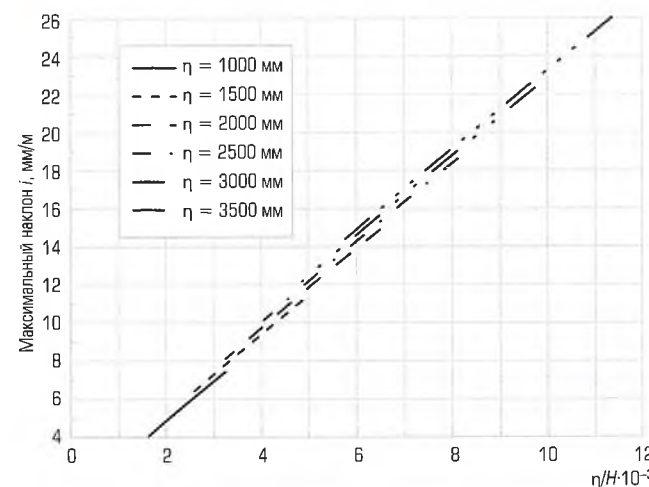


Рис. 6. Зависимость наклона от отношения η/H

участков на шахтных полях ПАО «Уралкалий». На этих участках, отнесенных к потенциально опасным, по результатам математического моделирования и геофизического мониторинга установлено значительное разрушение пластов каменной соли в интервале ВЗТ. Их суммарная ненарушенная мощность зачастую составляет менее регламентированной «Указаниями...» [M] = 10 м. К этим участкам (**табл. 3**) добавлена также информация по району прорыва пресных вод в рудник БКПРУ-1 в 2006 г.

Согласно данным, приведенным в табл. 3, «критическая величина» максимального наклона варьируется в пределах 21–30 мм/м. В связи с этим в качестве допустимого наклона, при достижении которого сохранность ВЗТ гарантированно обеспечивается без применения дополнительных горных мер охраны, может быть принята величина $i = 10$ мм/м. При $i = 15$ мм/м возможно нарушение значительной части слоев ВЗТ. Данная величина характеризуется как предельная. В этом случае обязательным является применение дополнительных мер охраны – закладка выработанного пространства, создание зон смягчения и др.

Обратим внимание, что предложенные критериальные оценки максимально допустимого и предельного наклонов достаточно хорошо согласуются с расчетами, выполненными для различных условий ведения горных работ (см. рис. 3). При подработке ВЗТ «жесткими» целиками ($C = 0,4$) в условиях средних глубин и оседаний земной поверхности значения максимальных наклонов варьируются в пределах $i = 10$ мм/м.

На практике инженерную оценку состояния ВЗТ выполняют в двух основных случаях: при определении степени нарушения ВЗТ на подработанных участках по данным фактических наблюдений за сдвижением земной поверхности и при проектировании параметров отработки на планируемых площадях извлечения балансовых запасов. В первом случае использование критерия максимального наклона не вызывает особых трудностей, в то время как при расчете параметров камерной системы разработки его применение предполагает большой объем дополнительных вычислений, связанных с построением прогнозной мульды сдвижения. В связи с этим для определения условий безопасной подработки ВЗТ в качестве критериального показателя предлагается принимать отношение величины максимальных оседаний на внутренней границе краевой части к глубине ведения горных работ η/H , которое прямо пропорционально наклону земной поверхности (**рис. 6**).

Наклон земной поверхности выражается отношением разности оседаний между двумя точками полумульды $\Delta\eta$ к расстоянию между ними l : $i = \Delta\eta/l$.

Принимая разность оседаний как n -ую часть общего оседания в мульде сдвижения, а расстояние между точками с максимальным наклоном как часть длины полумульды m , выраженную через глубину отработки H , получаем выражение:

$$i = \frac{\Delta\eta}{l} = \frac{\eta/n}{[(\text{ctg}\psi + \text{ctg}\delta)H/m]} \cdot \frac{\eta}{H} \cdot \frac{m}{n(\text{ctg}\psi + \text{ctg}\delta)} \quad (2)$$

В целях установления допустимых значений η/H воспользуемся соотношением (1) для наклонов: $i_{\max} = \eta S'(z)_{\max}/L$.

Длину краевой части полумульды сдвижения можно представить в виде: $L = Ha$, где множитель a определяется условиями подработки (постоянная граница, смежные зоны и т. д.):

$$i_{\max} = \eta S'(z)_{\max}/(Ha), \quad (3)$$

где $S'(z)_{\max}$ – максимальное значение безразмерной функции распределения наклонов.

Как уже отмечалось, максимальное значение безразмерной функции распределения наклона при $C = 0,4$ равно $S'(z) = 2$,

Таблица 2. Сравнение величины максимальных наклонов при различных условиях подработки

График	Степень нагружения C	Глубина подработки H , м	Длина краевой части мульды L , м	Максимальное оседание η , м	Величина максимального наклона i , мм/м
1	0,4	320	493	2,5	10,1
2	0,4	400	616	2,5	8,1
3	0,4	250	385	2,5	13
4	0,4	250	385	4,0	20,8
5	0,7	320	493	2,5	20,3
6	0,7	400	616	1,0	7,3
7	0,7	250	385	4,0	42

Таблица 3. Геометрические параметры мульды сдвижения на потенциально опасных участках

Участок	Достигнутое оседание η , м	Глубина отработки H , м	Длина полумульды L , м	Максимальный наклон i , мм/м
1	4,2	335	230	23
2	3,2	330	343	28
3	2,6	324	230	21
4	2,3	338	476	23
5	2,7	310	240	30
БКПРУ-1, скв. 17	3	300	311	22

Таблица 4. Допустимые и предельные прогибы ВЗТ, нормированные на глубину горных работ

Критерий	Постоянная граница $L/H = 1,54$		Смежная граница $L/H = 1,4$	
	$C \leq 0,4$	$0,4 < C \leq 0,7$	$C \leq 0,4$	$0,4 < C \leq 0,7$
Допустимый	7,7	3,8	7	3,5
Предельный	11,5	5,8	10	5

а при $C = 0,7 - S'(z) = 4$ (см. рис. 3). Подставляя значения безразмерных функций в формулу (3), получаем соответственно для «жестких» и «податливых» целиков следующие выражения: $i_{\max} = 2\eta/(Ha)$; $i_{\max} = 4\eta/(Ha)$. Сравнивая эти величины с принятыми допустимыми ($i = 10$ мм/м) и предельными ($i = 15$ мм/м) максимальными наклонами, легко вычислить соответствующие показатели для отношения η/H . При $C \leq 0,4$ допустимое отношение $\eta/H = 5a$, предельное $\eta/H = 7,5a$. При $0,4 < C \leq 0,7$ допустимое отношение $\eta/H = 2,5a$, предельное $\eta/H = 3,75a$.

Трансформированные критериальные показатели максимальных прогибов, нормированные на глубину отработки для различных горно-геологических и горнотехнических условий, приведены в **табл. 4** (L , H – в м, η – в мм).

Результаты инженерных расчетов, выполненных по предложенной методике оценки безопасных условий подработки ВЗТ, сопоставляли с данными математического моделирования, представленными в работе [18] в виде номограммы, определяющей допустимую мощность ненарушенных слоев каменной соли в зависимости от максимальных оседаний земной поверхности,

глубины разработки и относительной длины краевой части мульды сдвижения. Отмечено вполне приемлемое согласование.

Заключение

Следует отметить, что по сравнению с действующим нормативным документом разработанная инженерная методика более

Библиографический список

1. Кудряшов А. И. Верхнекамское месторождение солей. — Пермь: ГИ УрО РАН, 2001. — 429 с.
2. Шиман М. И. Предотвращение затопления калийных рудников. — М.: Недра, 1992. — 160 с.
3. Ковалев О. В., Мозер С. П. Некоторые подходы к обеспечению безопасной отработки калийных месторождений // Записки Горного института. 2014. Т. 207. С. 55–59.
4. Rauche H. Die Kaliindustrie im 21. Jahrhundert. Stand der Technik bei der Rohstoffgewinnung und der Rohstoffaufbereitung sowie bei der Entsorgung der dabei anfallenden Rückstände. — Berlin: Springer Vieweg, 2015. — 560 s.
5. Minkley W., Mühlbauer J., Lüdeling C. Dimensioning Principles in Potash and Salt: Stability and Integrity // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2016. Vol. 49. Iss. 11. P. 4537–4555.
6. Prugger F. F., Prugger A. F. Water problems in Saskatchewan potash mining — what can be learned from them? // CIM Bulletin. 1991. Vol. 84. No. 945. P. 58–66.
7. Барях А. А., Самоделкина Н. А. Геомеханическая оценка интенсивности деформационных процессов над затопленным калийным рудником // ФТПРПИ. 2017. № 4. С. 33–46.
8. Тенисон Л. О. Прогнозирование вертикальных деформаций земной поверхности в условиях затопленного рудника БКПРУ-1 // ГИАБ. 2016. № 1. С. 230–242.
9. Andreichuk V., Eroso A., Dominguez M. C. A large sinkhole in the Verkhnekamsky potash basin in the urals // Mine Water and the Environment. 2000. Vol. 19. Iss. 1. P. 2–18.
10. Whyatt J., Varley F. Catastrophic Failures of Underground Evaporite Mines // Proceedings of the 27th International Conference on Ground Control in Mining. — West Virginia: National Institute for Occupational Safety and Health, 2008. P. 113–122.
11. Rauche H. Sinkhole Formation over Flooded Potash Mines — Case Studies from the Motherland of the Potash Industry // Fall 2000 Meeting. — San Antonio, 2000. P. 161.

«GORNYI ZHURNAL», 2021, № 4, pp. 57–63
DOI: 10.17580/gzh.2021.04.08

Justification of engineering safety criteria for undermining of water-proof layer in the Upper Kama Salt Deposit

Information about authors

A. A. Baryakh¹, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Engineering Sciences
L. O. Tenison², Head of Design and Analysis Department, Candidate of Engineering Sciences, tenisonl@mail.ru

¹Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

²Uralkali, Berezniki, Russia

Abstract

Safety of a water-proof pillar between the stoping void and the aquifers defines the key feature of water-soluble mineral mining. In this regard, the most important element of geomechanical supervision of mining operations, especially, at the mine project stage, is the engineering safety criteria aimed at the adequate valuation of safe undermining of water-proof strata (WPS). The WPS safety procedures now in force calculate only maximal sagging of undermined beds and disregard deformation in the edge area of WPS. In the meanwhile, the edges of WPS are the areas of localization of maximal horizontal strains, and the hazard of vertical jointing is the highest in these areas. In this connection, in the capacity of the index of the manmade load on WPS, it is proposed to use the maximal slope of the edge area of the subsidence trough. The evaluations were carried out in 6 Uralkali's mine sites selected from the mathematical modeling and geophysical survey data which exhibited considerable damage of WPS. Based on the implemented research and justifications, it is recommended to use the generalized safety criterion for undermining of WPS as a maximal subsidence/mining depth ratio which is directly proportional to the ground slope. This engineering procedure describes more adequately the fracture

адекватно отражает механизм разрушения пород ВЗТ, в частности локализацию нарушенности в краевой части мульды сдвижения, влияние глубины горных работ на безопасные условия подработки ВЗТ и, что, возможно, является самым главным, базируется на критериальных оценках, установленных на Верхнекамском месторождении по результатам многолетних наблюдений и измерений.

12. Борзаковский Б. А., Аптуков В. Н., Тенисон Л. О. О возможности образования новых провалов на затопленном руднике БКПРУ-1 // ГИАБ. 2015. № 10. С. 5–13.
13. Указания по защите рудников от затопления и охране обрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей (технологический регламент). — СПб.: ВНИИГ, 2008. — 95 с.
14. Bérest P., Karimi-Jafari M., Brouard B. Geometrical versus rheological transient creep closure in a salt cavern // Comptes Rendus Mécanique. 2017. Vol. 345. Iss. 11. P. 735–741.
15. Барях А. А., Санфилов И. А., Федосеев А. К., Бабкин А. И., Цаюков А. А. Сейсмо-геомеханический прогноз состояния водозащитной толщи на калийных рудниках // ФТПРПИ. 2017. № 6. С. 10–22.
16. Cheskidov V. V., Lipina A. V., Melnichenko I. A. Integrated monitoring of engineering structures in mining // Eurasian Mining. 2018. No. 2. P. 18–21. DOI: 10.17580/em.2018.02.05
17. Warren J. K. Evaporites: A Geological Compendium. 2nd ed. — Cham: Springer, 2016. — 1812 p.
18. Minkley W., Menzel W., Konietzky H., Te Kamp L. A visco-elasto-plastic softening model and its application for solving static and dynamic stability problems in potash mining // FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics: Proceedings of the International FLAC Symposium. — London: CRC Press, 2020. P. 21–27.
19. Барях А. А., Самоделкина Н. А. Разрушение водоупорных толщ при крупномасштабных горных работах. Ч. II // ФТПРПИ. 2012. № 6. С. 12–20.
20. Васильчук М. П., Иофис М. А. Анализ геомеханических процессов и причин аварий на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей // Маркшейдерский вестник. 2007. № 1(59). С. 30–32.
21. Пачгин В. В. Снижение вероятности прорывов подземных вод в рудник при интенсивной отработке калийных пластов // ГИАБ. 2017. Спец. выпуск 5-2. Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке-2. С. 126–133. [URL](#)

mechanism in WPS rocks, in particular, damage localization in edge areas of the subsidence trough, or influence of mining depth on WPS stability and, which is main thing, is based on the criteria derived from the long-term observations and measurements performed in the Upper Kama deposit. The study was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 19-77-30008.

Keywords: potash mines, water-proof strata, movement, fracture, subsidence, slopes, deformation.

References

1. Kudryashov A. I. Verkhnekamskoe salt deposit. Perm: GI UrO RAN, 2001. 429 p.
2. Shiman M. I. Avoiding of flooding of potassium mines. Moscow: Nedra, 1992. 160 p.
3. Kovalev O. V., Mozer S. P. Some approaches to secure mining of potash deposits. *Journal of Mining Institute*. 2014. Vol. 207. pp. 55–59.
4. Rauche H. Die Kaliindustrie im 21. Jahrhundert. Stand der Technik bei der Rohstoffgewinnung und der Rohstoffaufbereitung sowie bei der Entsorgung der dabei anfallenden Rückstände. Berlin: Springer Vieweg, 2015. 560 s.
5. Minkley W., Mühlbauer J., Lüdeling C. Dimensioning Principles in Potash and Salt: Stability and Integrity. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016. Vol. 49, Iss. 11. pp. 4537–4555.
6. Prugger F. F., Prugger A. F. Water problems in Saskatchewan potash mining — what can be learned from them? *CIM Bulletin*. 1991. Vol. 84, No. 945. pp. 58–66.
7. Baryakh A. A., Samodelkina N. A. Geomechanical Estimation of Deformation Intensity above the Flooded Potash Mine. *Journal of Mining Sciences*. 2017. Vol. 53, Iss. 4. pp. 630–642.
8. Tenison L. O. Prediction of vertical deformations of ground surface in conditions of flooded mine Berezniki 1. *GIAB*. 2016. No. 1. pp. 230–242.
9. Andreichuk V., Eroso A., Dominguez M. C. A large sinkhole in the Verkhnekamsky potash basin in the urals. *Mine Water and the Environment*. 2000. Vol. 19, Iss. 1. pp. 2–18.
10. Whyatt J., Varley F. Catastrophic Failures of Underground Evaporite Mines. *Proceedings of the 27th International Conference on Ground Control in Mining*. West Virginia: National Institute for Occupational Safety and Health, 2008. pp. 113–122.

11. Rauche H. Sinkhole Formation over Flooded Potash Mines — Case Studies from the Motherland of the Potash Industry. *Fall 2000 Meeting*. San Antonio, 2000. p. 161.
12. Borzakovsky B. A., Aptukov V. N., Tenison L. O. On possibility of new sink holes in the flooded mine Berezniki 1. *GIAB*. 2015. No. 10. pp. 5–13.
13. Regulations for protection of mines from flooding and protection of undermined objects from flooding and protection in Verkhnekamskoe potassium salt deposit (technological regulations). Saint Petersburg: VNIIG, 2008. 95 p.
14. Bérest P., Karimi-Jafari M., Brouard B. Geometrical versus rheological transient creep closure in a salt cavern. *Comptes Rendus Mécanique*. 2017. Vol. 345, Iss. 11. pp. 735–741.
15. Baryakh A. A., Sanfilov I. A., Fedoseev A. K., Babkin A. I., Tsayukov A. A. Seismic-Geomechanical Control of Water-Impervious Strata in Potassium Mines. *Journal of Mining Science*. 2017. Vol. 53, Iss. 6. pp. 981–992.
16. Cheskidov V. V., Lipina A. V., Melnichenko I. A. Integrated monitoring of engineering structures in mining. *Eurasian Mining*. 2018. No. 2. pp. 18–21. DOI: 10.17580/em.2018.02.05

17. Warren J. K. Evaporites: A Geological Compendium. 2nd ed. Cham: Springer, 2016. 1812 p.
18. Minkley W., Menzel W., Konietzky H., Te Kamp L. A visco-elasto-plastic softening model and its application for solving static and dynamic stability problems in potash mining. *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics: Proceedings of the International FLAC Symposium*. London: CRC Press, 2020. pp. 21–27.
19. Baryakh A. A., Samodelkina N. A. Water-Tight Stratum Rupture under Large-Scale Mining. Part II. *Journal of Mining Science*. 2012. Vol. 48, Iss. 6. C. 954–961.
20. Vasilchuk M. P., Iofis M. A. Analysis of geomechanical processes and causes of accidents in the Upper Kama Potash-Magnesium Salt Deposit. *Marksheiderskiy vestnik*. 2007. No. 1(59). pp. 30–32.
21. Pachgin V. V. The lowering of likelihood of groundwater intrusion into the mine at intensive mining of potash seams. *GIAB*. 2017. Special issue 5-2. Industrial safety of enterprises of mineral resource complex in the XXI century-2. pp. 126–133.

УДК 553.632:004.9

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНО-МАГНИЕВЫХ СОЛЕЙ



А. С. СЕННОВ,
старший научный сотрудник,
канд. геол.-минерал. наук,
Andrey.Sennov@uralkali.com



А. В. МУХАМЕТДИНОВ,
старший научный сотрудник



А. И. МЯСИЧЕНКО,
младший научный сотрудник



А. В. КАЛУГИН,
младший научный сотрудник

Филиал АО «ВНИИ Галургии» в Санкт-Петербурге, Россия

Введение

Для любого горного производства важнейшими задачами являются обеспечение безопасности отработки месторождения и охрана среды обитания в процессе производства. Для месторождений солей особую важность в связи с этим приобретает изучение природных вод как поверхностных, так и подземных, потому что на самом деле те и другие тесно связаны.

Обоснованы особенности применения ГИС-технологий и программных продуктов при работе с аппаратом многомерной математической статистики. Описаны методы численного моделирования для решения практических задач, возникающих при отработке месторождений природных солей.

Ключевые слова: прикладное математическое моделирование, программное обеспечение, цифровая модель местности, геоинформационные технологии, гидрогеодинамическое и гидрогеохимическое моделирование.

DOI: 10.17580/gzh.2021.04.09

Современные научные исследования невозможны без активного применения компьютерных технологий. Их используют для хранения и анализа данных, выполнения всевозможных расчетов, построения чертежей и карт и т. д. [1].

В науках о Земле широко используют геоинформатику, в рамках которой сформировано направление по цифровому анализу рельефа (ЦАР) с целью получения практически значимой информации (Digital Terrain Analysis) [2, 3]. Основой всех исследований в этой области является цифровая модель рельефа (ЦМР, Digital Elevation Model, DEM). С ее помощью возможно как создание различных тематических карт, так и выполнение моделирования, например поверхностного стока, степени увлажнения почв и т. п.

Исследования также невозможны без применения аппарата многомерной математической статистики. Природно-техногенные объекты отличаются высокой сложностью и характеризуются большим числом действующих параметров, поэтому исследование связей, взаимодействий и причин различных явлений без этого весьма затруднительно [4].

Наконец, многие практические задачи эффективно решают с помощью математического моделирования. Опять же в силу сложности и многомерности природно-техногенных объектов эти задачи не могут быть решены с использованием простых аналитических методов и требуют привлечения численного моделирования.

В настоящей статье раскрыты особенности применения информационных технологий для решения практических задач, возникающих при отработке месторождения природных солей. Поскольку в рамках одной статьи невозможно сделать обзор всего разнообразия существующего программного обеспечения, ниже приводятся только те его элементы, которые были использованы авторами.

Объект исследования

Территория расположения Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) представляет собой низкогорный, достаточно расчлененный рельеф с развитой речной сетью, к западу переходящий в долину р. Камы. Абсолютные отметки земной поверхности изменяются от приблизительно 250 м на востоке области до 100 м с небольшим — на западе.

Продуктивная толща залегает на глубине нескольких сотен метров и перекрывается раннепермскими терригенными карбонатными породами, в которых идут процессы выщелачивания. В надсолевой толще принято выделять несколько водоносных горизонтов, но они слабо изолированы и представляют собой единую гидравлическую систему. Вследствие процессов выщелачивания и техногенных изменений в массиве при отработке в породах формируются зоны повышенной трещиноватости с пониженной прочностью и высокой водно-фильтрационной способностью. По некоторым данным, водопроводимость на отдельных участках достигает 10000 м²/сут и более.

Программное обеспечение и некоторые исходные данные

В качестве основной ГИС-программы была выбрана QGIS 2.18 (Quantum GIS) [5], свободная кроссплатформенная геоинформационная система, выпускаемая под лицензией GNU. Данный выбор, помимо возможностей самой программы, обусловлен ее хорошим взаимодействием с программным продуктом для геоинформационного анализа SAGA 6.1.0 (System for Automated Geoscientific Analyses), также выпускаемым под лицензией GNU [6]. От популярной ArcGIS она отличается значительно большим набором инструментов анализа и явно недостаточной документацией. Последнее отчасти компенсируется большим числом англоязычных статей.

Самые популярные ГИС-программы включают технологии построения ЦМР. Кроме того, на основе данных дистанционного зондирования созданы глобальные ЦМР, из которых не меньше десятка находятся в свободном доступе. Не останавливаясь на их обзоре, отметим, что авторами были выбраны данные SRTM3 (The Shuttle Radar Topography Mission v3) Международного проекта по созданию цифровой модели высот. В данном проекте принимали участие НАСА, Министерство обороны США, Германский аэрокосмический центр DLR и Итальянское космическое

агентство ASI [7]. В свободном доступе имеются данные радарной съемки с разрешением 3 с в одном пикселе, что приблизительно соответствует 90 м.

В качестве программы для многомерного статистического анализа использовали TIBC Statistica 13.

Для математического моделирования физических процессов были реализованы различные вычислительные модули, разработанные Геологической службой США [8]. Так, для моделирования движения подземных вод использовали программы ModFlow 2005 и ModflowNWT, для моделирования речного стока — программу STREAM, а также другие совместимые с ModFlow инструменты. Для подготовки исходных данных и анализа результатов использовали пакеты Processing Modflow X и Groundwater Modeling System 10.4. Основным программным комплексом, реализуемым для создания гидродинамических моделей, на сегодняшний день является GMS (Groundwater modeling system) 10.4.

Особенность данной программы — хорошая совместимость с основными выходными форматами ГИС-программ, а также наличие мощных инструментов для визуализации и анимации результатов моделирования.

Для гидрохимического моделирования использовали программу PHREEQC [9].

Применяли данные государственных метеорологических и гидрогеологических служб, отчеты о геологических изысканиях, а также результаты собственных исследований.

ГИС-анализ и моделирование речной сети

Исследования выполняются в следующей последовательности:

- построение цифровой модели рельефа;
- фильтрация модели с целью устранения шума;
- гидрокоррекция;
- оконтуривание общей площади водосбора;
- определение положения речной сети.

При необходимости выполняют расчеты дополнительных морфометрических показателей, например определяют уклоны склонов, их экспозицию, топографический индекс влажности и т. п.

Все необходимые модули имеются в ГИС SAGA, как правило, присутствуют также варианты от разных авторов.

Фильтрацию выполняют по алгоритму Mesh Denoise [10], выбранному из почти двух десятков возможных и показавшему, по мнению авторов, наилучшие результаты.

В большинстве ЦМР присутствуют впадины без стока. Это могут быть как естественные понижения, так и ложные, вызванные ошибками данных или их интерполяции. Над устранением этих впадин работали разные авторы, в использованной версии SAGA присутствуют четыре алгоритма, был выбран [11]. Он основан на поиске направления потоков по минимальной высоте заполнения, в процессе работы может быть выделен и контур водораздела.

Для моделирования поверхностного стока разработаны различные алгоритмы, соответственно в SAGA присутствуют различные модули для решения такой задачи. Авторами был использован модуль Flow Accumulation (Top-Down), основанный на многомерной модели максимального градиента уклона [12].

По площади водосбора выполнено моделирование речной сети с использованием модуля Channel Network and Drainage Basins. Автором этого и нескольких похожих модулей является O. Conrad (Institute of Geography, University of Hamburg), но публикаций именно по этому методу у него нет. Все модули указанного автора, моделирующие речную сеть, определяют местоположения истоков отдельных рек (Heads) и точки их впадения в более крупные реки (Mouth). С помощью указанного модуля рассчитывают также границы речных бассейнов низших порядков. Таким образом получают необходимые исходные данные для расчетов в ModFlow-совместимой программе Stream; все реки выделены в отдельные сегменты.

Пример цифровой модели рельефа с картой речной сети, подготовленной для моделирования речного стока, приведен на рис. 1.

Следует отметить, что похожие технологии присутствуют в гидрологическом модуле ArcGIS, но перечень возможностей там значительно меньше, чем в SAGA [13].

Далее необходимо определиться с гидрогеологической схематизацией в разрезе. Задача осложняется тем, что вся толща надсолевых пород является гидравлически связанной, хотя выделение отдельных водоносных горизонтов, безусловно, имеет практический смысл и необходимо для создания гидрогеодинамической модели месторождения.

Решить данную задачу можно с помощью методов многомерной статистики. В частности, в качестве метода классификации использовали стандартную процедуру факторного анализа методом главных компонент. В качестве исследуемых параметров приняты геометрия пластов, отметки уровней воды в водоносных горизонтах и земная поверхность. Приведем типичный график собственных значений для одного из исследованных объектов (см. таблицу). Расчет выполняли без ограничения числа факторов. В данном примере статистически достоверно выделение трех водоносных горизонтов, хотя третий объект — на грани ошибки. Большинство расчетов указывают на достоверность выделения только двух водоносных горизонтов.

Как обычно, окончательное решение принимают в процессе интерпретации компонент. Одним из основных методов интерпретации является анализ уровней поверхностей, построенных по данным выделенных методом главных компонент массивов. Например, водоносный горизонт, который интерпретируют как верхний, имеет очень высокую корреляцию уровня воды с земной поверхностью и кровлей верхних водоносных пластов. Это хорошо объясняется физическими причинами. Наоборот, нижний горизонт по этим параметрам не коррелирует.

В дальнейшем при работе над геофильтрационной моделью уровенные поверхности, полученные по разным данным, сравнивали между собой и с данными, полученными из статистических выборок. Методика и детали применения данного метода подробно описаны авторами в статье [14].

В результате выполнения работ по сбору информации, ее статистической обработке и анализу разного рода доступных материалов (метеорологических, гидрологических, гидрогеологических и др.) становится возможным проведение гидродинамического моделирования [15, 16].

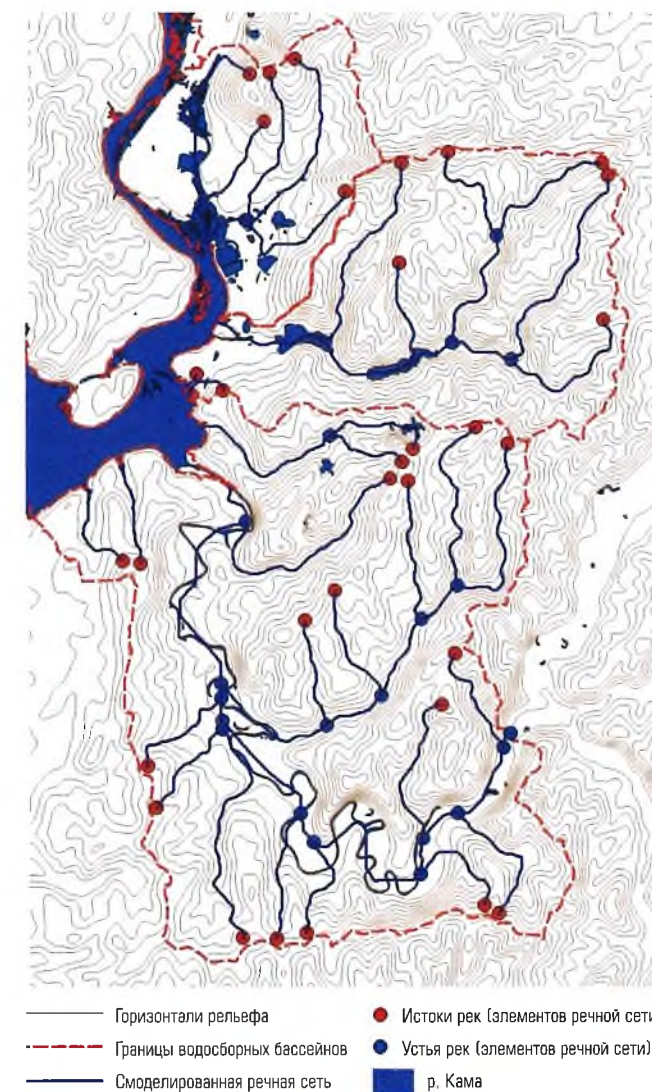


Рис. 1. Модель речной сети, подготовленная по данным дистанционного зондирования

Доля объясненной дисперсии

Компонента	Начальные собственные значения		
	Итого	Процент дисперсии	Кумулятивный процент
1	2,951	42,151	42,151
2	2,029	28,986	71,137
3	0,835	11,927	83,064
4	0,441	6,300	89,364
5	0,372	5,314	94,678
6	0,246	3,508	98,186
7	0,127	1,814	100,000

Чаще всего в лаборатории выполняют работы по созданию региональных гидродинамических моделей. Среди основных особенностей процесса следует отметить следующие.

1. Отражение достоверного геологического строения участка. Все кровли и подошвы слоев задают из геологической модели

и в дальнейшем изменяют в зависимости от особенностей режима питания, транзита и разгрузки водоносных горизонтов на разных участках.

2. Использование бассейнового принципа построения моделей, т. е. полное соответствие математических границ модели физическим гидродинамическим границам в природно-техногенных системах.

3. Калибровка (верификация) модели в нестационарном режиме с использованием данных режимных наблюдений в скважинах, сведений об изменении величины инфильтрационного питания в зависимости от сезона года, а также данных о колебании уровня воды в Камском водохранилище.

4. Учет в модели влияния всех техногенных воздействий, таких как тампонаж или откачка из контура водопонижающих скважин.

На выходе получают базовую гидродинамическую модель, которая служит хорошей основой и значительно упрощает и ускоряет создание локальных гидродинамических моделей для решения конкретных задач.

Непосредственно для вычисления используют модули Modflow NTW и реке Modflow 2005, что обусловлено особенностью гидрогеологических условий месторождения (мощная зона азрации, значительные сезонные колебания уровня подземных вод в первом от поверхности водоносном горизонте) [17].

Отдельной задачей является анализ состава рассолопроявлений в горных выработках с целью оценки их опасности для отработки месторождения. Чистые по генезису рассолы — постседиментационные, конденсатные, закладочные или из надсолевых отложений — позволяют сразу сделать необходимые выводы. Но поскольку рассолы часто бывают смешанного состава, не всегда удается сразу получить необходимую информацию. В таком случае могут помочь гидрохимические расчеты и моделирование. С их помощью можно предположить, какие минералы и в каком количестве растворит рассол заданного состава или, наоборот, решить обратную задачу — определить, что и в каком количестве растворялось при формировании рассола конечного состава из известного начального.

В одном из рудников было вскрыто рассолопроявление значительного объема. Возник вопрос о генезисе этого рассолопроявления. Исследовательская группа, ссылаясь на состав рассолов, значительно отличавшийся как от надсолевых вод, так и от постседиментационных рассолов, выдвинула предположение, что это рассолы подсолевого происхождения [18].

Составы всех трех типов рассолов, по данным исследовательской группы, показаны на **рис. 2**.

Поскольку присутствие остальных компонентов мало, в первом приближении можно рассматривать проблему с использованием диаграммы NaCl — KCl — MgCl₂. На рисунке видно, что седиментационные рассолы имеют существенное содержание магния, надсолевые — преимущественно хлоридно-натриевого состава, а рассолопроявление сдвинуто от вершины NaCl в сторону KCl. Индекс натрия 73,3 %, магния — около 2 %.

Задачу можно попробовать решить методами вычислительной гидрогеохимии. Надсолевой рассол был «добавлен» в избыток

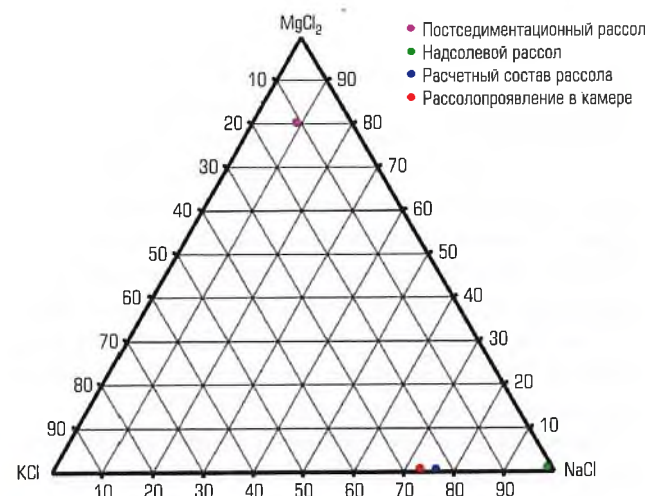


Рис. 2. Фигуративные точки состава рассолов

сульфата и галита, что примерно соответствует реальной ситуации, так как выше рассолопроявления залегает сильвинит. Расчет вели с помощью программы PHREEQC по методу Питцера [19, 20]. В состоянии насыщения исходный рассол получил индекс по натрию 78 % (исходный 98,2 %). Если исходный рассол был бы чуть более пресным, то индекс натрия опустился бы до тех же 70 %. Состав рассола зависит также от соотношения сильвина и галита в породе, через которую он фильтруется. Очевидно, что в избытке сильвина галит частично высаливается.

Таким образом, моделирование показало, что данный рассол вполне мог сформироваться при фильтрации вод надсолевого комплекса через сильвинитовые отложения.

В лаборатории также выполняют работы по гидрогеомиграционному моделированию для решения прикладных задач производства.

Авторы в своих исследованиях использовали гидродинамический подход к решению подобных задач, т. е. анализировали не конкретное вещество, а некую абстрактную субстанцию, переносимую потоком движущейся жидкости. Как правило, используют модель с гидродинамической дисперсией, метод характеристик, позволяющий избежать численной дисперсии [21] и изотермы в виде элементарных функций, описывающие равновесие системы вода—порода.

В случае необходимости смоделировать движение жидкостей разной плотности используют метод конечных разностей (МКР), что вызывает дополнительные трудности в результате заметного возрастания численной дисперсии. Для моделирования движения жидкостей разных плотностей реализуют программный модуль SEAWAT V 4.

Таким образом, данную задачу решаем в два этапа. На первом проводим гидродинамическое моделирование (в соответствии с тем, как было описано чуть ранее для создания региональных моделей), на втором — на ее основе создаем модель массопереноса.

Следует заметить, что наработки в области гидрогеодинамического моделирования и моделирования реальных

физико-химических взаимодействий в перспективе должны быть объединены в одну модель. Необходимо рассматривать единый поток движущейся воды — как поверхностной, так и подземной. Следует также выполнять расчеты физико-химических взаимодействий.

Заключение

Показано, что возрастающая сложность природно-техногенных объектов исследования требует привлечения разнообразных программных инструментов. Так, при гидрогеологическом изучении Верхнекамского месторождения калийных солей необходимо было построение речных бассейнов и речной сети, для этого использовали геоинформационные технологии. Далее требовалась гидрогеодинамическая схематизация в пределах этих бассейнов, в этом случае помогло применение методов многомерной

Библиографический список

1. Сеннов А. С., Мухаметдинов А. В. Особенности использования информационных технологий при исследовании подземных вод Верхнекамского месторождения калийных солей // Современные тенденции в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья : матер. междунар. науч.-практ. конф. — Екатеринбург, 2019. С. 103–106.
2. Wilson J. P., Gallant J. C. Terrain Analysis: Principles and Applications. — New York : John Wiley & Sons, 2000. — 520 p.
3. Глогов А. А. Использование ЦМР для эффективного управления природопользованием // Геоматика. 2013. № 4. С. 32–36.
4. Cheskidov V. V., Lipina A. V., Melnichenko I. A. Integrated monitoring of engineering structures in mining // Eurasian Mining. 2018. No. 2. P. 18–21. DOI: 10.17580/em.2018.02.05
5. Документация QGIS 2.18. URL: <https://docs.qgis.org/2.18/ru/docs/#> (дата обращения: 12.03.2021).
6. Software. URL: <http://www.saga-gis.org/en/index.html> (дата обращения: 12.03.2021).
7. 5 Free Global DEM Data Sources — Digital Elevation Models. 2021. URL: <https://gisgeography.com/free-global-dem-data-sources/> (дата обращения: 12.03.2021).
8. Water Resources Groundwater Software / U.S. Geological Survey. URL: water.usgs.gov/software/lists/groundwater (дата обращения: 12.03.2021).
9. PHREEQC Version 3 / U.S. Geological Survey, 2020. URL: <https://www.usgs.gov/software/phreeqc-version-3> (дата обращения: 12.03.2021).
10. Xianfang Sun, Rosin P. L., Martin R. R., Langbein F. C. Fast and Effective Feature-Preserving Mesh Denoising // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2007. Vol. 13. No. 5. P. 925–938.
11. Wang L., Liu H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling // International Journal of Geographical Information Science. 2006. Vol. 20. Iss. 2. P. 193–213.
12. Cheng-Zhi Qin, A-Xing Zhu, Tao Pei, Bao-Lin Li, Scholten T. et al. An approach to computing topographic wetness index based on maximum downslope gradient // Precision Agriculture. 2011. Vol. 12. Iss. 1. P. 32–43.
13. Карфилова Е. А., Макеев В. М., Кравченко И. М. Моделирование сети поверхностного стока для обеспечения горно-геологической безопасности Верхнекамского месторождения // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 8. С. 91–101.
14. Сеннов А. С. О возможном подходе к гидрогеодинамической схематизации надсолевой толщ Верхнекамского месторождения калийных солей // Горный журнал. 2016. № 4. С. 48–51. DOI: 10.17580/gzh.2016.04.09
15. Rowiński P. M. Publications of the Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences. — Warszawa, 2008. E-10 (406). Hydraulic Methods for Catastrophes: Floods, Droughts, Environmental Disasters. — 207 p.
16. Alvarez P. J. J., Illman W. A. Bioremediation and Natural Attenuation: Process Fundamentals and Mathematical Models. — New York : John Wiley & Sons, Inc., 2006. — 612 p.
17. MODFLOW-NWT: A Newton Formulation for MODFLOW-2005 / USGS, 2020. URL: <https://www.usgs.gov/software/modflow-nwt-a-newton-formulation-modflow-2005> (дата обращения: 12.03.2021).
18. Чайковский И. И., Коротченко О. В., Трапезников Д. Е. Новый генетический тип зон выщелачивания в солях Верхнекамского месторождения калийных солей: гидрохимические, минералогические // Литология и полезные ископаемые. 2019. № 4. С. 337–350.
19. Pitzer K. S. Thermodynamics of electrolytes. I. Theoretical basis and general equations // Journal of Physical Chemistry. 1973. Vol. 77. Iss. 2. P. 268–277.
20. Steding S., Zirkler A., Kühn M. Geochemical reaction models quantify the composition of transition zones between brine occurrence and unaffected salt rock // Chemical Geology. 2020. Vol. 532. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2019.119349
21. Woods J. A., Teubner M. D., Simmons C. T., Narayan K. A. Numerical error in groundwater flow and solute transport simulation // Water Resources Research. 2003. Vol. 39. No. 6. 1158. DOI: 10.1029/2001WR000586

«ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ», 2021, № 4, pp. 63–68
DOI: 10.17580/gzh.2021.04.09

Application of information technologies in the analyses of groundwater in the Upper Kama Potash–Magnesium Salt Deposits

Information about authors

A. S. Sennov¹, Senior Researcher, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Andrey.Sennov@uralkali.com

A. V. Mukhametdinov¹, Senior Researcher

A. I. Myasichenko¹, Junior Researcher

A. V. Kalugin¹, Junior Researcher

¹ Branch of "VNII Galurgii" JSC in Saint Petersburg

Abstract

The article gives a review of the software techniques used in solution of actual applied problems in the mining industry. The adequate decision-making requires various software techniques. The list of the applied problems includes processing of remote sensing data, digital elevation modeling and generation of other digital models of terrain, localization of catchment basins and river networks, or morphometric analysis. Various geoinformation systems are used to this end.

Another task is hydrogeological patterning of aquifers. It is required to use the methods of multivariate statistics, such as the factor analysis, for instance.

The multidimensionality and complexity of natural and engineering systems also condition the use of the mathematical modeling apparatus based on the numerical solution of second-order elliptical equations in terms of partial derivatives.

Natural water feature diverse physicochemical processes, which should also be calculated.

The modeling outcome is used to predict different processes in the nature-and-mine system. For example, flow of pollutions in underground hydrosphere, lowering of the water level, dissolution-precipitation reactions, etc. Applied problem solving requires using wide ranges of mathematical methods and relevant software techniques.

Keywords: applied mathematical modeling, software, digital elevation model, geomatics, geoinformation technologies, hydrogeodynamic and hydrogeochemical modeling.

References

- Sennov A. S., Mukhametdinov A. V. Use of information technologies in ground water analysis in the Upper Kama Potash Salt Deposit. *Current Tendencies in Theory and Practice of Mineral Mining and Waste Management: International Conference Proceedings*. Yekaterinburg, 2019. pp. 103–106.
- Wilson J. P., Gallant J. C. *Terrain Analysis: Principles and Applications*. New York: John Wiley & Sons, 2000. 520 p.
- Glotov A. A. Application of DEM for tasks of rational nature management and monitoring of natural processes. *Geomatika*. 2013. No. 4. pp. 32–36.
- Cheskidov V. V., Lipina A. V., Melnichenko I. A. Integrated monitoring of engineering structures in mining. *Eurasian Mining*. 2018. No. 2. pp. 18–21. DOI: 10.17580/em.2018.02.05
- Documentation for QGIS 2.18. Available at: <https://docs.qgis.org/2.18/ru/docs/#> (accessed: 12.03.2021).
- Software. Available at: <http://www.saga-gis.org/en/index.html> (accessed: 12.03.2021).
- 5 Free Global DEM Data Sources – Digital Elevation Models. 2021. Available at: <https://gisgeography.com/free-global-dem-data-sources/> (accessed: 12.03.2021).
- Water Resources Groundwater Software. U.S. Geological Survey. Available at: water.usgs.gov/software/lists/groundwater (accessed: 12.03.2021).
- PHREEQC Version 3. U.S. Geological Survey, 2020. Available at: <https://www.usgs.gov/software/phreeqc-version-3> (accessed: 12.03.2021).
- Xianfang Sun, Rosin P. L., Martin R. R., Langbein F. C. Fast and Effective Feature-Preserving Mesh Denoising. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2007. Vol. 13, No. 5. pp. 925–938.

- Wang L., Liu H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. *International Journal of Geographical Information Science*. 2006. Vol. 20, Iss. 2. pp. 193–213.
- Cheng-Zhi Qin, A-Xing Zhu, Tao Pei, Bao-Lin Li, Scholten T. et al. An approach to computing topographic wetness index based on maximum downslope gradient. *Precision Agriculture*. 2011. Vol. 12, Iss. 1. pp. 32–43.
- Karfidova E. A., Makeev V. M., Kravchenko I. M. Modeling the surface runoff network to ensure geological safety at the Verkhnekamsk deposit. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 2018. No. 8. pp. 91–101.
- Sennov A. S. A possible approach to the suprasalt formation hydrogeodynamic schematization of Verkhnekamskoe deposit of potassium salts. *Gornyi Zhurnal*. 2016. No. 4. pp. 48–51. DOI: 10.17580/gzh.2016.04.09
- Rowinski P. M. Publications of the Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences. Warszawa, 2008. E-10 (406). Hydraulic Methods for Catastrophes: Floods, Droughts, Environmental Disasters. 207 p.
- Alvarez P. J. J., Illman W. A. *Bioremediation and Natural Attenuation: Process Fundamentals and Mathematical Models*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2006. 612 p.
- MODFLOW-NWT: A Newton Formulation for MODFLOW-2005. USGS, 2020. Available at: <https://www.usgs.gov/software/modflow-nwt-a-newton-formulation-modflow-2005> (accessed: 12.03.2021).
- Chaikovskiy I. I., Korotchenkova O. V., Trapeznikov D. E. A New Genetic Type of Leaching Zone in Salts of the Verkhnyaya Kama Potassium Salt Deposit: Hydrochemical, Mineralogical, and Structural Indicators. *Lithology and Mineral Resources*. 2019. Vol. 54, No. 4. pp. 308–319.
- Pitzer K. S. Thermodynamics of electrolytes. I. Theoretical basis and general equations. *Journal of Physical Chemistry*. 1973. Vol. 77, Iss. 2. pp. 268–277.
- Steding S., Zirkler A., Kühn M. Geochemical reaction models quantify the composition of transition zones between brine occurrence and unaffected salt rock. *Chemical Geology*. 2020. Vol. 532. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2019.119349
- Woods J. A., Teubner M. D., Simmons C. T., Narayan K. A. Numerical error in groundwater flow and solute transport simulation. *Water Resources Research*. 2003. Vol. 39, No. 6. 1158. DOI: 10.1029/2001WR000586



УДК 631.83

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА КАЛИЙНЫХ УДОБРЕНИЙ*



Г. П. ФЕДУЛОВА,

зав. лабораторией испытаний
и стандартизации продукции,
Galina.Fedulova@uralkali.com



С. В. БУКША,

зав. сектором стандартизации



М. Д. РОГОЗИН,

ведущий инженер



К. О. БЕЛЯКОВА,

инженер

Филиал АО «ВНИИ Галургии» в Санкт-Петербурге, Россия

Введение

Требования внутреннего и международного рынка удобрений предопределяют поставки калийных удобрений с содержанием хлористого калия не менее 95 % и с определенными физико-механическими свойствами. Применяемые в настоящее время технологии флотационного и галургического производства калийных удобрений обеспечивают требуемое содержание хлористого калия в готовой продукции. В связи с этим особое внимание уделяется обеспечению требуемых физико-механических свойств калийных удобрений, особенно при поставке их на экспорт в условиях высокой конкуренции на международном рынке.

Для снижения слеживаемости и пылимости хлористый калий после сушки обрабатывают реагентами-антислеживателями и пылеподавителями. Применение данных реагентов уменьшает смачиваемость поверхности хлористого калия, предотвращая его слеживаемость, улучшает сыпучесть мелкозернистого материала, уменьшает пылимость мелкозернистого и гранулированного хлористого калия, снижает влагопоглощение и способствует сохранению прочностных свойств гранулированного продукта при хранении и транспортировании [1–3]. Пылимость удобрений является важной характеристикой для обеспечения санитарных условий складирования и транспортирования калийных удобрений, а также при оценке потребителем качества поставляемой продукции.

Российская компания ПАО «Уралкалий» является одним из крупнейших производителей калийных удобрений (около 20 % мирового рынка). Реализацию продукции компания осуществляет

Приведены результаты исследования действия различных модифицирующих добавок для обработки хлористого калия, улучшающих его физико-механические свойства и повышающих эффективность его применения в качестве удобрения.

Ключевые слова: удобрение, хлористый калий, физико-механические свойства, пылимость, слеживаемость, пылеподаватели, антислеживатели.

DOI: 10.17580/gzh.2021.04.10

во многие страны мира, транспортируя ее главным образом железнодорожным и морским транспортом.

Во «ВНИИ Галургии» проводят комплекс исследований по изучению различных факторов, влияющих на физико-механические свойства калийных удобрений. Исследуют антислеживающее и пылеподавающее действие различных модифицирующих реагентов [4–6], а также выполняют мониторинг качества удобрений, отгружаемых ПАО «Уралкалий» через АО «Балтийский Балкерный Терминал» (ББТ).

Объекты и методы исследования

Объектом исследований является мелкозернистый и гранулированный флотационный хлористый калий. Мелкозернистый хлористый калий имеет крупность $-1,6+0$ мм. Гранулированный хлористый калий в основном представлен гранулами крупностью $-4+2$ мм неправильной формы.

Физико-механические свойства удобрений определяют по следующим основным показателям:

- слеживаемость;
- пылимость;
- сыпучесть;
- влажность;
- влагопоглощение;
- гранулометрический состав;
- содержание органических примесей и реагентов-модификаторов.

Слеживаемость мелкозернистого KCl определяют экспресс-методом [7]. Показателем слеживаемости является скорость сверления образца (с/мм).

Оценку **пылимости мелкозернистого и гранулированного хлористого калия** осуществляют с использованием разработанного в институте прибора ПКПГ в комплексе с ротационной установкой для отбора воздуха, а также на анализаторе пылесодержания DustMon RD 100 (рис. 1).

Сыпучесть удобрений оценивают по времени истечения пробы материала из конусной воронки ЛОВ.

Оценку **прочности гранулированного хлористого калия** выполняют по следующим показателям:

*В работе принимали участие зам. технического директора по процессам обогащения, канд. техн. наук С. Н. Алиферова и начальник отдела технического контроля Ю. И. Москвичева (ПАО «Уралкалий»).



Рис. 1. Анализатор пылесодержания DustMon RD 100



Рис. 2. Анализатор статической прочности гранул ACAR



Рис. 3. Воздушно-ситовой просеиватель Hosokawa-Alpine 200 LS

- динамическая прочность, характеризующая прочность гранул при механическом перемешивании — на приборе ПКПГ;
- статическая прочность единичных гранул, характеризующая объемные свойства гранул — на автоматическом приборе ACAR (рис. 2) и приборе ИПГ;
- истираемость, определяющая состояние поверхности гранул — на приборе ПКПГ.

Для повышения точности и воспроизводимости определения прочности гранул исследования проводят на фракции крупностью $-2,8+2,5$ мм.

Гранулометрический состав гранулированного хлористого калия характеризуется такими параметрами, как индекс однородности (ИО), основное размерное число (ОРЧ) и зависит от статической прочности единичных гранул.

Индекс однородности представляет собой отношение размеров «малых» и «больших» частиц в продукте, умноженное на 100. Обычно ИО имеет значение около 50, т. е. «малые» частицы обладают размером, равным половине размера «больших» частиц, содержащихся в пробе; $ИО = S/L \cdot 100$, где S — размер «малых» частиц; L — размер «больших» частиц.

Основное размерное число — это тот размер частицы, который делит всю массу частиц на две половины, в одной из которых находятся все частицы большего размера, а в другой — все частицы меньшего размера. Распределение частиц по размеру (гранулометрический состав) представляют в виде графика и выражают в кумулятивных процентах — через массу и размер частиц.

Гранулометрический состав мелкозернистого и гранулированного материала определяют на ситовом вибрационном анализаторе AS 200. Содержание тонкодисперсных фракций (менее 0,1; 0,063; 0,045 мм) определяют на воздушно-ситовом просеивателе Hosokawa-Alpine 200 LS (рис. 3). Дополнительно на лабораторном микроскопе ЛОМО фиксируют форму и внешний вид единичных гранул.

Влажность гранулированного продукта определяют в соответствии с ГОСТом [8].

Помимо физико-механических характеристик, оценивают наличие органических примесей в хлористом калии, что обусловлено технологией его производства и обработкой реагентами перед складированием.

Содержание органических примесей в калийных удобрениях устанавливают на основании ГОСТа [9].

Результаты исследований

Исследование слеживаемости мелкозернистого хлористого калия

Антислеживатели являются важным компонентом в производстве минеральных удобрений. Их основная задача — снизить слеживаемость и повысить прочность и рассыпчатость гранул, тем самым улучшить их товарно-потребительские характеристики.

Антислеживатели состоят из смеси твердых парафинов, жидких синтетических гидрофобизаторов, узких фракций минеральных масел, жирных кислот и синтетических поверхностно-активных веществ [10, 11]. Благодаря использованию антислеживающих реагентов можно снизить показатель слеживаемости от 3 до 0,6 с/мм.

Исследование пылимости мелкозернистого хлористого калия

Крупность флотационного хлористого калия, получаемого на фабриках ПАО «Уралкалий», составляет $-1,6+0$ мм. Для оценки влияния гранулометрического состава флотационного хлористого калия на пылимость готовой продукции были проведены исследования пылимости отдельных его фракций. Результаты представлены ниже.

Результаты исследований показали, что наибольшей пылимостью характеризуются фракции крупностью менее 50–60 мкм. Уменьшение пылимости калийных удобрений может

Таблица 1. Сравнительные характеристики реагентов-пылеподавителей

Показатель	Реагент № 1	Реагент № 2	Реагент № 3
Вязкость кинематическая при 40 °С, мм ² /с	51–75	90–110	30–40 при 100 °С
Плотность при 20 °С, кг/м ³ , не более	882,4	910	950–980
Температура застывания, °С, не выше	–15	–15	–36
Температура вспышки (в открытом тигле), °С, не ниже	234	225	230

быть достигнуто путем отделения тонкодисперсных фракций методом пневмосепарации или обработкой специальными реагентами. Применение пневмосепарации требует больших энергозатрат и сложной системы очистки отходящих газов. Более перспективным является метод обработки калийных удобрений специальными органическими реагентами, закрепляющими пылевые частицы на поверхности соляных минералов. По полученным данным, в наибольшей степени органические реагенты закрепляются на фракции крупностью менее 200 мкм.

Гранулометрический состав и пылимость мелкозернистого КСГ различной крупности

Фракции, мм	Пылимость, мг/кг
$-1,600+0,100$	33
$-0,100+0,063$	109
$-0,050+0,000$	1399
$-0,063+0,000$	1481
$-0,100+0,000$	1590

Пылимость мелкозернистого хлористого калия после обработки реагентами-пылеподавителями уменьшается до 50 мг/кг.

Исследование эффективности действия модифицирующих реагентов на уменьшение пылимости гранулированного хлористого калия

Для улучшения физико-механических свойств гранулированного хлористого калия были испытаны реагенты различного состава. Испытания проводили на пробе гранулированного хлористого калия с содержанием влаги 0,01–0,3 %.

В табл. 1 приведены сравнительные характеристики реагентов, испытываемых в качестве пылеподавителей.

Основными требованиями, предъявляемыми к физико-химическим свойствам используемых веществ, помимо технологических свойств, являются безопасность их использования для человека, а также высокая температура вспышки и низкая температура застывания (обусловлено требованиями пожарной безопасности и условиями использования реагентов).

Реагенты-пылеподаватели, использованные для обработки гранулированного хлористого калия, относятся к продуктам нефтехимической переработки и близки по составу к нефтяным маслам различной степени дистилляции.

Для снижения вязкости и более равномерного распределения по поверхности гранулированного продукта реагенты-пылеподаватели перед обработкой обычно подогревают до температуры 60–65 °С.

Таблица 2. Сравнительные характеристики гранулированного хлористого калия (фракция $-2,8+2,5$ мм)

Режим обработки	Статическая прочность единичных гранул, Н/гр	Массовая доля разрушенных гранул, %	Пылимость, мг/кг	Истираемость, %
Без обработки	53,43	22,67	29,7	7,7
Расход базовый				
Реагент № 1	55,98	20,31	4,9	6,0
Реагент № 2	60,63	16,62	3,9	5,7
Реагент № 3	60,39	11,29	4	7,1
Расход, увеличенный в 2 раза				
Реагент № 1	49,38	20,73	1,5	5,7
Реагент № 2	55,69	19,62	0,5	5,0
Реагент № 3	63,70	11,15	1,1	5,4

Разогрев и подачу осуществляют на оборудовании с замкнутым производственным циклом, исключая утечки, сливы и выбросы компонентов в окружающую среду. Оптимальный расход реагента определяют при лабораторных и опытно-промышленных испытаниях, обычно он составляет 0,05–0,1 % массы хлористого калия.

В лаборатории гранулированный хлористый калий обрабатывали реагентами-пылеподавателями. В каждом полученном образце гранулированного хлористого калия определяли следующие качественные показатели:

- массовую долю воды по ГОСТ 20851.4–75 [8];
- статическую прочность для фракций от 2,5 до 2,8 мм [12];
- истираемость по ГОСТ 21560.3–82 [13];
- пылимость по СТО СПЭКС 001–98 [14];
- массовую долю разрушенных гранул.

Физико-механические показатели гранулированного хлористого калия СКРУ-2, обработанного реагентами-пылеподавателями, представлены в табл. 2.

Результаты проведенных исследований показали, что наилучшие качественные показатели у гранулированного хлористого калия обеспечены после его обработки реагентом № 3 с увеличенным расходом пылеподавателя. Пылимость снизилась на 96 %, доля разрушенных гранул на 51 %, истираемость на 30 %, а статическая прочность увеличена на 19 %. Разработаны рекомендации по проведению опытно-промышленных испытаний вышеуказанных реагентов.

Выводы

1. Наибольшее влияние на пылимость и слеживаемость калийных удобрений оказывают содержащиеся в готовом хлористом калии тонкодисперсные фракции крупностью менее 50–60 мкм.
2. Преимущественная сорбция модифицирующих реагентов на тонкодисперсных фракциях калийных удобрений создает

условия для устранения пылимости удобрений путем обработки органическими модифицирующими добавками, без применения дорогостоящего процесса пневмосепарационного удаления пылевых фракций из готовой продукции.

Библиографический список

1. Васильев А. М., Фролов В. В. Усовершенствование методики определения гранулометрических характеристик мелкозернистых материалов на ситовых анализаторах различной конструкции // Обогащение руд. 2016. № 3. С. 41–46. DOI: 10.17580/or.2016.03.07
2. Кувшинников И. М., Кондаков Д. Ф., Позднякова А. В. Гранулирование хлорида калия в присутствии пластифицирующих и поверхностно-активных добавок // Химическая промышленность. 1996. Т. 73. № 1.
3. Sioson A. S., Earvin Sy Choi A., de Luna M. D. G., Huang Y.-H., Lu M.-C. Calcium carbonate granulation in a fluidized-bed reactor: Kinetic, parametric and granule characterization analyses // Chemical Engineering Journal. 2020. Vol. 382. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122879
4. Шилов В. В., Нестерова С. Ю. Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей как фактор динамичного развития Пермского региона // Экономика и предпринимательство. 2016. № 11-1(76). С. 1017–1022.
5. Holliman N. New study predicts anti-caking agents will remain a vital revenue pocket for fertilizer additives manufacturers // World Fertilizer. 2019. May.
6. Jančaitienė K., Šlinkšienė R. Influence of cellulose additive on the granulation process of potassium dihydrogen phosphate // Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly. 2020. Vol. 26. No. 4. P. 359–367.
7. Lachance E. V., Abatzoglou N., Gosselin R., Duchesne C., Cournoyer A. Potassium chloride caking tendency: A parametric study of cake break energy // Advanced Powder Technology. 2018. Vol. 29. Iss. 9. P. 2140–2152.

«GORNYI ZHURNAL», 2021, № 4, pp. 69–72
DOI: 10.17580/gzh.2021.04.10

Improving the quality of potash fertilizers

Information about authors

G. P. Fedulova¹, Head of Product Testing and Standardization Laboratory, Galina.Fedulova@uralkali.com
S. V. Buksha¹, Head of Standardization Sector
M. D. Rogozin¹, Leading Engineer
K. O. Belyakova¹, Engineer
¹ Branch of "VNII Galurgii" JSC in Saint Petersburg

Abstract

Both domestic and international markets demand potash fertilizers with potassium chloride content not less than 95%, as well as with definite physical and mechanical properties. The flotation and halurgical methods of potassium chloride production ensure the required content of potassium chloride in the finished product. Thus far, the spotlight is on the wanted physical and mechanical properties of potash fertilizers, especially the export products under the conditions of high competition on the international market. The article presents the results of monitoring the physical and mechanical properties of fine-grained and granular potassium chloride exported by Uralkali. The factors that have the greatest impact on the commercial attractiveness of fertilizers to meet the international market demand are highlighted. The article studies the influence of various modifiers aimed to improve the physical and mechanical properties of potassium chloride and the agrochemical technology of fertilizer application. The quality of the final product should be closely related with the production technology of potassium chloride, its modification using different reagents, as well as with the conditions of haulage and warehousing of the finished product.

The authors sincerely appreciate participation of Deputy Chief Technical Officer, Candidate of Engineering Sciences S. N. Aliferova and Head of Technical Control Department Yu. I. Moskvicheva, Uralkali, in the studies.

Keywords: fertilizer, potassium chloride, physical and mechanical properties, dustiness, caking property, dust suppressors, anti-caking agents.

References

1. Vasilyev A. M., Frolov V. V. Improvement of fine-grained materials size distribution characteristics determination methods on testing sieves of different design. *Obogashchenie Rud.* 2016. No. 3. pp. 41–46. DOI: 10.17580/or.2016.03.07

3. Использование в качестве модифицирующей добавки реагента № 3 с кинематической вязкостью 30–40 мм²/с обеспечивает наибольшую эффективность устранения пылимости по сравнению с реагентами № 1 и 2.

8. Тетерина Н. Н., Сабиров Р. Х., Сквирский Л. Я., Кириченко Л. Н. Технология флотационного обогащения калийных руд. — Пермь — Соликамск — Березники : ОГУП «Соликамская типография», 2002. — 484 с.
9. Значимые достижения в технологии флотации на машине Pneuflo от фирмы MBE-CMT // Добывающая промышленность. 2017. № 2. С. 6–7.
8. ГОСТ 20851.4–75. Удобрения минеральные. Методы определения воды. — М. : ИПК Издательство стандартов, 2000. — 7 с.
9. ГОСТ 4568–95. Калий хлористый. Технические условия. — Минск : ИПК Издательство стандартов, 1996. — 16 с.
10. Король А. Р., Лановецкий С. В., Косвинцев О. К. Анализ способов регулирования качественных характеристик хлорида калия // Молодежная наука в развитии регионов : IX Всероссийская конф. — Березники, 2019. С. 234–239.
11. Шломина Л. Ф., Диктеевская Л. В., Шевчук В. В. Кондиционирование мелкозернистого хлорида калия водными эмульсиями на основе нефтепродуктов // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук. 2011. № 4. С. 95–99.
12. Анализаторы статической прочности гранул ACAR. URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/51298-12-acar-54477> (дата обращения: 19.12.2020).
13. ГОСТ 21560.3–82. Удобрения минеральные. Метод определения динамической прочности и истираемости (с изм. № 1, 2). — М., 2003. — 3 с.
14. СТО СПЭКС-001–98. Калий хлористый, поставляемый на экспорт. Технические условия. — Пермь : ОАО «ВНИИГалургии», 1998. [ГЖ](#)

2. Kuvshinnikov I. M., Kondakov D. F., Pozdnyakova A. V. Granulation of potassium chloride in the presence of plastifiers and surfactants. *Russian Chemical Industry*. 1996. Vol. 73, No. 1.
3. Sioson A. S., Earvin Sy Choi A., de Luna M. D. G., Huang Y.-H., Lu M.-C. Calcium carbonate granulation in a fluidized-bed reactor: Kinetic, parametric and granule characterization analyses. *Chemical Engineering Journal*. 2020. Vol. 382. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122879
4. Shilov V. V., Nesterova S. Yu. Verkhnekamskoye potassium and magnesium salts as a factor in the dynamic development of the Perm region. *Ekonomika i predprinimatelstvo*. 2016. No. 11-1(76). pp. 1017–1022.
5. Holliman N. New study predicts anti-caking agents will remain a vital revenue pocket for fertilizer additives manufacturers. *World Fertilizer*. 2019. May.
6. Jančaitienė K., Šlinkšienė R. Influence of cellulose additive on the granulation process of potassium dihydrogen phosphate. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*. 2020. Vol. 26, No. 4. pp. 359–367.
7. Lachance E. V., Abatzoglou N., Gosselin R., Duchesne C., Cournoyer A. Potassium chloride caking tendency: A parametric study of cake break energy. *Advanced Powder Technology*. 2018. Vol. 29, Iss. 9. pp. 2140–2152.
8. Teterina N. N., Sabirov R. Kh., Skvirskiy L. Ya., Kirichenko L. N. Technology of potash ore flotation. Perm — Solikamsk — Berezniki : OGUP Solikamskaya tipografiya, 2002. 484 p.
9. Significant advances in flotation technology on the MBE-CMT Pneuflo machine. *Dobyyayushchaya promyshlennost*. 2017. No. 2. pp. 6–7.
8. ГОСТ 20851.4–75. Mineral fertilizers. Methods for determination of water. Moscow : IPK Izdatelstvo standartov, 2000. 7 p.
9. ГОСТ 4568–95. Potassium chloride. Specifications. Minsk : IPK Izdatelstvo standartov, 1996. 16 p.
10. Korol A. R., Lanovetskiy S. V., Kosvintsev O. K. Analysis of potassium chloride quality control methods. *Youth Science in Regional Development : IX All-Russian Conference*. Berezniki, 2019. pp. 234–239.
11. Shlomina L. F., Dikhtievskaya L. V., Shevchuk V. V. Conditioning of fine-grained potassium chloride with the help water emulsions based on the oilproducts. *Izvestiya Natsionalnoy akademii nauk Belarusi. Seriya khimicheskikh nauk*. 2011. No. 4. pp. 95–99.
12. Analyzers for static strength of ACAR grains. Available at: <https://all-pribors.ru/opisanie/51298-12-acar-54477> (accessed: 19.12.2020).
13. ГОСТ 21560.3–82. Mineral fertilizers. Method for determination of dynamic strength and attrition (incl. Revisions 1, 2). Moscow, 2003. 3 p.
14. Specifications STO SPEKS-001–98. Exportable potassium chloride. Perm : VNII Galurgii JSC, 1998.

УДК 622.7

ПОЛУЧЕНИЕ ОБЕСПЫЛЕННОГО ХЛОРИСТОГО КАЛИЯ ПРИ ГАЛУРГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ КАЛИЙНЫХ РУД



А. В. ПАСКИНА,

зав. лабораторией технологии удобрений и солей,
канд. техн. наук, Anna.Paskina@uralkali.com



Е. Б. ПАНАСЮК,

старший научный сотрудник лаборатории технологии удобрений и солей

Филиал АО «ВНИИГалургии» в Санкт-Петербурге, Россия

Введение

Одним из основных показателей, определяющих потребительские свойства хлористого калия, является содержание в продукте пылевидных фракций размером менее 0,1 мм.

При массовой доле в продукте фракций размером менее 0,1 мм не более 3 % значительно улучшаются его реологические свойства: снижается слеживаемость и пылимость, возрастает сыпучесть, и, как следствие, улучшаются условия его транспортирования и расширяются возможности использования для получения сложных и бесхлорных удобрений, таких как нитрат калия и сульфат калия, а также в металлургии и некоторых других отраслях.

С целью получения обеспыленного продукта реализуют ретурные схемы, которые предусматривают возврат пылевидных фракций, образующихся при сушке кристаллизата хлористого калия, со стадий «сухой» и «мокрой» пылеочистки в виде раствора на стадию вакуум-кристаллизации.

В 1982 г. в Четвертом Солигорском рудоуправлении ПО «Беларуськалий» была введена в эксплуатацию первая в СССР установка регулируемой вакуум-кристаллизации хлористого калия (РВКУ), разработанная фирмой REC-Engineering (Франция), которая гарантировала получение крупнокристаллического обеспыленного продукта, содержащего не более 1,5 % частиц размером менее 0,1 мм. Получение крупнокристаллического продукта обеспечивалось гидродинамическим режимом работы аппаратов регулируемой вакуум-кристаллизации; обеспыливание продукта осуществляли на стадии пылеочистки в сушильном отделении с возвратом пылевидных фракций на РВКУ [1].

На обогатительных фабриках Канады, в том числе перерабатывающих сильвинитовые руды Саскачеванского месторождения,

Дан ретроспективный обзор флотационно-галургических схем переработки калийных руд. Приведены результаты исследований, направленных на повышение качества получаемого калийного концентрата с применением технологии обеспыливания и вакуум-кристаллизации.

Ключевые слова: калийные руды, схемы переработки, калийный концентрат, обеспыливание, вакуум-кристаллизация.

где реализованы комбинированные флотационно-галургические схемы, предусмотрен возврат пылевидных фракций, образующихся при сушке флотационного и галургического хлористого калия, а также при его грануляции и погрузке, на галургическую переработку методом растворения-кристаллизации [2].

На галургической фабрике «горячего» разложения компании DSW в Израиле, где сырьем для получения хлористого калия является карналлит, кристаллизующийся из рассолов Мертвого моря в системе выпарных бассейнов [3, 4], предусмотрена подача на РВКУ, наряду с горячим насыщенным раствором, раствора пылевидных фракций продукта со стадии пылеочистки дымовых газов сушильного отделения. Получаемый хлористый калий обеспылен по классу 0,25 мм.

Получение обеспыленного хлористого калия при галургической переработке калийных руд на ПАО «Уралкалий»

В 1992 г. в Четвертом Березниковском рудоуправлении (БКПРУ-4) ПАО «Уралкалий» была введена в работу первая технологическая линия по производству галургического хлористого калия методом растворения-кристаллизации. Кристаллизация хлористого калия из горячего насыщенного по KCl раствора осуществляют на РВКУ, проект которой был разработан фирмой Lurgi Umwelt und Chemotechnik GmbH (Германия). Схема гарантирует получение крупнокристаллического обеспыленного по классу 0,2 мм продукта с содержанием частиц размером менее 0,2 мм не более 5 % [1].

Технологическая схема предусматривает обеспыливание хлористого калия на стадии пылеочистки в сушильном отделении, растворение пылевидных фракций продукта и возврат образующегося раствора в начало РВКУ, где он объединяется с горячим насыщенным по KCl раствором, поступающим со стадии осветления из отделения растворения сильвинитовой руды; объединенный раствор подают в первый корпус РВКУ. Принципиальная схема растворения пылевидных фракций продукта (ретурная схема) приведена на **рис. 1**. Для растворения пылевидных фракций хлористого калия используют конденсат первой части РВКУ, а также минерализованную воду. Для интенсификации

© Паскина А. В., Панасюк Е. Б., 2021

Таблица 1. Массовая доля пылевидных фракций и средний размер кристаллов хлористого калия, получаемого на одной технологической линии БКПРУ-4

Продукт	Расход насыщенного раствора на РВКУ, м³/ч	Массовая доля фракции размером менее 0,2 мм в продукте, %	Средний размер кристалла, мм
95%-ный КСl	От 1190 до 1320	0,1–0,3	0,60–0,72
95%-ный КСl	От 2020 до 2100	0,6–0,7	0,68–0,71
98%-ный КСl	От 1800 до 1850	3,4–4,1	0,60–0,65

растворения пылевидных фракций хлористого калия перемешивание рабочей среды осуществляют путем циркуляции с помощью насоса. На рис. 2 показаны циклоны сухой пылеочистки, разгрузку циклонной пыли из которых осуществляют через шлюзовые затворы в гидрожелоба, откуда ее смывают конденсатом первой части РВКУ и водой в емкость для растворения.

За все время работы с 1992 г. ретурная схема на БКПРУ-4 показывает стабильно положительные результаты. В табл. 1 приведены данные по гранулометрическому составу получаемого хлористого калия. Несмотря на увеличение производительности технологической линии по сравнению с начальным периодом эксплуатации, получаемый продукт (95- и 98%-ный хлористый калий) был обеспылен по классу 0,2 мм.

В настоящее время на БКПРУ-4 в работе находятся две технологические линии; основным продуктом является 98%-ный хлористый калий, при этом массовая доля фракции размером менее 0,2 мм в продукте не превышает 5 %. Содержание наиболее мелких пылевидных фракций размером менее 0,1 мм составляет от 0,1 до 0,4 %. Средний размер кристалла 0,56–0,63 мм.

Наряду с получением обеспыленного продукта ретурная схема, предусматривающая возврат на стадию вакуум-кристаллизации пылевидных фракций хлористого калия в виде раствора, обеспечивает получение продукта заданного качества по содержанию основного вещества КСl за счет снижения насыщения по NaCl осветленного раствора, поступающего из отделения растворения руды, перед его подачей на РВКУ, без значительного уменьшения насыщения по КСl.

Качество галургического хлористого калия в значительной степени определяется расходом воды на стадию вакуум-кристаллизации. Все жидкие фазы на стадиях растворения руды, сгущения солевого шлама, осветления насыщенного раствора насыщены по NaCl. Процесс кристаллизации хлорида калия на стадии вакуум-кристаллизации протекает по линии совместного насыщения хлоридами калия и натрия. Если растворимость хлорида калия в основном зависит от температуры, то растворимость хлорида натрия определяется содержанием воды в системе. В вакуум-кристаллизаторах наряду с охлаждением рабочей среды происходит испарение воды из насыщенного раствора. При испарении воды содержание NaCl в жидкой фазе начинает превышать концентрацию насыщения при соответствующей температуре, и хлорид натрия будет кристаллизоваться в твердую фазу наряду с хлоридом калия. Для того, чтобы предотвратить загрязнение получаемого хлорида калия хлоридом натрия, на стадию

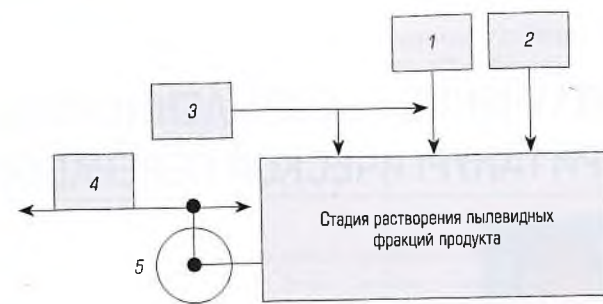


Рис. 1. Принципиальная схема растворения пылевидных фракций продукта на БКПРУ-4:

1 – циклонная пыль из разгрузки циклонов сухой пылеочистки; 2 – стоки скрубберов со стадии «мокрой» пылеочистки; 3 – вода (конденсат первой части РВКУ); 4 – раствор циклонной пыли на стадию вакуум-кристаллизации; 5 – центробежный насос



Рис. 2. Разгрузка циклонной пыли из циклонов сухой пылеочистки в гидрожелоба в сушильном отделении БКПРУ-4

вакуум-кристаллизации в приемный бак и в корпуса РВКУ подают воду, снижая таким образом степень насыщения жидкой фазы по NaCl. Одновременно пропорционально снижают насыщение жидкой фазы по КСl; из ненасыщенной по КСl жидкой фазы кристаллизуются в твердую фазу хлорид калия не может. В результате начало процесса кристаллизации хлористого калия смещается из первого корпуса в последующие, в которых более низкая температура, продолжительность пребывания твердой фазы в вакуум-кристаллизаторах (время роста кристаллов) при этом сокращается, и средний размер кристаллов уменьшается, что наиболее выражено при производстве 98%-ного хлористого калия, получение которого требует повышенного расхода воды наряду с подачей раствора пылевидных фракций продукта. Средний размер кристаллов 98%-ного хлористого калия примерно на 10 % меньше, чем размер кристаллов 95%-ного продукта.

Таблица 2. Содержание КСl и NaCl в осветленном насыщенном растворе, растворе пылевидных фракций продукта и в насыщенном растворе на входе в первый корпус РВКУ

Технологический поток	Массовая доля в потоке, %	
	КСl	NaCl
Осветленный насыщенный раствор	20,0–20,5	16,8–17,2
Раствор пылевидных фракций из сушильного отделения	11,8–16,4	0,8–1,2
Насыщенный раствор на входе в первый корпус РВКУ	19,8–20,2	15,5–15,8

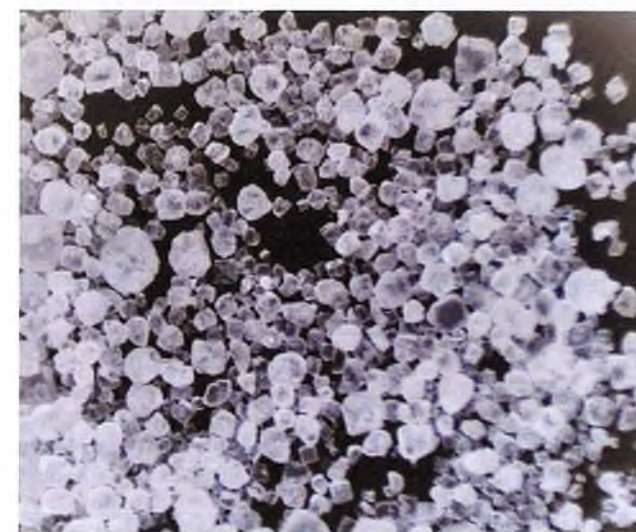


Рис. 3. Обеспыленный продукт БКПРУ-4

При подаче вместо воды на стадию вакуум-кристаллизации в приемный бак раствора пылевидных фракций продукта, в котором низкое содержание хлорида натрия, снижается насыщение осветленного раствора по NaCl, и в значительно меньшей степени по КСl, что иллюстрируют данные, приведенные в табл. 2.

Таким образом, подача раствора пылевидных фракций продукта взамен воды на стадию вакуум-кристаллизации обеспечивает снижение в осветленном насыщенном растворе, поступающем из отделения растворения руды, содержания NaCl без общего разбавления насыщенного раствора и уменьшения концентрации в нем КСl.

В таблице 3 приведены сравнительные данные по составу кристаллизата, поступающего на сушку, и циклонной пыли из разгрузки циклонов сухой пылеочистки. Примеси хлорида натрия концентрируются в основном в мелких фракциях кристаллизата хлористого калия, поэтому возврат пылевидных фракций в процесс на стадию вакуум-кристаллизации позволяет снизить содержание NaCl в готовом обеспыленном продукте и благодаря этому повысить содержание основного вещества КСl.

Выход циклонной пыли при производстве хлористого калия на БКПРУ-4 составляет от 6 до 10 % выхода обеспыленного хлористого калия. Внешний вид обеспыленного хлористого калия и циклонной пыли показан на рис. 3 и 4.

Таблица 3. Содержание основного вещества КСl и примесей в технологических потоках на стадии сушки и обеспыливания кристаллизата при производстве 98%-ного хлористого калия

Технологический поток	Массовая доля в потоке, %	
	КСl	NaCl
Кристаллизат хлористого калия, поступающий на сушку (на сухое)	98,1–98,4	1,36–1,70
Циклонная пыль	97–97,4	2,37–2,75

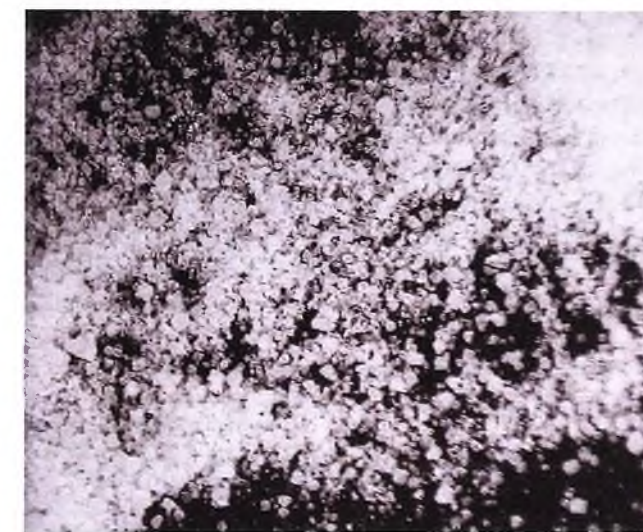


Рис. 4. Циклонная пыль БКПРУ-4 из циклонов сухой пылеочистки

На двух технологических линиях БКПРУ-4 получают крупнокристаллический обеспыленный хлористый калий. В то же время на мировом рынке существует потребность в обеспыленном мелкокристаллическом хлористом калии [5–7]. Уменьшение среднего размера кристаллов хлористого калия может сопровождаться увеличением выхода циклонной пыли на стадии обеспыливания.

При увеличении выхода циклонной пыли и растворении пылевидных фракций продукта из разгрузки циклонов сухой пылеочистки с получением раствора и подачей его на стадию вакуум-кристаллизации поступление воды в составе раствора может превысить ее технологически обоснованный расход для предотвращения кристаллизации в твердую фазу хлорида натрия. Избыточное поступление воды на стадию вакуум-кристаллизации приведет к образованию избыточного количества маточного раствора, который потребует вывода из процесса; вследствие этого произойдет снижение извлечения КСl.

АО «ВНИИ Галургии» разработаны технические решения, которые заключаются в растворении пылевидных фракций хлористого калия с получением суспензии с массовым соотношением жидкой и твердой фаз (Ж:Т) от 1 до 5 и подаче суспензии на стадию вакуум-кристаллизации [8, 9]. Массовая доля КСl в суспензии пылевидных фракций продукта в насыщенном по КСl растворе составит при этом от 38,5 до 63,1 %. При подаче такой

суспензии на стадию вакуум-кристаллизации расход воды в ее составе снизится в 1,3–2,4 раза по сравнению с расходом воды в составе раствора, содержащего 11,8–16,4 % KCl (см. табл. 2). Таким образом, при реализации ретурной схемы с подачей на стадию вакуум-кристаллизации суспензии пылевидных фракций продукта исключается избыточное поступление воды, сопровождающееся образованием избыточного количества маточного раствора и потерями KCl.

Заключение

Получение обеспыленного хлористого калия, содержащего не более 3 % частиц размером менее 0,1 мм, значительно повышает потребительские свойства продукта и расширяет возможности его применения, в том числе в технических целях. Проверенным техническим решением получения обеспыленного продукта является возврат пылевидных фракций, образующихся при сушке кристаллизата хлористого калия, со стадий «сухой» и «мокрой» пылеочистки в виде раствора на стадию вакуум-кристаллизации.

Ретурные схемы реализованы на многих зарубежных обогатительных фабриках, в том числе в составе комбинированных

флотационно-галургических схем, и в Российской Федерации при галургической переработке калийных руд в ПАО «Уралкалий».

Положительный эффект, который обеспечивает реализация ретурной схемы, заключается в следующем:

- достигается получение обеспыленного готового продукта;
- подача раствора (суспензии) пылевидных фракций продукта взамен воды на стадию вакуум-кристаллизации приводит к ускорению начала кристаллизации хлорида калия и увеличению продолжительности роста его кристаллов в корпусах вакуум-кристаллизационной установки, что способствует снижению содержания наиболее мелких пылевидных фракций в кристаллизате хлористого калия;
- примеси хлорида натрия концентрируются в основном в мелких фракциях кристаллизата хлористого калия, поэтому возврат пылевидных фракций в процесс на стадию вакуум-кристаллизации позволяет снизить содержание NaCl в готовом обеспыленном продукте и за счет этого повысить содержание основного вещества KCl, что особенно актуально при производстве 98%-ного хлористого калия.

Библиографический список

1. Сафрыгин Ю. С., Паскина А. В., Букша Ю. В. Технология производства галургического хлористого калия в России и Республике Беларусь // Горный журнал. 2007. № 8. С. 25–30.
2. Perucca C. F. Potash Processing in Saskatchewan – A Review of Process Technologies // CIM Bulletin. 2003. Vol. 96. No. 1170.
3. Wisniak J. The Dead Sea – A live pool of chemicals // Indian Journal of Chemical Technology. 2002. Vol. 9. P. 79–87.
4. Dead Sea Treasures – Dead Sea Works Ltd. (DSW) is now a major subsidiary of Israel Chemical Industries Ltd. URL: <https://ronaldwederfoort.wordpress.com/2016/12/18/dead-sea-treasures-dead-sea-works-ltd-dsw-is-now-a-major-subsiary-of-israel-chemical-industries-ltd/> (дата обращения: 15.02.2021).
5. Meeting the needs of an exacting market // Fertilizer International. 2015. Vol. 465. P. 54–60.
6. Schooley K., Bourgier V., Lawson R. Evaporation and crystallisation challenges: overview the importance of evaporation and crystallisation in the fertilizer industry // World Fertilizer. 2017. March / April.
7. Jasinski S. M. Potash: Minerals Yearbook / U.S. Geological Survey, 2020. URL: <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/prd-wret/assets/palladium/production/mineral-pubs/potash/mcs-2017-potas.pdf> (дата обращения: 15.12.2021).
8. Пат. 2143999 РФ. Способ получения хлорида калия / Ю. С. Сафрыгин, Г. Г. Федоров, Ю. В. Букша и др.; заявл. 19.03.1998; опубл. 10.01.2000.
9. Пат. 2493100 РФ. Способ получения хлористого калия / Ю. С. Сафрыгин, Г. В. Осипова, Ю. В. Букша и др.; заявл. 12.03.2012; опубл. 20.09.2013, Бюл. № 26. 



Калий хлористый технический

УДК 622.765

ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛОННОЙ ФЛОТАЦИИ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ФЛОТАЦИОННОЙ ПЕРЕРАБОТКИ КАЛИЙНЫХ РУД



Е. И. АФОНИНА¹,
ведущий научный сотрудник,
Elena.Afonina@uralkali.com



С. Н. ТИТКОВ¹,
директор технологической научной
части, канд. техн. наук



С. Н. АЛИФЕРОВА²,
заместитель технического
директора, канд. техн. наук



И. Ю. ТУПИЦЫН²,
главный инженер Третьего
Березниковского рудоуправления

¹ Филиал АО «ВНИИ Галургии» в Санкт-Петербурге, Россия

² ПАО «Уралкалий», Березники, Россия

Введение

Наличие в калийных рудах легкошламуемых водонерастворимых силикатно-карбонатных примесей, активно сорбируемых применяемым для флотации сильвина катионный собиратель (первичные алкиламины), обуславливает применение в технологических процессах обогащения калийных руд многостадийных схем обесшламливания, включающих основную и перечистную флотации шламов [1]. В настоящее время на флотационных фабриках ПАО «Уралкалий» обогащение руды крупностью менее 1,5–1,6 мм с содержанием 1,4–5 % и более силикатно-карбонатных и сульфатных водонерастворимых примесей (нерастворимый остаток – н.о.) осуществляют путем обесшламливания и флотации сильвина из полидисперсной суспензии в механических флотационных машинах [2–4]. Недостатками применяемой технологии обогащения калийных руд являются:

- многостадийность схем обесшламливания при содержании н.о. в руде более 2,5–3 % с применением большого числа обогатительных на значительных производственных площадях для его размещения;
- повышенный расход реагентов для флотации шламов в механических флотомашинках из-за значительного гидродинамического воздействия на комплекс флокула шламов – пузырек воздуха;

Проведены исследования по флотации шламов в колонной машине при переработке калийных руд Верхнекамского месторождения солей.

Приведены сравнительные результаты эффективности и селективности флотации во флотомашинках механического и колонного типа.

Показана возможность осуществления в колонных машинах флотационного обесшламливания калийных руд с различным содержанием водонерастворимых примесей со значительным улучшением селективности флотации при меньшем расходе реагентов.

Ключевые слова: калийная руда, флотация, водонерастворимые примеси, извлечение, колонная машина, шламы, сильвин.

DOI: 10.17580/gzh.2021.04.11

- необходимость проведения перечистных операций флотации шламов для уменьшения потерь хлористого калия со шламовым продуктом.

В колонных машинах флотацию осуществляют в ламинарно-восходящем потоке тонкодисперсных пузырьков воздуха, эжектируемого в суспензию в нижней части колонны. Процесс характеризуется минимальным гидромеханическим воздействием на комплекс минеральная частица – пузырек воздуха [5–16]. Важной особенностью проведения флотации в колонных машинах является возможность регулирования высоты пенного слоя в широком интервале значений (до 0,5 м и более) и его промывки, позволяющей повысить селективность извлечения в пенный продукт флотуемого материала.

Конструкция колонных машин для обогащения калийных руд, относящихся к водорастворимым и флотуемым в насыщенных растворах солей, должна обеспечивать отсутствие закристаллизации аэрационной системы подачи воздуха в колонную машину. В настоящее время колонные машины применяют для флотации сильвина, причем в основном фирмы Eriez Flotation Division (табл. 1).

Авторами были проведены исследования возможности осуществления в колонных машинах флотационного обесшламливания калийных руд.

Объекты и методы проведения исследований

Объекты исследований – сильвинитовая руда с содержанием нерастворимого остатка 1,5 и 3,5 %, предварительно расклассифицированная по крупности 0,4 мм с направлением на флотацию шламов фракции размером –0,4+0 мм.

Проба 1: фракция руды крупностью –0,4+0 мм, содержание KCl 28,8 %; н.о. 1,97 %.

Проба 2: фракция руды крупностью –0,4+0 мм, содержание KCl 29,7 %; н.о. 4,97 %.

Таблица 1. Применение колонных машин для флотации сильвина на калийных предприятиях

Предприятие	Располо- жение	Операция применения для флотации сильвина	Диаметр колонны, м	Число
Фирма Eriez Flotation Division				
PCS, Lanigan	Канада	Контрольная флотация	1,5	2
		Основная мелкозернистая флотация	2,7	5
PCS, Rocanville	То же	Контрольная флотация	2,7	1
		Перечистная флотация	3	1
PCS, Cory	— >> —	Основная флотация	3,6	1
		Основная мелкозернистая флотация	3,6	4
		Контрольная флотация	3,6	1
Brunswick's Picadilly potash mine	— >> —	Перечистная флотация	4,3	4
		Основная флотация	4,3	4
		Перечистная флотация	4,3	4
		Контрольная флотация	3,6	1
		Контрольная флотация	3,6	1
Penobsquis, New Brunswick	— >> —	Перечистная флотация	3	1
Intrepid Potash	США	Перечистная флотация	3	1
BHP	Канада	Основная флотация	3,6	8
		Перечистная флотация	4,3	4
Фирма Metso				
Agrium	Канада	Контрольная флотация	4,6	3
		Перечистная флотация	3,6	1
PCS, Alan	То же	Контрольная флотация	2,7	1
		Перечистная флотация	3	1
Muga	Испания	Основная флотация	3,6	1
		Перечистная флотация	4,3	2
		Контрольная флотация	4,5	1

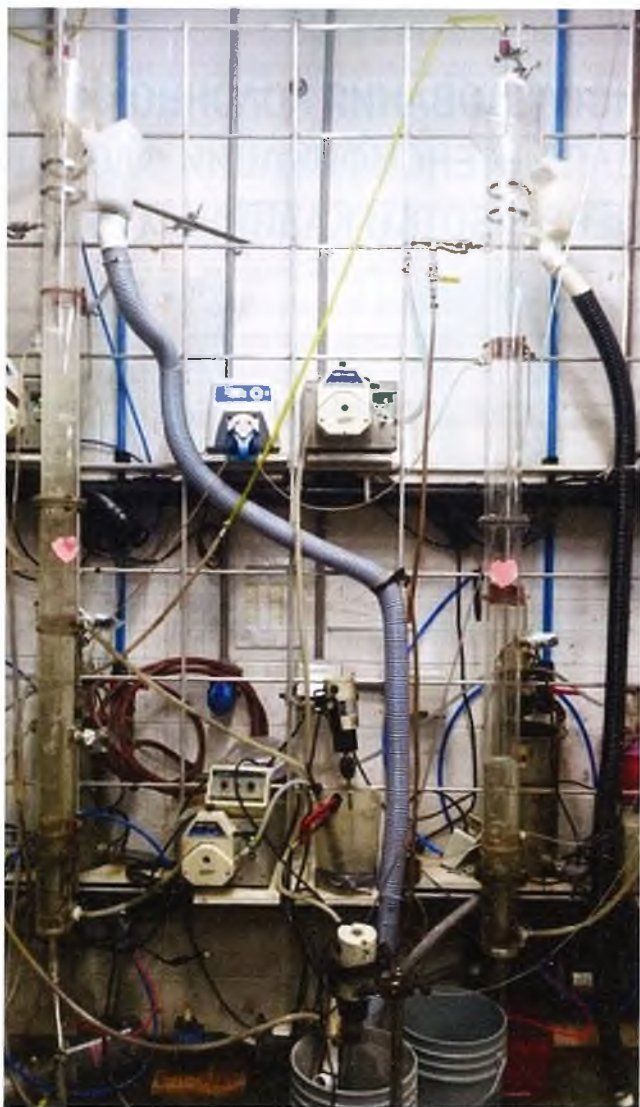


Рис. 1. Установка колонной флотации

Результаты исследований

Наибольшей сорбционной активностью по отношению к алкиламинам, применяемым в качестве катионного собирателя для флотации сильвина, характеризуются находящиеся в диспергированном шламовом виде тонкодисперсные частицы водонерастворимых примесей. При измельчении руды до крупности менее 1,5–1,6 мм диспергированные водонерастворимые примеси, так называемые свободные шламы, преимущественно концентрируются во фракциях руды крупностью менее 0,4 мм. Во фракциях руды крупностью более 0,4 мм водонерастворимые примеси представлены в форме внутренних включений в частицы соляных минералов и в виде поверхностных образований на соляных частицах. Эффективное и селективное удаление диспергированных частиц нерастворимого остатка из мелких фракций руды создает условия для интенсификации процесса обесшламливания руды с уменьшением потерь хлористого калия с отходами производства (шламовым

Опыты по флотации шламов проводили в механической флотомашине Денвер и на опытной установке фирмы ERIEZ Flotation Division (рис. 1).

Реагенты: флокулянт — полиакриламид (ПАА); собиратели шламов — оксизтилированный амин (ОА) [2] и оксизтилированный фенол (ОФ) [3].

Таблица 2. Флотация шламов из руды крупностью –0,4+0 мм в механической и колонной флотомашине

Реагент	Расход, г/т	Продукт	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %	
				KCl	н.о.	KCl	н.о.
Проба руды 1							
Механическая флотомашина							
Флокулянт Собиратель ОФ	10 15	Питание флотации	100,00	28,36	1,75	100,00	100,00
		Пенный продукт	9,80	28,97	10,74	10,02	60,36
		Камерный продукт	90,20	28,27	0,77	89,98	39,64
Флокулянт Собиратель ОА	10 15	Питание флотации	100,00	28,49	1,89	100,00	100,00
		Пенный продукт	11,60	29,08	10,80	11,80	66,03
		Камерный продукт	88,40	28,46	0,73	88,20	33,97
Колонная флотомашина							
Флокулянт Собиратель ОФ	5 15	Питание флотации	100,00	29,36	2,19	100,00	100,00
		Пенный продукт	2,23	3,16	68,00	0,21	69,78
		Камерный продукт	97,77	29,96	0,69	99,79	30,22
Флокулянт Собиратель ОА	5 15	Питание флотации	100,00	29,64	2,18	100,00	100,00
		Пенный продукт	2,43	3,86	66,37	0,73	73,64
		Камерный продукт	97,57	30,28	0,59	99,27	26,36
Проба руды 2							
Колонная флотомашина							
Флокулянт Собиратель ОА	10 60	Питание флотации	1002,00	29,98	4,82	100,00	100,00
		Пенный продукт	4,68	9,58	64,07	1,49	62,14
		Камерный продукт	95,32	30,99	1,91	98,51	37,86

продуктом) и упрощением аппаратурно-технологического оформления процесса.

В связи с этим были проведены исследования по флотационному выделению шламов методом колонной флотации из фракции руды крупностью менее 0,4 мм, полученной из двух проб калийных руд с содержанием нерастворимого остатка 1,5 и 3,5 %. Для сравнения была осуществлена аналогичная флотация шламов во флотомашине механического типа (табл. 2).

Результаты исследований показали, что флотация шламов в колонной машине осуществляется с четким разделением пенного слоя и обесшламленной суспензии с образованием более толстого пенного слоя (на лабораторной установке ~20–25 см, в промышленных условиях — до 0,5 м), что обеспечивает меньший вынос соляных частиц в пенный слой, уменьшение содержания KCl в пенном продукте флотации шламов и, соответственно, снижение извлечения KCl в пенный продукт. Это создает условия



Рис. 2. Флотация шламов в колонной машине

для снижения потерь KCl со шламовым продуктом, направляемым на складирование в шламохранилище или на совместное обезвоживание с галитовыми хвостами сильвинитовой флотации. Значительно меньшее извлечение KCl в пенный шламовый продукт в колонной машине по сравнению с флотацией шламов в механической флотомашине создает условия для упрощения схемы флотационного обесшламливания руды: отсутствует необходимость проводить перечистную флотацию шламов.

Обязательным условием эффективного флотационного выделения шламов из калийных руд в насыщенных растворах солей является предварительная их флокуляция [1]. Отсутствие во флотационной колонне гидромеханического воздействия на флокулы шламов, а также механического ударного воздействия крупных частиц солей на комплекс пузырьков воздуха — флокула шламов повышает эффективность флотации шламов при меньшем расходе флокулянта.

В связи с образованием в колонне достаточно высокого пенного слоя на установке колонной флотации (рис. 2) были проведены исследования по флотации шламов из содержащей ~5 % нерастворимого остатка пробы 2 мелкой фракции руды

Таблица 3. Флотация шламов в колонной флотомашине из фракции руды –0,4+0 мм с промывкой и без промывки пенного слоя

Реагент	Расход, г/т	Промывка пенного слоя	Продукт	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %	
					КСИ	н.о.	КСИ	н.о.
Проба руды 2								
Флокулянт Собираитель ОА	10 60	Нет	Питание флотации	100	29,98	4,82	100	100
			Пенный продукт	4,68	9,58	64,07	1,49	62,14
			Камерный продукт	95,32	30,99	1,91	98,51	37,86
Флокулянт Собираитель ОА	10 60	Да	Питание флотации	100	29,40	5,12	100	100
			Пенный продукт	5,41	1,94	61,47	0,36	64,94
			Камерный продукт	94,59	30,97	1,90	99,64	35,06

с промывкой и без промывки пенного слоя насыщенным раствором хлоридов калия и натрия (см. табл. 2). Время флотации в колонной машине составило 5–10 мин в зависимости от содержания н.о. в питании.

Результаты исследований показали, что промывка пенного слоя значительно уменьшает содержание КСИ в пенном продукте и, соответственно, извлечение КСИ в пенный продукт флотации шламов без уменьшения извлечения в последний нерастворимого остатка (табл. 3). Показана возможность проведения флотационного обесшламливания калийных руд без перечистой флотации пенного продукта основной флотации шламов в колонной машине.

На основании результатов исследований, проведенных в лаборатории флотации и реагентов АО «ВНИИ Галургии», и по данным укрупненных испытаний на установке фирмы Eriez Flotation Division разработана технология обогащения калийных руд с применением колонной флотации. Ведется подготовка к опытно-промышленным испытаниям на одной из флотационных фабрик ПАО «Уралкалий».

Заключение

1. Проведены исследования возможности применения колонной флотации для обесшламливания калийных руд. Показано, что флотационное извлечение водонерастворимых легкошламливающих примесей в колонной машине современной конструкции позволяет:

- осуществить эффективное обесшламливание руды с высокоселективным флотационным выделением в одну стадию нерастворимых примесей из фракции руды крупностью менее 0,4 мм с получением шламового продукта с отвальным содержанием хлористого калия в твердой фазе не более 5 %;

- уменьшить расход флокулянта в 2 раза вследствие проведения флотации шламов в колонной флотомашине без интенсивного гидромеханического воздействия на комплекс флокула шламов – пузырек воздуха.

2. Для подтверждения результатов укрупненных лабораторных испытаний, представленных в статье, ведется подготовка к опытно-промышленным испытаниям колонной машины на одной из флотационных фабрик ПАО «Уралкалий».

Библиографический список

1. Тетерина Н. Н., Сабиров Р. Х., Сквирский Л. Я., Кириченко Л. Н. Технология флотационного обогащения калийных руд. – Пермь – Соликамск – Березники, 2002. – 484 с.

2. Titkov S. N., Panteleeva N. N., Gurkova T. M. Use of polymer reagents for processing of potash ores containing clay slimes // *Polymers in Mineral Processing: Proceedings of the Third UBC-McGill Bi-annual International Symposium on Fundamentals of Mineral Processing*. – Quebec, 1999. P. 375–392.

3. Пат. 2278739 РФ. Способ флотационного обогащения руд / С. Н. Титков, Н. Н. Пантелева, Е. В. Коноплев и др.; заявл. 07.07.2004; опубл. 27.06.2006, Бюл. № 18.

4. Пат. 2237521 РФ. Способ флотационного обогащения калийных руд / В. М. Бусыгин, Р. Х. Сабиров, В. А. Новоселов и др.; заявл. 23.05.2003; опубл. 10.10.2004.

5. Vazirizadeh A., Bouchard J., Del Villar R. On the relationship between hydrodynamic characteristics and the kinetics of column flotation. Part I: Modeling the gas dispersion // *Minerals Engineering*. 2015. Vol. 74. P. 207–215.

6. Wang L., Peng Y., Runge K., Bradshaw D. A review of entrainment: Mechanisms, contributing factors and modelling in flotation // *Minerals Engineering*. 2015. Vol. 70. P. 77–91.

7. Patwardhan A., Honaker R. Q. Development of a carrying-capacity model for column froth flotation // *International Journal of Mineral Processing*. 2000. Vol. 59. Iss. 4. P. 275–293.

8. Rahman Soltanpour, Mehdi Irannajad, Fardis Nakhaei. Investigation of effective operating parameters on carrying capacity in column flotation of copper sulfide minerals // *Particulate Science and Technology*. 2019. Vol. 37. Iss. 6. P. 677–684.

9. Иванова Т. А., Зимбовский И. Г., Гетман В. В., Каркешкина А. Ю. Исследование возможности использования дитиопириметана при флотации сульфидных минералов // *Обогащение руд*. 2018. № 6. С. 38–44. DOI: 10.17580/or.2018.06.07

10. Чантурия В. А., Матвеева Т. Н., Гетман В. В. Исследование флокуляции касситерита при флотации оловосодержащих руд на основе использования термоморфного полимера // *Цветные металлы*. 2018. № 8. С. 13–22. DOI: 10.17580/tsm.2018.08.03

11. Арсентьев В. А., Герасимов А. М., Котова Е. Л. Термохимическое модифицирование сильвинитовой руды с использованием СВЧ-нагрева // *Обогащение руд*. 2017. № 6. С. 3–8. DOI: 10.17580/or.2017.06.01

12. Лавриненко А. А. Состояние и тенденции развития флотационных машин для обогащения твердых полезных ископаемых в России // *Цветные металлы*. 2016. № 11. С. 19–26. DOI: 10.17580/tsm.2016.11.02

13. Бектурганов Н. С., Арыстанова Г. А., Койжанова А. К., Ерденева М. Б. Сравнительное изучение эффективности способов извлечения золота из техногенных хвостов флотации // *Цветные металлы*. 2016. № 10. С. 69–72. DOI: 10.17580/tsm.2016.10.10

14. Jia N., Wang H. G., Zhang M., Guo M. Selective and efficient extraction of zinc from mixed sulfide-oxide zinc and lead ore // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2016. Vol. 37. Iss. 6. P. 418–426.

15. Navia D., Villegas D., Cornejo I., De Prada C. Real-time optimization for a laboratory-scale flotation column // *Computers & Chemical Engineering*. 2016. Vol. 86. Iss. 4. P. 62–74.

16. Harbort G., Clarke D. Fluctuations in the popularity and usage of flotation columns // *Minerals Engineering*. 2017. Vol. 100. P. 17–30. [DOI](#)

«GORNYI ZHURNAL», 2021, № 4, pp. 77–81
DOI: 10.17580/gzh.2021.04.11

The study of the column flotation capacities for stimulation of potash ore flotation

Information about authors

E. I. Afonina¹, Leading Researcher, Elena.Afonina@uralkali.com
S. N. Titkov¹, Director of Technology, Candidate of Engineering Sciences
S. N. Aliferova², Deputy Director of Engineering, Candidate of Engineering Sciences
I. Yu. Tupitsin², Chief Engineer, Berezniki 3 Mine Management

¹Branch of "VNI Galurgii" JSC in Saint Petersburg
²Uralkali, Berezniki, Russia

Abstract

Potassium ore contains readily sludgable water-insoluble silicate-carbonate impurities which actively adsorb cation collectors (primary alkylamines) used in sylvine flotation. This fact determines inclusion of multistage de-sludging flowsheets, with rougher and cleaning flotation of sludge in the processing technology. A prerequisite for flotation de-sludging of ore is pre-flocculation of sludge. Flotation of sludge in mechanical flotation machines is carried out with intensive mechanical stirring of the suspension, which impairs the selective separation of sludge into the flotation froth and leads to the partial destruction of sludge flocules, which causes an increased consumption of the flocculant.

In column machines, flotation is carried out in a laminar-upward flow of finely dispersed air bubbles ejected into the suspension in the lower part of the column, and is characterized by the minimal hydromechanical effect on the mineral particle-air bubble attachment. An important feature of flotation in column machines is the adjustability of the foam layer height in a wide range of values (up to 0.5 m and more) and its washability, which makes it possible to increase the recovery selectivity of the floated material into the foam product.

The design of column machines for enrichment of potash ores, which are water-soluble and floatable in rich salt solutions, should ensure elimination of crystallization of the aeration system for supplying air to the column machine. The tests of column flotation of sludge produced from potash ores of the Upper Kama deposit with different contents of water-insoluble impurities were carried out on the experimental installation of ERIEZ Flotation Division. The results of the comparison of flotation efficiency and selectivity in mechanical and column flotation machines are presented. The possibility of de-sludge flotation of potash ores with different contents of water-insoluble impurities (1.5–4%) with the significant improvement of flotation selectivity at the lower consumption of reagents is shown.

The use of column flotation creates conditions for simplifying the instrumental and technological flowsheet of flotation.

Keywords: potash ore, flotation, water insoluble admixtures, extraction, column machine, sludge, silvine.

References

1. Teterina N. N., Sabirov R. Kh., Skvirskiy L. Ya., Kirichenko L. N. Potash flotation process. Perm – Solikamsk – Berezniki, 2002. 484 p.

2. Titkov S. N., Panteleeva N. N., Gurkova T. M. Use of polymer reagents for processing of potash ores containing clay slimes. *Polymers in Mineral Processing: Proceedings of the Third UBC-McGill Bi-annual International Symposium on Fundamentals of Mineral Processing*. Quebec, 1999. pp. 375–392.

3. Titkov S. N., Panteleeva N. N., Konoplev E. V. et al. Method of floating enrichment of ores. Patent RF, No. 2278739. Applied: 07.07.2004. Published: 27.06.2006. Bulletin No. 18.

4. Busygin V. M., Sabirov R. Kh., Novoselov V. A. et al. Method of flotation concentration of potassium ores. Patent RF, No. 2237521. Applied: 23.05.2003. Published: 10.10.2004.

5. Vazirizadeh A., Bouchard J., Del Villar R. On the relationship between hydrodynamic characteristics and the kinetics of column flotation. Part I: Modeling the gas dispersion. *Minerals Engineering*. 2015. Vol. 74. pp. 207–215.

6. Wang L., Peng Y., Runge K., Bradshaw D. A review of entrainment: Mechanisms, contributing factors and modelling in flotation. *Minerals Engineering*. 2015. Vol. 70. pp. 77–91.

7. Patwardhan A., Honaker R. Q. Development of a carrying-capacity model for column froth flotation. *International Journal of Mineral Processing*. 2000. Vol. 59, Iss. 4. pp. 275–293.

8. Rahman Soltanpour, Mehdi Irannajad, Fardis Nakhaei. Investigation of effective operating parameters on carrying capacity in column flotation of copper sulfide minerals. *Particulate Science and Technology*. 2019. Vol. 37, Iss. 6. P. 677–684.

9. Ivanova T. A., Zimbovskiy I. G., Getman V. V., Karkeshkina A. Yu. Study on the possibility of using dithiopyrilmethane in flotation of sulfide minerals. *Obogashchenie Rud*. 2018. No. 6. pp. 38–44. DOI: 10.17580/or.2018.06.07

10. Chanturia V. A., Matveeva T. N., Getman V. V. Investigation of flocculation of cassiterite during flotation of tin ore on the basis of a thermomorph polymer usage. *Tsvetnye Metally*. 2018. No. 8. pp. 13–22. DOI: 10.17580/tsm.2018.08.03

11. Arsenyev V. A., Gerasimov A. M., Kotova E. L. Sylvinit ore thermochemical modification by means of super high frequency thermal treatment. *Obogashchenie Rud*. 2017. No. 6. pp. 3–8. DOI: 10.17580/or.2017.06.01

12. Lavrinenko A. A. State and trends of development of flotation machines for solid mineral concentration in Russia. *Tsvetnye Metally*. 2016. No. 11. pp. 19–26. DOI: 10.17580/tsm.2016.11.02

13. Bekturganov N. S., Arystanova G. A., Koyzhanova A. K., Erdenova M. B. Comparative study of efficiency of methods of gold extraction from anthropogenic flotation tails. *Tsvetnye Metally*. 2016. No. 10. pp. 69–72. DOI: 10.17580/tsm.2016.10.10

14. Jia N., Wang H. G., Zhang M., Guo M. Selective and efficient extraction of zinc from mixed sulfide-oxide zinc and lead ore. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2016. Vol. 37, Iss. 6. pp. 418–426.

15. Navia D., Villegas D., Cornejo I., De Prada C. Real-time optimization for a laboratory-scale flotation column. *Computers & Chemical Engineering*. 2016. Vol. 86, Iss. 4. pp. 62–74.

16. Harbort G., Clarke D. Fluctuations in the popularity and usage of flotation columns. *Minerals Engineering*. 2017. Vol. 100. pp. 17–30.



РАЗРАБОТКА НОВЫХ РЕАГЕНТНЫХ РЕЖИМОВ ФЛОТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ КАЛИЙНЫХ РУД



А. В. КОНОБЕВСКИЙ,
заведующий лабораторией
флотации и реагентов,
Aleksey.Konobeevskiy@uralkali.com



Т. М. ГУРКОВА,
ведущий научный сотрудник



Е. И. АФОНИНА,
ведущий научный сотрудник



Н. Н. ПАНТЕЛЕВА,
ведущий научный сотрудник,
канд. техн. наук

Филиал АО «ВНИИ Галургии» в Санкт-Петербурге, Россия

Введение

Значительную часть добываемых в мире калийсодержащих руд, представленных в основном смесью сильвина (KCl) и галита (NaCl), перерабатывают флотационным методом. В настоящее время сильвиниты Верхнекамского месторождения перерабатывают на четырех флотационных и двух химических калийных фабриках ПАО «Уралкалий». Особенности флотационного обогащения калийных руд являются осуществление процесса флотации в насыщенных растворах хлорида калия и натрия с примесью хлорида магния и применение в качестве катионного собирателя сильвина первичных алифатических аминов с длиной углеводородного радикала $C_{16} - C_{18}$ [1–5].

Основные трудности, с которыми приходится сталкиваться при флотационном обогащении калийных руд отечественных месторождений, — наличие в них силикатно-карбонатных и сульфатных легкошламуемых водонерастворимых примесей и примесей карналлита (нерастворимый остаток). Шламы, образующиеся в процессе измельчения руды, обладают высокой сорбционной способностью и активно сорбируют катионный собиратель (первичные алифатические амины), ухудшают или вообще прекращают процесс флотации. Уже небольшое содержание «свободных» силикатно-карбонатных шламов в питании сильвиновой флотации (0,2–0,4 %) приводит к значительному ухудшению показателей флотации и увеличению расхода катионного собирателя. Наличие карналлита в руде обуславливает

Представлены результаты исследований по разработке реагентных режимов флотационного обогащения калийных руд Верхнекамского месторождения в насыщенных растворах хлоридов калия и натрия. Проведены промышленные испытания нового реагентного режима при переработке калийных руд изменчивого состава с увеличенным содержанием шламообразующих силикатно-карбонатных и ангидритовых водонерастворимых примесей.

Ключевые слова: калийная руда, флотация, шламы, собиратель шламов, депрессор шламов, собиратель сильвина.

DOI: 10.17580/gzh.2021.04.12

увеличение содержания хлористого магния в жидкой флотационной фазе, ухудшение закрепления амина на KCl и снижение флотиремости сильвина [6–11].

Для устранения отрицательного влияния нерастворимых примесей на процесс флотации сильвина осуществляют предварительное обесшламливание руды центробежно-гравитационным, флотационным способами или их сочетанием. Для подавления остаточного количества шламов в сильвиновой флотации выполняют обработку питания сильвиновой флотации реагентом-депрессором. Целью настоящих исследований является разработка реагентного режима флотационного обогащения калийных руд при изменении содержания в руде нерастворимого остатка, температуры и состава насыщенных растворов хлорида калия и хлорида натрия.

Объекты и методы исследований

Объекты исследований — сильвинитовая руда Верхнекамского месторождения с содержанием нерастворимого остатка 3,5 %.

Лабораторные опыты по флотации руды проводили в механической флотомашине. Опытно-промышленные испытания разработанных реагентных режимов осуществляли на флотационных калийных фабриках.

Реагенты: флокулянт — полиакриламид (ПАА); собиратель шламов — оксизтилированный амин (ОА), оксизтилированный реагент ФР-1; депрессор шламов — продукт синтеза мочевины и формальдегида; собиратель сильвина — алифатический амин C_{16} , C_{18} с различным содержанием непредельных аминов (АФ 2,5; АФ 5; АФ 7; АФ 10; АФ 15; АФ 27).

Результаты исследований

Флотационное обогащение калийных руд Верхнекамского месторождения с учетом их состава и расположения осуществляют в насыщенных растворах хлоридов калия и натрия при содержании в растворе хлоридов магния до 2–2,5 % и сезонном повышении температуры солевых растворов от 15–18 до 35–37 °С, что существенно влияет на показатели флотации сильвина. В зависимости от состава жирных кислот,

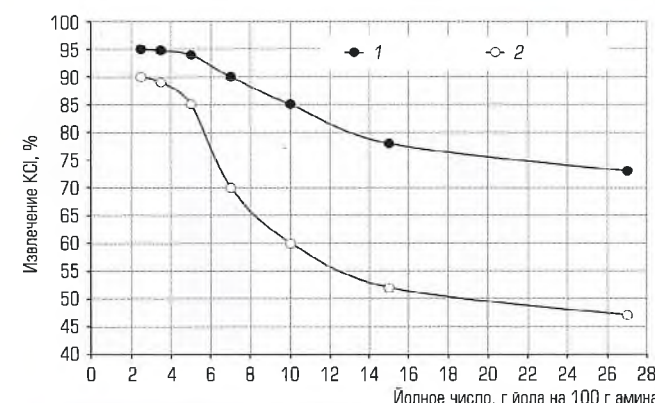


Рис. 1. Влияние температуры флотационной жидкой фазы и йодного числа аминов на флотиремость сильвина:

1, 2 — при T , равной 20 и 35 °С соответственно

используемых для производства алифатических аминов, и условий синтеза аминов получаемые алифатические амины могут содержать непредельные амины, количество которых характеризуется показателем «йодное» число. Исследовано влияние количества непредельных аминов на эффективность действия аминного собирателя при флотации сильвина. Исследования показали, что с увеличением количества непредельных аминов в аминном собирателе флотиремость сильвина уменьшается (рис. 1). С повышением температуры солевого раствора KCl — NaCl — H_2O и при увеличении в нем примеси хлорида магния усиливается отрицательное влияние находящихся в аминном собирателе непредельных алифатических аминов C_{16} , C_{18} (рис. 1 и 2). Наилучшие показатели флотации сильвина были получены при применении аминов C_{16} , C_{18} с йодным числом 3,5. В связи с этим дальнейшие исследования были проведены при использовании этого состава аминов.

Исследование эффективности действия собирателя шламов

Технология флотационного обесшламливания позволяет более эффективно и селективно выделять водонерастворимые примеси и в наибольшей степени улучшать последующую флотацию сильвина, так как при этом происходит выделение в пенный шламовый продукт не только тонкодисперсных шламов, но и шламовых частиц, обладающих наибольшей флотоактивностью.

Для флотации силикатно-карбонатных шламов в настоящее время применяют оксизтилированные ПАВ — оксизтилированные фенолы (ОЗФ) [12] и оксизтилированные амины (ОЗА) [13]. Оксизтилированные амины, характеризующиеся более разветвленной структурой молекулы по сравнению с оксизтилированными фенолами, в большей степени сорбируются на шламах и обеспечивают более высокое извлечение нерастворимых примесей в пенный продукт флотации шламов, что особенно важно при переработке калийных руд с высоким содержанием водонерастворимых примесей.

Для обеспечения стабильной работы калийных предприятий АО «ВНИИ Галургии» выполнены исследования по изысканию

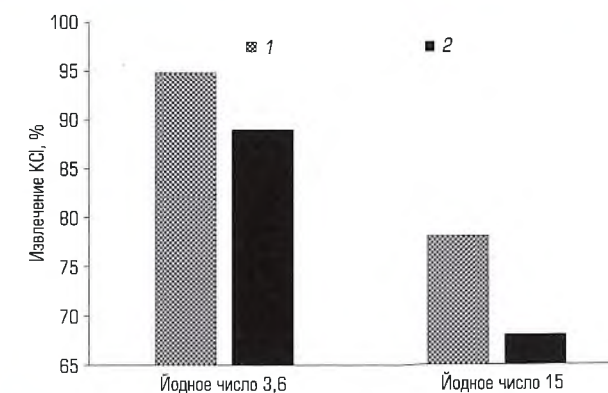


Рис. 2. Влияние содержания хлористого магния во флотационной жидкой фазе и йодного числа аминов на флотиремость сильвина:

1, 2 — содержание $MgCl_2$ в солевом растворе 0 и 3,5 % соответственно

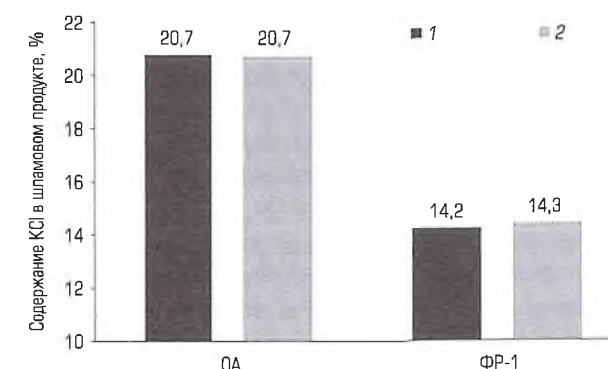


Рис. 3. Содержание KCl в шламовом продукте в зависимости от типа и расхода собирателя шламов:

1, 2 — 30 и 40 г/т соответственно

альтернативных флотационных реагентов, обеспечивающих эффективное обогащение калийных руд Верхнекамского месторождения.

В результате совместного сотрудничества АО «ВНИИ Галургии» и ПАО «Уралхимпласт» разработан оксизтилированный собиратель шламов ФР-1. Использование реагента ФР-1 на стадии флотационного обесшламливания характеризуется снижением потерь хлористого калия с пенным продуктом шламовой флотации (рис. 3) и возможностью уменьшения расхода флокулянта. Применение реагента ФР-1 уменьшает содержание водонерастворимых примесей в питании последующей сильвиновой флотации (рис. 4), что улучшает условия флотации сильвина и уменьшает потери KCl с хвостами флотации. Результаты лабораторных исследований подтверждены промышленными испытаниями.

Исследование эффективности депрессора шламов

Механизм действия реагентов-депрессоров при флотации различных видов полезных ископаемых с применением анионных собирателей в основном заключается в подавлении

флотируемости определенных минералов за счет гидрофиллизации их поверхности. При катионной флотации калийных руд основной задачей действия реагентов-депрессоров является создание «экранирующего» покрытия, уменьшающего сорбцию амина на шламах и тем самым обеспечивающего сорбцию амина на КСІ в необходимом количестве. Исследования действия депрессоров шламов при катионной флотации калийных руд выявили необходимые свойства депрессоров шламов, которыми они должны обладать [14–18]:

- обеспечивать уменьшение сорбции амина на шламах не менее чем на 25–40 %;
- оказывать гидрофиллизующее действие на глинисто-карбонатные шлам для подавления их флотируемости;
- в наименьшей степени взаимодействовать с катионным собирателем;
- оказывать минимальное влияние на флокуляцию шлам и осветление от водонерастворимых примесей оборотных солевых растворов.

До недавнего времени при переработке калийных руд с содержанием водонерастворимых примесей до 2–2,5 % осуществляли только предварительное флотационное обесшламливание без добавления депрессора в питание основной сальвиновой флотации. При переработке калийных руд с содержанием водонерастворимых примесей 3–3,5 % и более, наряду с предварительным обесшламливанием руды, в питание основной сальвиновой флотации подают депрессор шлам для подавления отрицательного влияния остаточного количества водонерастворимых примесей. В качестве депрессора шлам Институт галургии разработаны продукты синтеза мочевины и формальдегида – реагент КС-МФ и альтернативный реагент-депрессор шлам АР-2.

Положительными свойствами данных реагентов-депрессоров являются:

- уменьшение сорбции амина на шламах на 60–70 % и высокая эффективность действия;
- отсутствие взаимодействия с аминным собирателем сальвина;
- низкая стоимость по сравнению с другими депрессорами шлам (карбоксиметилцеллюлоза, гуар, крахмал и др.);
- простота приготовления рабочих растворов;
- сниженное до 0,3–0,5 % содержание свободного формальдегида (АР-2).

Несмотря на относительно низкое содержание в руде водонерастворимых глинисто-карбонатных примесей (1,3–1,6 %), незначительные колебания их содержания и применение флотационного обесшламливания всей руды, в процессе работы фабрик было выявлено периодическое снижение показателей сальвиновой флотации (увеличение содержания КСІ в хвостах, ухудшение селективности основной сальвиновой флотации) при практически неизменном содержании в руде общих водонерастворимых примесей.

Были использованы депрессоры шлам на флотационной фабрике Второго Соликамского рудоуправления (СКРУ-2), перерабатывающей в настоящее время руды с содержанием

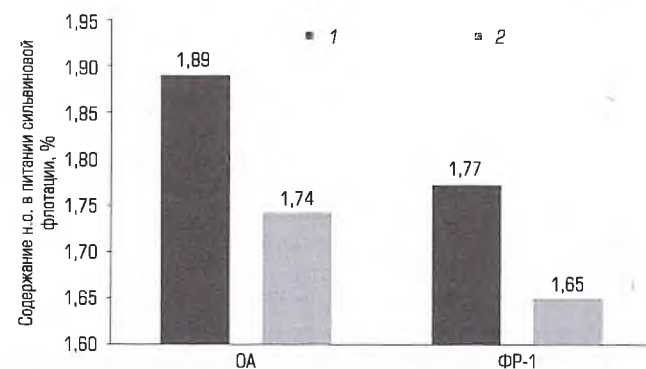


Рис. 4. Содержание н.о. в питании сальвиновой флотации в зависимости от типа и расхода собирателя шлам: 1, 2 – 30 и 40 г/т соответственно

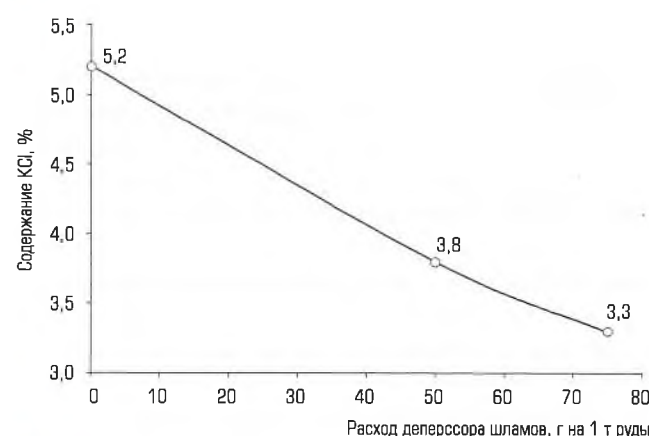


Рис. 5. Содержание КСІ во фракции крупности +0,8 мм хвостов сальвиновой флотации (расход амина 40 г/т руды)

водонерастворимых примесей до 2,7 %. Анализ распределения хлористого калия по фракциям крупности хвостов флотации на флотационных фабриках Соликамских рудоуправлений показал, что основные потери хлористого калия концентрируются в крупных фракциях хвостов флотации сальвина. Исследования на питании сальвиновой флотации со средней крупностью, соответствующей фактической крупности питания на фабриках, показали снижение общего содержания хлористого калия в хвостах флотации при применении реагента-депрессора шлам, причем самое заметное снижение содержания КСІ наблюдается именно в крупных фракциях (рис. 5).

При переработке руд с повышенным содержанием водонерастворимых примесей с целью сохранения достигнутых технологических показателей на Втором Соликамском калийном рудоуправлении (СКРУ-2) потребовалась разработка нового реагентного режима. Применение депрессора шлам на стадии сальвиновой флотации позволило минимизировать отрицательное воздействие водонерастворимых примесей на процесс флотации и повысить стабильность процесса (см. таблицу).

Таким образом, применение депрессора шлам при флотации калийных руд при изменчивом их составе позволяет при

Результаты промышленного применения сочетания флотационного обесшламливания руды и депрессора шлам КС-МФ при переработке руд с повышенным содержанием водонерастворимых примесей

Реагентный режим	Руда		Готовый продукт		Расход реагентов, г/т руды				Хвосты	Шламы
	Содержание, %		Извлечение, %		Флокулянт	Собиратель шламов	Депрессор шламов	Собиратель сильвина	Содержание, %	
	КСІ	Н.о.	КСІ	КСІ					КСІ	КСІ
Руда СКРУ-2 с содержанием водонерастворимых примесей ~1,5 % (до 2019 г.)										
Без депрессора	26,4	1,52	95,5	92,7	8,9	17,5	—	40,4	2,4	15,8
Руда СКРУ-2 с повышенным содержанием водонерастворимых примесей (с 2019 г.)										
Без депрессора	23,7	2,63	95,6	90,3	9,6	22,8	—	32,3	2,2	10,1
С депрессором	26,6	2,43	95,7	93,0	9,8	26,3	188	30,5	2,1	12,1

существующей технологии обогащения этих руд стабилизировать процесс сальвиновой флотации и уменьшить потери хлористого калия преимущественно за счет активации флотации хлористого калия из крупных фракций хвостов флотации, что способствует снижению расхода собирателя сальвина и улучшению технологических показателей процесса.

Заключение

На основании выполненных исследований разработаны реагентные режимы, обеспечивающие эффективное обогащение калийных руд с различным содержанием водонерастворимых примесей:

- для флотации шлам – оксизтилированные фенолы, оксизтилированные амины и альтернативные им аналоги,

показавшие возможность улучшения показателей обесшламливания руды;

- для уменьшения отрицательного влияния шлам на сальвиновую флотацию – применение депрессора шлам КС-МФ и аналогичного ему реагента АР-2 на основе синтеза мочевины и формальдегида.

Совместное флотационное обесшламливание руды и применение депрессора шлам позволило обеспечить эффективную промышленную переработку руд смешанного состава с увеличенным содержанием водонерастворимых примесей. Эффективная флотация сальвина осуществляется с применением первичных алифатических аминов с длиной углеводородного радикала в основном от C₁₆ до C₁₈ при минимальном содержании в радикале непредельных связей (йодное число не более 5).

Библиографический список

- Иванова Т. А., Зимовский И. Г., Гетман В. В., Каркешкина А. Ю. Исследование возможности использования дитиопириметана при флотации сульфидных минералов // Обогащение руд. 2018. № 6. С. 38–44. DOI: 10.17580/or.2018.06.07
- Лавриненко А. А. Состояние и тенденции развития флотационных машин для обогащения твердых полезных ископаемых в России // Цветные металлы. 2016. № 11. С. 19–26. DOI: 10.17580/tsm.2016.11.02
- Карнауков С. Н., Плосовица С. С., Иванова Н. В. Исследование технологии флотации медных руд скварного месторождения // Обогащение руд. 2018. № 2. С. 19–22. DOI: 10.17580/or.2018.02.04
- Тусупбаев Н. К., Семушкина Л. В., Турысбеков Д. К., Сугурбекова А. К., Мухамедиллова А. М. Флотационная переработка техногенного минерального сырья с использованием композиционного реагента // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Екатеринбург, 2016. С. 214–216.
- Духтинская Л. В., Шломина Л. Ф., Осипова Е. О., Шевчук В. В., Можейко Ф. Ф. Флотационное обогащение калийных руд // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук. 2019. Т. 55. № 3. С. 277–287.
- Титков С. Н., Мамедов А. И., Соловьев Е. И. Обогащение калийных руд. – М.: Недра, 1982. – 216 с.
- Тетерина Н. Н., Сабиров Р. Х., Скворский Л. Я., Кириченко Л. Н. Технология флотационного обогащения калийных руд. – Пермь – Соликамск – Березники: Соликамская типография, 2002. – 484 с.
- Jančaitienė K., Šlinkšienė R. Influence of cellulose additive on the granulation process of potassium dihydrogen phosphate // Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly. 2020. Vol. 26. No. 4. P. 359–367.
- Bo Feng, Wenpu Zhang, Yutao Guo, Tao Wang, Guodong Luo et al. The flotation separation of galena and pyrite using serpentineas depressant // Powder Technology. 2019. Vol. 342. P. 486–490.
- Zhong Ai, Shoujiang Li, Yunliang Zhao, Hao Yi, Licai Chen et al. Effect of magnesium ion on sylvite flotation: An experiment and molecular dynamic simulation study // Chemical Physics Letters. 2020. Vol. 752. DOI: 10.1016/j.cplett.2020.137586
- Laskowski J. S. From amine molecules adsorption to amine precipitate transport by bubbles: A potash ore flotation mechanism // Minerals Engineering. 2013. Vol. 45. P. 170–179.
- Hainan Wang, Wenqing Yang, Xiaokang Yan, Lijun Wang, Yongtian Wang, Haijun Zhang. Regulation of bubble size in flotation: A review // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2020. Vol. 8. Iss. 5. DOI: 10.1016/j.jece.2020.104070
- Yue Hua Tan, James A. Finch Surfactant Structure-Property Relationship: Effect of Alkyl Chain Length and Methyl Branch Position in Aliphatic Alcohols and Polyglycol Ethers on Bubble Rise Velocity // Proceedings of the XV Balkan mineral Processing Congress. – Szabolc, 2013. P. 423–427.
- Greff R. A., Setzkorn E. A., Leslie W. D. A colorimetric method for the determination of parts/million of nonionic surfactants // Journal of the American Oil Chemists' Society. 1965. Vol. 42. Iss. 3. P. 180–185.
- Пат. 2278739 РФ. Способ флотационного обогащения руд / С. Н. Титков, Н. Н. Пантелеева, Е. В. Коноплев и др.; заявл. 07.07.2004; опубл. 27.06.2006. Бюл. № 18.
- Пат. 2237521 РФ. Способ флотационного обогащения калийных руд / В. М. Бусыгин, Р. Х. Сабиров, В. А. Новоселов и др.; заявл. 23.05.2003; опубл. 10.10.2004.
- Titkov S. N., Pantelieva N. N., Gurkova T. M. Use of polymer reagents for processing of potash ores containing clay slimes // Polymers in Mineral Processing: Proceedings of the Third UBC-McGill Bi-annual International Symposium on Fundamentals of Mineral Processing. – Quebec, 1999. P. 375–392.
- Титков С. Н., Пантелеева Н. Н., Гуркова Т. М. Физико-химические закономерности флотационного разделения солей // Актуальные вопросы добычи и переработки природных солей: сб. науч. тр. – СПб., 2001. Т. 2. С. 11–24. [ИЖ](#)

New reagent regimes for potash flotation

Information about authors

A. V. Konobeevskikh¹, Head of Laboratory of Flotation and Reagents, Aleksey.Konobeevskikh@uralkali.com,
T. M. Gurkova¹, Leading Researcher
E. I. Afonina¹, Leading Researcher
N. N. Panteleeva¹, Leading Researcher, Candidate of Engineering Sciences
¹Branch of "VNII Galurgii" JSC in Saint Petersburg

Abstract

The article presents the results of the VNII Galurgii's studies into development of reagent regimes for flotation of potash ores of the Upper Kama deposit in fat solutions of potassium and sodium chlorides. The influence of the temperature of the saline solution and the content of magnesium chloride in it on the efficiency of aliphatic amines—collector of sylvin—was investigated. An alternative ethoxylated sludge collector for flotation de-sludging of potash ores is tested. The effect of a modified sludge depressant obtained by the synthesis of urea and formaldehyde is studied. The developed reagents are tested in full-scale processing of potash ore with variable composition and an increased content of sludge-forming silicate-carbonate and anhydrite water-insoluble impurities have been carried out. It is shown that the process stability and the production performance improve. Application of the sludge depressant in flotation of potash ore of variable composition allows stabilization of sylvin flotation and reduction in potassium chloride loss owing to stimulation of potassium chloride flotation from coarse tailings, which enables the decrease in the sylvin collector consumption and favors improvement of the process performance.

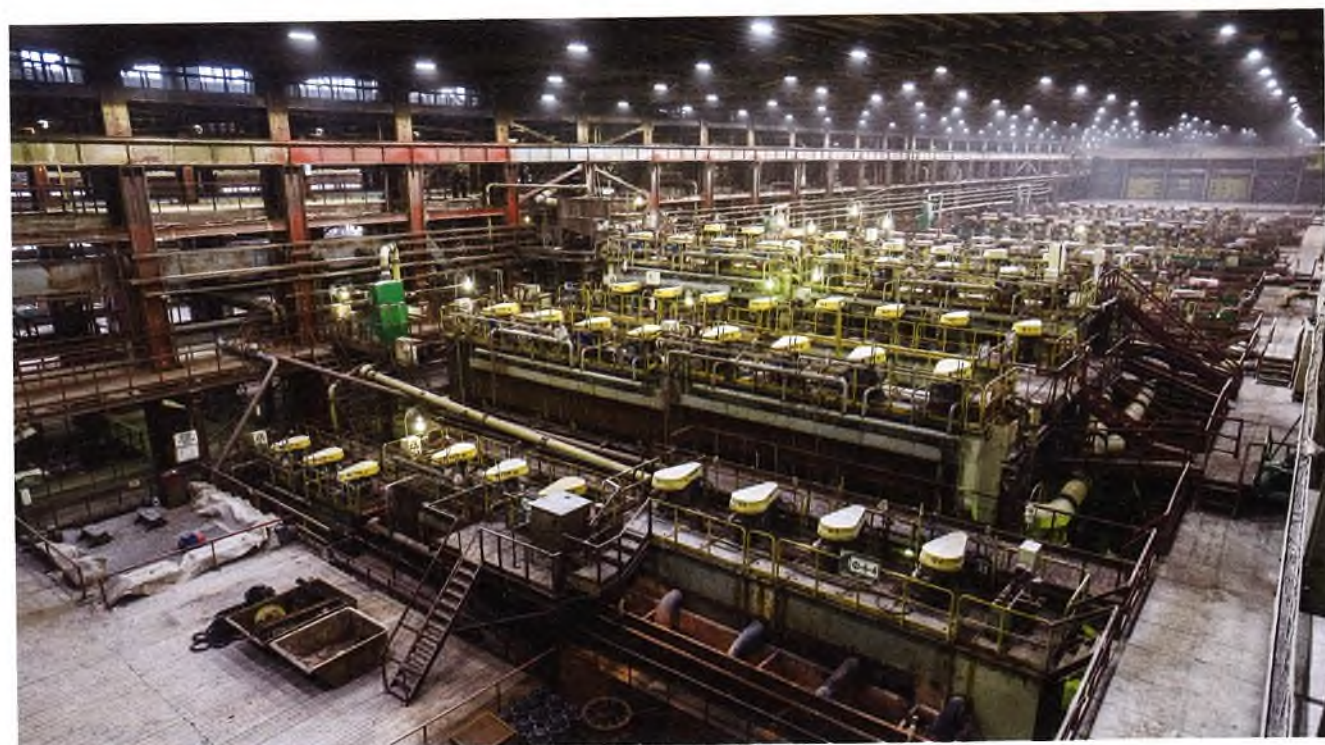
Keywords: potash ore, flotation, sludge, sludge collector, sludge depressor, sylvin collector.

References

- Ivanova T. A., Zimbovskiy I. G., Getman V. V., Karkeshkina A. Yu. Study on the possibility of using dithiopyrimethane in flotation of sulfide minerals. *Obogashchenie Rud.* 2018. No. 6. pp. 38–44. DOI: 10.17580/or.2018.06.07
- Lavrinenko A. A. State and trends of development of flotation machines for solid mineral concentration in Russia. *Tsvetnye Metally.* 2016. No. 11. pp. 19–26. DOI: 10.17580/tsm.2016.11.02
- Karnaikhov S. N., Plyasovitsa S. S., Ivanova N. V. Research of skarn deposit copper ore flotation technology. *Obogashchenie Rud.* 2018. No. 2. pp. 19–22. DOI: 10.17580/or.2018.02.04
- Tusupbaev N. K., Semushkina L. V., Turysbekov D. K., Sugurbekova A. K., Mukhamedilova A. M. Flotation of mineral mining waste using a composite reagent. *Theory and Practice of Ore and*

Waste Processing : International Scientific-and-Practical Conference Proceedings. Yekaterinburg, 2016. pp. 214–216.

- Dikhtievskaya L. V., Shlormina L. F., Osipova E. O., Shevchuk V. V., Mozheyko F. F. Flotation enrichment of potash ores of different mineralogical composition. *Izvestiya Natsionalnoy akademii nauk Belarusi. Seriya khimicheskikh nauk.* 2019. Vol. 55, No. 3. pp. 277–287.
- Titkov S. N., Mamedov A. I., Solovov E. I. Potash ore processing. Moscow: Nedra, 1982. 216 p.
- Teterina N. N., Sabirov R. H., Skvirskiy L. Y., Kirichenko L. N. Technique for flotation beneficiation of potash ores. Perm – Solikamsk – Berezniki: Solikamskaya tipografiya, 2002. 484 p.
- Jančaitienė K., Šlikšienė R. Influence of cellulose additive on the granulation process of potassium dihydrogen phosphate. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly.* 2020. Vol. 26, No. 4. pp. 359–367.
- Bo Feng, Wenpu Zhang, Yutao Guo, Tao Wang, Guodong Luo et al. The flotation separation of galena and pyrite using serpentineas depressant. *Powder Technology.* 2019. Vol. 342. pp. 486–490.
- Zhong Ai, Shoujiang Li, Yunliang Zhao, Hao Yi, Licai Chen et al. Effect of magnesium ion on sylvite flotation: An experiment and molecular dynamic simulation study. *Chemical Physics Letters.* 2020. Vol. 752. DOI: 10.1016/j.cplett.2020.137586
- Laskowski J. S. From amine molecules adsorption to amine precipitate transport by bubbles: A potash ore flotation mechanism. *Minerals Engineering.* 2013. Vol. 45. pp. 170–179.
- Hainan Wang, Wenqing Yang, Xiaokang Yan, Lijun Wang, Yongtian Wang, Haijun Zhang. Regulation of bubble size in flotation: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering.* 2020. Vol. 8, Iss. 5. DOI: 10.1016/j.jece.2020.104070
- Yue Hua Tan, James A. Finch Surfactant Structure-Property Relationship: Effect of Alkyl Chain Length and Methyl Branch Position in Aliphatic Alcohols and Polyglycol Ethers on Bubble Rise Velocity. *Proceedings of the XV Balkan mineral Processing Congress.* Szopopol, 2013. pp. 423–427.
- Greff R. A., Setzkorn E. A., Leslie W. D. A colorimetric method for the determination of parts/million of nonionic surfactants. *Journal of the American Oil Chemists' Society.* 1965. Vol. 42, Iss. 3. pp. 180–185.
- Titkov S. N., Panteleeva N. N., Konoplev E. V. et al. Method of floating enrichment of ores. Patent RF, No. 2278739. Applied: 07.07.2004. Published: 27.06.2006. Bulletin No. 18.
- Busygina V. M., Sabirov R. Kh., Novoselov V. A. et al. Method of floatation concentration of potassium ores. Patent RF, No. 2237521. Applied: 23.05.2003. Published: 10.10.2004.
- Titkov S. N., Panteleeva N. N., Gurkova T. M. Use of polymer reagents for processing of potash ores containing clay slimes. *Polymers in Mineral Processing : Proceedings of the Third UBC-McGill Bi-annual International Symposium on Fundamentals of Mineral Processing.* Quebec, 1999. pp. 375–392.
- Titkov S. N., Panteleeva N. N., Gurkova T. M. Physicochemical patterns of flotation-based separation of salts. *Actual Problems in Natural Salt Extraction and Processing : Collection of Scientific Papers.* Saint-Petersburg, 2001. Vol. 2. pp. 11–24.



УДК 622.765

ВЛИЯНИЕ ФЛОТАЦИОННЫХ РЕАГЕНТОВ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ СУШКИ ВЛАЖНОГО ФЛОТОКОНЦЕНТРАТА НА ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСУШЕННОГО ПРОДУКТА



В. И. МАТВЕЕВ,
заведующий лабораторией сушки и грануляции,
канд. техн. наук
Vladimir.Matveev3@uralkali.com



А. Б. КРАЮХИН,
ведущий научный сотрудник



И. МАКСИМОВ,
научный сотрудник

Филиал АО «ВНИИ Галургии» в Санкт-Петербурге, Россия

Введение

Одним из самых распространенных способов получения гранулированного хлористого калия является прессование высушенного мелкозернистого хлористого калия на валковых прессах с последующим дроблением полученной спрессованной плитки и извлечением целевой (товарной) фракции на стадии классификации [1–3].

Мелкозернистый хлористый калий получают преимущественно флотационным способом с использованием различных реагентов. При этом реагентные режимы на фабриках делятся по сезону на летний и зимний режимы с различными расходами используемых реагентов.

В процессе сушки влажного флотоконцентрата в промышленных печах кипящего слоя (КС) происходит изменение его химического состава за счет температурной обработки материала и частично вследствие уноса пыли на газоочистку.

Остаточное содержание реагентов на поверхности зерен высушенного флотоконцентрата может оказывать влияние на физико-механические свойства материала, а следовательно,

Приведены результаты лабораторных исследований по оценке влияния содержания флотационных реагентов во влажном хлористом калии и температурных режимов его сушки на изменение физико-механических свойств (прессуемость, слеживаемость) высушенного флотоконцентрата, используемого для производства гранулированного хлористого калия.

Показано, что улучшение физико-механических свойств флотационного хлористого калия для прессования возможно за счет повышения на стадии сушки температуры в кипящем слое до 170–200 °С при температуре теплоносителя не менее 550 °С.

Ключевые слова: флотационный хлористый калий, флотационные реагенты, слеживаемость, прессуемость, сушка, лабораторная установка кипящего слоя.

и на процесс прессования при производстве гранулированного хлористого калия.

Целью настоящих исследований являлось определение влияния различных факторов (химический состав исходного материала, температурный режим сушки) на изменение физико-механических свойств высушенных продуктов.

Исследования по влиянию различных факторов на физико-механические свойства (слеживаемость и прессуемость) высушенного материала проводили в научно-исследовательских лабораториях АО «ВНИИ Галургии».

В лаборатории сушки и грануляции были разработаны методика проведения исследований и аппаратурно-технологическая схема лабораторной установки КС для проведения опытов по сушке влажного флотоконцентрата. Монтаж установки выполнен при участии специалистов лаборатории металлургии порошков алюминия Санкт-Петербургского политехнического университета.

Образцы влажного флотоконцентрата после проведения флотации сильвина первичными алкилами из калийной руды были подготовлены для выполнения опытов по сушке лабораторией флотации и реагентов.

Опыты по прессованию образцов высушенного флотоконцентрата и определение их физико-механических свойств выполнены лабораторией испытаний и стандартизации продукции.

Подготовка проб для проведения исследований

Для проведения опытов по сушке были подготовлены образцы материалов с различным содержанием реагентов:

- исходный влажный флотоконцентрат;
- дополнительно аминированный влажный флотоконцентрат;
- деаминированный влажный флотоконцентрат (с пониженным содержанием аминов);
- исходный влажный флотоконцентрат, дополнительно обработанный реагентом депрессором (Д).

Характеристика указанных образцов до сушки приведена в табл. 1.

В материале 4 расчетное содержание депрессора составляет 200 % содержания в исходном материале, в том числе 100 % внесено дополнительно.

В дополнительно наработанных образцах (материалы 6, 7, 8, 9 и 10) на 15 % было увеличено содержание эмульсии амина в исходном образце (при различном содержании аполлярного реагента (АР) и вспенивателя (ВС) в эмульсии относительно амина) и депрессора – т. е. смоделировано сезонное увеличение расхода реагентов в «летний» период. Также наработан образец материала, дополнительно обработанный раствором метасиликата натрия (МСН), тем самым смоделирована обработка влажного флотоконцентрата до сушки. Расход был задан исходя из существующей практики обработки влажного флотоконцентрата раствором МСН на промышленных объектах.

Таблица 1. Характеристика образцов материала для проведения исследований (влажный концентрат до сушки)

Материал	Характеристика материала	Содержание	
		Н ₂ O _{общ} , % (масс.)	Амины первичные, процент от содержания в исходном материале
1	Исходный	4,40	100
2	Деаминированный	3,78	38
3	Дополнительно аминированный	3,37	368
4	Дополнительно обработанный Д	3,40	78
5	Исходный (повтор.)	3,9	100
6	Исходный с увеличенным расходом эмульсии амина (АР – 20 % и ВС – 20 %)	3,9	112
7	Исходный с увеличенным расходом эмульсии амина (АР – 30 % и ВС – 20 %)	3,9	112
8	Исходный с увеличенным расходом эмульсии амина (АР – 30 % и ВС – 30 %)	3,9	112
9	Исходный с увеличенным расходом Д на 15 %	3,9	98
10	Исходный с обработкой раствором МСН	3,9	58

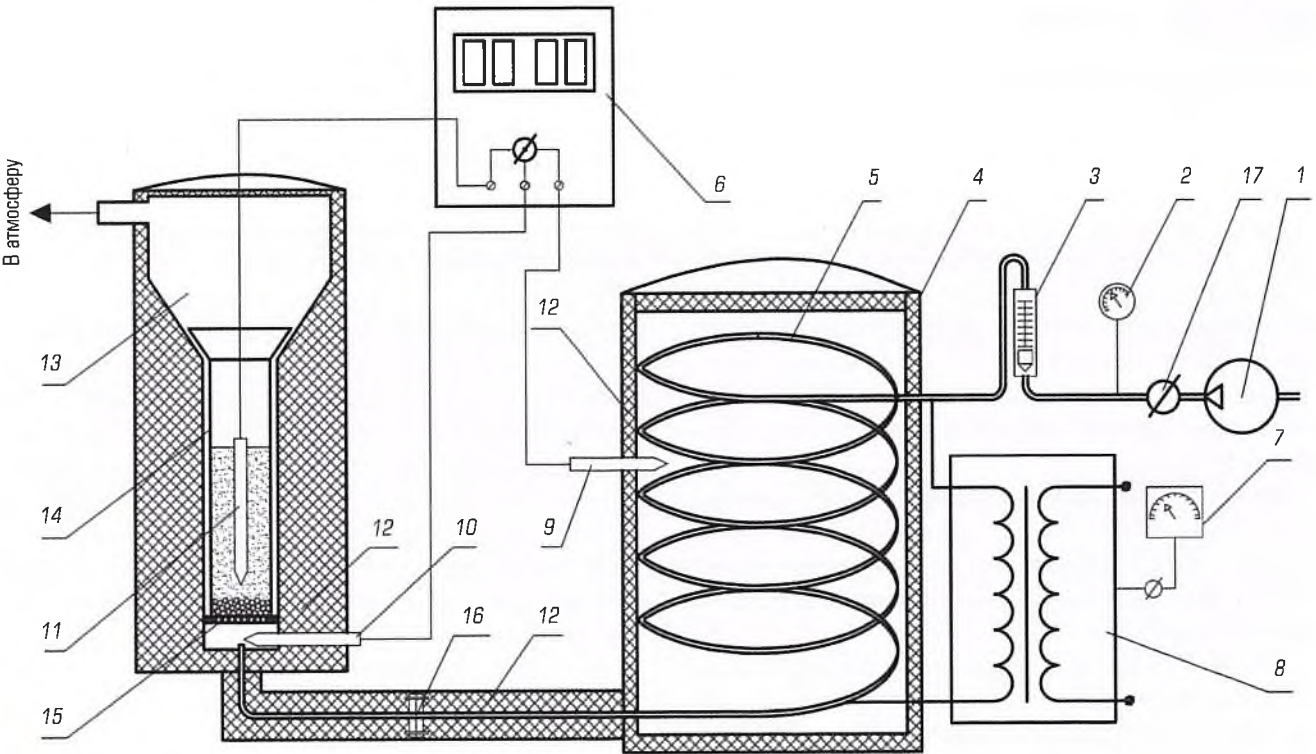


Рис. 1. Принципиальная схема лабораторной установки кипящего слоя:

1 – компрессор; 2 – манометр; 3 – ротаметр; 4 – кожух нагревателя; 5 – трубчатая спираль; 6 – приборная панель; 7 – амперметр; 8 – вариатор; 9, 10, 11 – термопары; 12 – тепло-изоляция; 13 – внешняя обечайка реактора; 14 – реактор кипящего слоя, внутренний диаметр 60 мм; 15 – газораспределительная решетка с отверстиями диаметром 2,7 мм; 16 – фланцевое соединение; 17 – регулирующий вентиль

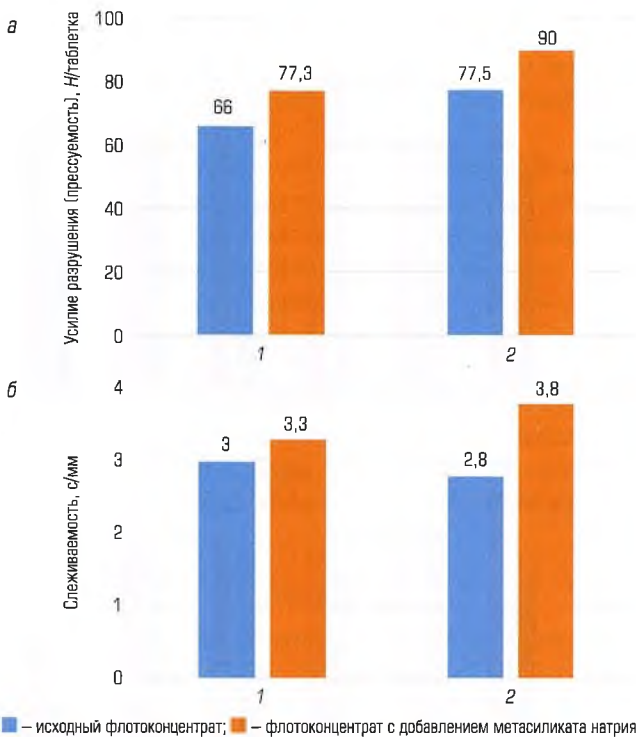


Рис. 2. Изменение усилия разрушения (прессуемости) (а) и слеживаемости (б) флотоконцентрата в зависимости от температурного режима сушки и добавления метасиликата натрия:

1 – температура в слое 150 °С, температура теплоносителя 310–315 °С; 2 – температура в слое 150 °С, температура теплоносителя 546–550 °С

Методика проведения опытов по сушке и определению физико-механических свойств высушенного материала

Опыты по сушке влажных флотационных материалов были проведены на лабораторной установке КС (рис. 1).

Теплоносителем являлся воздух, который подавали от компрессора в реактор через электрический калорифер. Температуру теплоносителя регулировали при помощи вариатора, подключенного к спирали, путем изменения напряжения.

Опыты проводили при различных задаваемых параметрах сушки. Температуру теплоносителя задавали 300 и 550 °С, что соответствует температурам теплоносителя существующих установок КС без внутренней футеровки (от топки до газораспределительной решетки) и с внутренней футеровкой (топки, газохода от топки до печи КС, а также самой печи КС) соответственно.

Температуру в КС задавали 150–200 °С, что соответствует верхним границам рабочего интервала температур кипящего слоя существующих установок КС для сушки флотоконцентрата.

Для уменьшения выноса пыли скорость теплоносителя изменяли по ходу проведения опытов. Для каждого образца исследуемого материала эмпирически были определены скорости теплоносителя, обеспечивающие минимальный пылевывос и устойчивое кипение как при загрузке влажного материала в реактор,

так и при сушке и нагреве материала до заданной температуры. Загрузку осуществляли по достижении температуры в реакторе 60 °С при скорости теплоносителя 1,4–2,5 м/с; по достижении температуры в кипящем слое 95–100 °С скорость теплоносителя снижали до 0,5–1,8 м/с.

После достижения заданной температуры в кипящем слое 150–200 °С реактор вынимали из обечайки, высушенный продукт выгружали из реактора.

Полученные пробы высушенного флотоконцентрата использовали для проведения опытов по определению физико-механических свойств продукта.

Поскольку технологический процесс грануляции полностью не моделируется на лабораторном оборудовании, для оценки изменения трендов физико-механических свойств были выбраны показатели слеживаемости и прессуемости. Данные показатели зависят от свойств вещества и могут служить критериями для качественно-количественной оценки физико-механических свойств исследуемого материала.

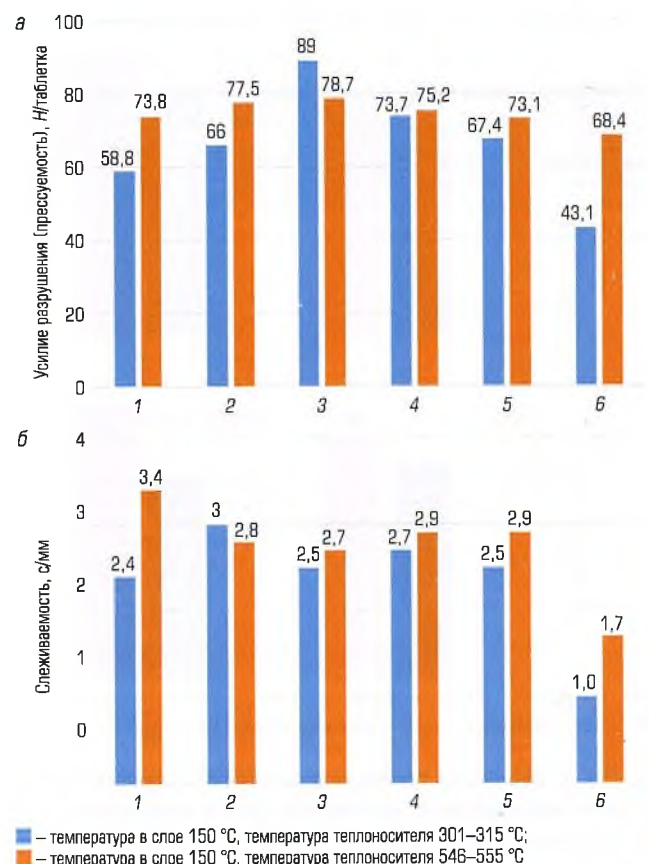
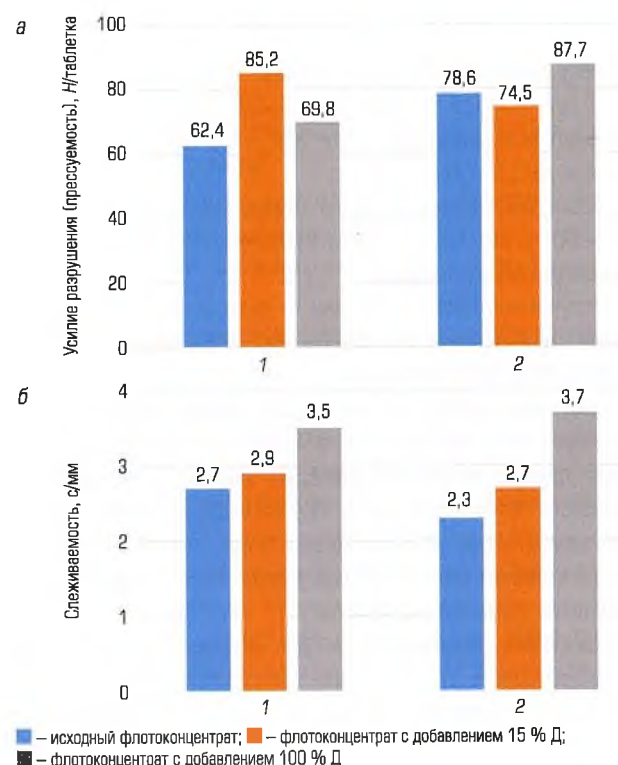
Показатель слеживаемости для образцов устанавливали в соответствии с существующей инструкцией по определению показателя слеживаемости мелкозернистых кристаллических продуктов.

Методика определения прессуемости высушенного материала была специально разработана для данных исследований. Она основана на определении усилия разрушения прессата (спрессованных таблеток). Измерения выполняли при температуре окружающего воздуха от +18 до +25 °С и относительной влажности воздуха от 30 до 80 %. Усилие прессования таблеток (прессата) первоначально подбирали таким, чтобы усилие, при котором происходит разрушение прессата из исходного продукта, находилось приблизительно в середине шкалы прибора, на котором таблетка в дальнейшем будет подвергнута разрушению. Спрессованные таблетки имели диаметр 16 мм и толщину 3,15 мм (масса одной таблетки 1,1 г). Для определения усилия разрушения спрессованную таблетку устанавливали на ребро на столик прибора ИПГ-1М, и усилие разрушения таким образом прикладывали по диаметру таблетки. За результат измерения было принято среднее арифметическое из 10 определений.

Результаты проведенных опытов

На рис. 2 приведено изменение показателей прессуемости и слеживаемости высушенного флотоконцентрата в зависимости от температурного режима сушки и добавления метасиликата натрия.

Как следует из рис. 2, добавление метасиликата натрия для связывания хлоридов магния и кальция в исходном продукте несколько повышает показатели слеживаемости и прессуемости материала, что делает оправданным использование данного реагента в технологии получения высушенного сырья для производства гранулированного хлористого калия. Повышение температуры теплоносителя с 310–315 до 546–550 °С дополнительно повышает прессуемость материала. С учетом погрешности определения показатель слеживаемости практически не изменяется.



На рис. 3 показано изменение показателей прессуемости и слеживаемости высушенного флотоконцентрата в зависимости от температурного режима сушки и добавления депрессора.

Как следует из рис. 3, а, в исследуемых пределах указанных параметров на прессуемость материала практически не влияет ни расход депрессора, ни температурный режим сушки. Таким образом, возможное повышение депрессора в цикле сильвиновой флотации не сказывается на процессе прессования получаемого флотоконцентрата.

С учетом погрешности определения слеживаемости можно сказать, что данный показатель также не изменяется (см. рис. 3, б).

На рис. 4 приведено изменение показателей прессуемости и слеживаемости высушенного флотоконцентрата в зависимости от температурного режима сушки и увеличения содержания первичных аминов.

Как следует из рис. 4, а, добавление первичных аминов в количестве 15 % к исходному флотоконцентрату практически не сказывается на прессуемости материала.

Соотношение в эмульсии АР и ВС сказывается незначительно. Повышенное значение прессуемости при соотношении АР:ВС = 1 (см. опыт 3, рис. 4, а) при температуре в слое 150 °С, очевидно, связано с погрешностью измерений. Изменение

температуры теплоносителя с 300 до 550 °С положительно сказывается на прессуемости материала.

Иными словами, сезонное увеличение расхода амина на стадии сильвиновой флотации не должно приводить к заметному снижению показателей прессования. Изменение состава эмульсии амин-аполярный реагент-вспениватель, используемой на стадии сильвиновой флотации, также не влияет на прессуемость высушенного флотоконцентрата.

При увеличении первичных аминов до 370 % исходного содержания прессуемость резко снижается. Начинает заметно сказываться изменение температуры теплоносителя. Аналогично прессуемости изменение слеживаемости заметно меняется только при добавлении амина 370 % (см. рис. 4, б).

В табл. 2 приведены дополнительные данные по опытам с сушкой материалов с различным исходным содержанием аминов и температурой в кипящем слое 200 °С.

Как следует из данных табл. 2, повышение прессуемости материала достигается при увеличении температуры теплоносителя с 300 до 550 °С, а также повышении температуры в кипящем слое с 150 до 200 °С.

Можно сделать вывод, что повышение температуры материала в кипящем слое и увеличение температуры теплоносителя в большей степени сказываются на прессуемости материала, чем содержание аминов в исходном продукте. По-видимому, это связано с возможностью удаления избыточного содержания амина при повышении температуры теплоносителя до 550 °С и температуры в кипящем слое до 200 °С.

В целом по выполненным опытам можно отметить заметный разброс данных по показателю слеживаемости, обусловленный высокой погрешностью метода. Более подходящим для подобных исследований представляется использование показателя прессуемости.

Заключение

На лабораторных установках в научно-исследовательских лабораториях АО «ВНИИ Галургии» проведены комплексные исследования по изучению влияния различных факторов на физико-механические характеристики сырья для получения гранулированного хлористого калия.

Получены образцы хлористого калия с различным содержанием флотационных реагентов, моделирующие различные реагентные режимы работы флотационной фабрики. Выполненные исследования по сушке и прессованию полученных образцов показали, что:

- при увеличении температуры теплоносителя и температуры в кипящем слое прессуемость высушенного продукта повышается;
- сезонное изменение концентрации аминов (увеличение на 15 %) практически не сказывается на изменениях показателей слеживаемости и прессуемости;
- добавление депрессора в материал в расчетном количестве 200 % исходного готового продукта практически не приводит к снижению показателей слеживаемости и прессуемости в высушенном материале.

Результаты выполненных исследований применительно к получению гранулированного хлористого калия показывают,

Таблица 2. Прессуемость высушенного флотоконцентрата в зависимости от температурного режима сушки и содержания первичных аминов в материале до сушки

Материал	Температура в кипящем слое, °С	Температура теплоносителя, °С	Усилие разрушения (прессуемость), Н/таблетка
1 (исходный)	150	305–308	58,8
		300–312	65,5
	200	550	73,8
		551–560	79,7
2 (деаминированный)	150	298–304	57,2
	200	540–546	77,7
3 (дополнительно аминированный)	150	301–308	43,1
		304–312	57,2
	200	550–555	68,4
		550–555	91,1
Среднее по материалам 6, 7, 8 (расход амина увеличен на 15 %)	150	303–315	70,6
	150	553–555	75,7

что улучшение физико-механических свойств материала для прессования возможно за счет повышения на стадии сушки температуры в кипящем слое до 170–200 °С при температуре теплоносителя не менее 550 °С. При промышленном производстве данные температурные режимы сушки позволят в значительной мере нивелировать влияние остаточных флотационных реагентов в хлористом калии (например, при изменении реагентного режима работы флотационной фабрики) на процесс прессования.

Наиболее эффективно такие режимы сушки могут быть использованы на промышленных печах КС, имеющих футеровку подрешетного пространства печи, а также газохода от топки до печи.

Библиографический список

1. Кочетков В. Н. Гранулирование минеральных удобрений. — М.: Химия, 1975. — 224 с.
2. Кувшинников И. М. Минеральные удобрения и соли: свойства и способы их улучшения. — М.: Химия, 1987. — 256 с.
3. Козел З. Л., Розовин М. Д., Гойко Н. А., Захарова Ю. М. Исследование физико-механических свойств хлористого калия // Горный журнал. 2007. № 8. С. 86–88. [\[ГЖ\]](#)



СИСТЕМА НАВИГАЦИИ ПРОХОДЧЕСКО-ОЧИСТНОГО КОМБАЙНА НА КАЛИЙНЫХ РУДНИКАХ*



Л. Ю. ЛЕВИН¹,
зав. отделом аэрологии
и теплофизики, д-р техн. наук,
aerolog_lev@mail.ru



Д. С. КОРМИЦКОВ¹,
научный сотрудник отдела аэрологии
и теплофизики, канд. техн. наук



Е. Г. КУЗЬМИНИЧ¹,
аспирант



А. М. МАЧЕРЕТ²,
главный маркшейдер, начальник
маркшейдерского управления

¹Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия
²ПАО «Уралкалий», Березники, Россия

Введение

На рудниках ПАО «Уралкалий» применяют камерную систему разработки с использованием проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р». Одними из основных факторов безопасной реализации камерной системы разработки являются мощность межкамерных целиков и соосность очистных камер. Маркшейдерская служба регламентирует отклонение пройденной выработки от проектной оси не более чем на 20 см. Для поддержания требуемой точности машинист проходческо-очистного комбайна «Урал-20Р» периодически выполняет визуальный контроль отклонения траектории проходки по двум вешкам, установленным маркшейдерской службой. Однако при работе комбайна в тупиковой выработке образуется сильно запыленная атмосфера, затрудняющая выполнение визуального контроля [1]. В связи с этим машинисты комбайна вынуждены делать периодические остановки в работе для снижения запыленности выработки и осуществлять визуальный контроль. При этом следует учитывать фактор влияния опыта машиниста комбайна на выполнение этих операций. Это приводит к простоям оборудования и снижению возможной производительности комбайна. Также стоит отметить большие трудозатраты маркшейдерской

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 19-77-30008.

Рассмотрены возможные способы построения навигационных систем управления проходческими и очистными комбайнами. По результатам анализа установлено, что наиболее перспективным вариантом навигации комбайнов на подземных работах являются системы, реализующие принципы инерционной навигации. Показано, что современные бесплатформенные инерциальные системы удовлетворяют условиям обеспечения необходимой точности. На их основе разработан опытный образец системы навигации комбайна и проведены его наземные испытания.

Ключевые слова: подземный рудник, комбайн, бесплатформенная инерциальная навигационная система, испытания, отклонение, точность, горные выработки.

DOI: 10.17580/gzh.2021.04.13

службы на постоянный контроль и задание траектории движения комбайну.

Современные тенденции модернизации технологических процессов добычи на горных предприятиях обуславливают необходимость разработки эффективного оборудования, повышающего уровень производства [2–6]. Автоматизация процесса задания траектории движения комбайна, а также определения фактического курса может снизить время проходки очистных камер. С этой целью предприятием ПАО «Уралкалий» была поставлена задача исследования и разработки опытного образца системы, позволяющей контролировать фактическое положение комбайна в пространстве.

Принципы действия системы контроля направления движения комбайна

Для обеспечения навигации комбайна в подземных условиях может служить опыт, используемый на поверхности, например в авиационной и морской навигации. В настоящее время можно выделить следующие методы [7]:

- обзорно-сравнительный;
- позиционный (метод поверхностей и линий положения);
- инерциальные методы счисления пути.

По типу измерителей методы счисления пути можно подразделить на воздушный, доплеровский и инерциальный.

На практике методы инерциального счисления пути реализованы с помощью специальных технических средств – инерциальных навигационных систем (ИНС). Основное назначение последних заключается в движении объекта к заданной точке при автоматическом или полуавтоматическом управлении и ориентации.

К достоинствам ИНС можно отнести их автономность от внешних источников данных, высокую информативность, более

эффективную защиту от помех, быстродействие при передаче информации, отсутствие необходимости постоянного обслуживания.

Однако ИНС имеют некоторые недостатки. К ним можно отнести ошибки, которые накапливаются с течением времени [8]. Это могут быть как ошибки, вызванные неправильной исходной настройкой оборудования, так и методические ошибки. С целью коррекции ошибок создают комбинированные навигационные системы, где данные, получаемые ИНС, дополняют информацией, поступающей от неавтономных систем (системы контрольных реперных точек, спутниковые системы навигации и др.). Системы оснащены дополнительными корректирующими приборами (например, датчиками бокового сноса на самолетах) [9–14].

Разработка опытного образца системы

На начальном этапе разработки системы навигации комбайна авторами статьи был выполнен анализ существующего опыта навигации и автоматизации технологических процессов на горных производствах, технологического режима работы комбайнов на калийных рудниках, а также существующего оборудования, подходящего для построения системы навигации комбайна. На основе выполненного анализа были выделены основные ограничивающие факторы и обоснованы технические требования к опытному образцу системы.

Система навигации добычного комбайна в условиях подземных рудников обладает некоторыми особенностями построения в силу ограниченного пространства и способов коррекции показаний ИНС. К основным ограничивающим факторам применения инерциальных систем навигации комбайна относятся следующие.

1. **Крайне низкая скорость движения комбайна.** При скорости до 0,3 м/мин в инерциальной навигационной системе происходит накопление погрешности по приращению координаты пройденного пути в случае использования бесплатформенных инерциальных навигационных систем без коррекции.

2. **Боковой снос комбайна.** При малых скоростях и небольших постоянных боковых смещениях комбайна возникают трудности при определении направления вектора скорости, что в дальнейшем приводит к накоплению ошибки расчета координат. В результате этого комбайн может двигаться параллельно или уходить с требуемого курса. Поэтому в системе необходимо использовать дополнительные устройства коррекции, которые должны удовлетворять специфическим условиям работы добычного комбайна. К таким определяющим факторам для систем коррекции в условиях рудников ПАО «Уралкалий» можно отнести следующие.

1. **Среда эксплуатации.** В процессе работы комбайна образуется большое количество пыли, в результате чего значительно сокращается видимость в камере. Этот факт, а также оседание пыли на оборудовании накладывают ограничения на применение оптических систем коррекции в процессе эксплуатации оборудования.

2. **Условия эксплуатации.** После отработки камеры комбайн осуществляет откатку в начало камеры и перемещение на

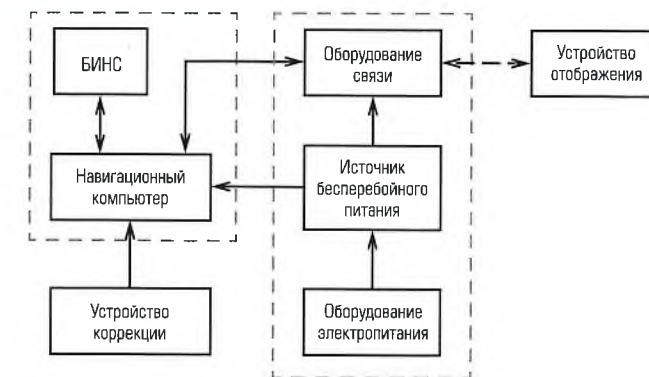


Рис. 1. Принципиальная схема системы навигации комбайна

новый участок. Использование стационарных установок приведет к усложнению и замедлению технологического процесса добычи за счет дополнительных операций по переносу оборудования. В связи с этим установка стационарного или сложного в эксплуатации оборудования нецелесообразна.

В качестве способов корректировки показаний работы бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) в условиях калийных рудников могут быть использованы методы, основанные на применении датчика пройденного пути, который может быть реализован на базе одометра, системы радиопозиционирования, камер машинного зрения или трехмерного георадара. На начальном этапе разработки системы навигации комбайна для проверки точности системы при испытаниях на земной поверхности был выбран способ коррекции, основанный на использовании датчика пройденного пути.

Исходя из параметров рудничной атмосферы, а также режима работы комбайна, к системе навигации были сформулированы основные требования, приведенные ниже. На **рис. 1** показана принципиальная схема устройства системы навигации комбайна.

Основные технические требования к системе

Температура окружающей среды, °С	0 ... +55
Относительная влажность воздуха, %, не более	98
Запыленность окружающей среды, мг/м³	Нет ограничений
Исполнение оборудования	РВ
Диапазон долготы, градус	Нет ограничений
Диапазон широты, не более южной и северной, градус	70
Диапазон угловых скоростей, рад/с	±300
Точность определения угла курса, СКО, градус	0,05·sec(φ)
Ошибка проектирования пройденного пути на земную систему координат, СКО	0,25 % пройденного пути
Точность определения углов крена, тангажа, СКО, градус	0,03

Устойчивость к ударным воздействиям

(длительность: 1 мс, форма: 1/2 синуса), g

100

Вибрация (устойчивость) (случайная 20 Гц – 1 КГц), g

5

П р и м е ч а н и е: φ – текущая географическая широта; РВ – рудничное взрывобезопасное; СКО – среднеквадратическое отклонение.

Необходимо отметить, что основным требованием по точности работы системы на этапе разработки опытного образца является обеспечение точности удержания заданного курса. На рудниках ПАО «Уралкалий» отклонение от проектной оси очистной камеры при проходке не должно превышать 20 см на 300 м пути.

Испытания опытного образца системы на поверхности

Основой системы навигации комбайна является бесплатформенная инерциальная навигационная система ГЛ-300 производства ООО «Гиролаб». Основные технические характеристики измерительного модуля приведены ниже.

Основные технические характеристики ГЛ-300

Погрешность СКО начального определения угла курса σ , градус, не более	0,04 / $\cos$ (широты)
Погрешность СКО удержания угла курса за 1 ч работы σ , градус, не более	0,01
Погрешность СКО определения углов: крена, тангажа σ , градус, не более	0,02 (неподвижное основание: 0,01)
Погрешность СКО счисления координат σ с коррекцией от одометра, %, не более (от пройденного пути)	0,2
Погрешность СКО счисления высоты σ с коррекцией от одометра, %, не более (от пройденного пути)	0,15
Диапазон: X/Y/Z, рад/с	± 500
Диапазон линейных ускорений: X/Y/Z, g	± 10 (по заказу – до 30)
Температура (рабочая, устойчивость), °C	-40...+55 (опционально -60...+55)
Температура (предельная, прочность), °C	-55...+85 (опционально -70...+85)
Вибрация (устойчивость) (случайная 60 Гц – 1 КГц), g	5
Устойчивость к ударным воздействиям (длительность: 1 мс, форма: 1/2 синуса), g	100
Время функциональной готовности, с, не более	2
Время ускоренного гироскопирования, с, не более	360
Частота навигационных решений, Гц	1220
Напряжение питания, В / потребляемая мощность, Вт	18...32 / <20

Для проверки отклонения величины угла курса при продолжительном простое было проведено испытание измерительного модуля системы. Модуль находился неподвижным на протяжении 10 ч. Графики изменения углов курса, крена и тангажа приведены на рис. 2.

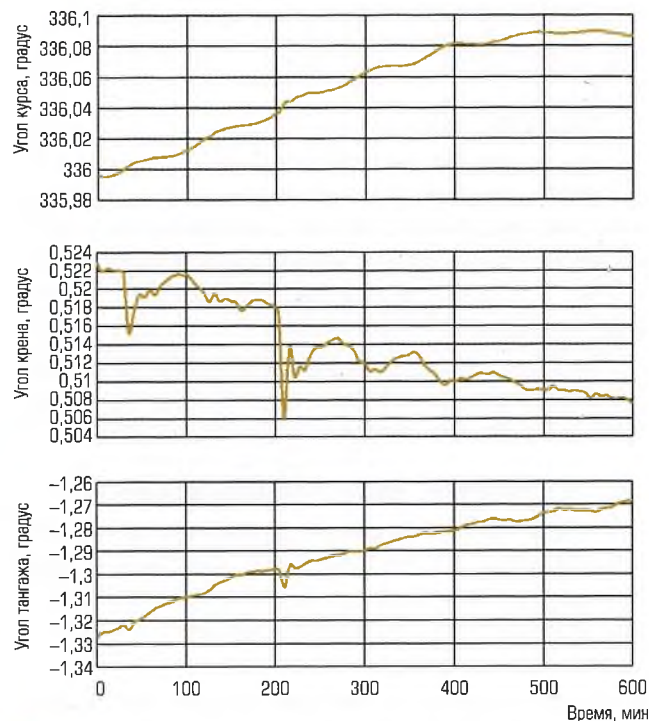


Рис. 2. Изменение углов курса, крена и тангажа во времени при неподвижном основании

По результатам испытаний установлено, что погрешности измерения углов курса, крена и тангажа за 10 ч не превысили 0,1°. Использование БИНС ГЛ-300 в качестве измерительного модуля в системе навигации комбайна обеспечит его корректную работу с удержанием углов курса, крена, тангажа в допустимом диапазоне даже после продолжительного простоя между рабочими сменами.

На следующем этапе были проведены наземные испытания системы на подвижном основании. С этой целью на прямом участке дороги был построен маршрут протяженностью 300 м с использованием тахеометра Topcon ES-105L и данных геодезической съемки при помощи прибора South Gns Receiver Galaxy G1.

По результатам подготовки маршрута получены три базовые точки: две крайние и средняя, а также промежуточные точки с интервалом 25 м на протяжении всего маршрута. Для исключения влияния погрешности геодезической съемки было принято допущение, что базовые точки лежат на одной прямой.

Для удобства обработки результатов измерений в качестве координат положения изделия БИНС использовали координаты, пересчитанные относительно опорных. Данные координаты получены при задании в БИНС координат, снятых с помощью геодезической съемки.

Для точного позиционирования установки при перемещении вдоль всего маршрута была натянута полиэтиленовая нить. Для перемещения объекта по контрольной прямой разработана специальная передвижная управляемая платформа (рис. 3).



Рис. 3. Передвижная платформа для испытаний системы контроля направления движения комбайна

В ходе испытаний выполнен ряд проездов, каждый осуществляли в двух режимах:

- с включенной коррекцией по данным датчика пройденного пути (проезд установки в прямом направлении вдоль натянутой нити на расстояние 300 м);
- без использования коррекции по данным датчика пройденного пути (проезд установки в обратном направлении вдоль натянутой нити на расстояние 300 м).

Для коррекции координат перемещение установки в обратном направлении выполняли с периодическими остановками.

Координаты, полученные от системы навигации комбайна, сравнивали с координатами прямой линии, построенной по геодезическим точкам. Отклонение измеряемых координат при прямом проезде установки с коррекцией от датчика пройденного пути и без коррекции представлено на рис. 4. В процессе испытаний ошибка определения координат относительно прямой линии не превышала 20 см. Полученные результаты удовлетворяют требованиям точности, указанным в нормативных документах.

Из рис. 4 видно, что применение устройств коррекции в системе навигации комбайна существенно уменьшает амплитуду пульсаций ошибки счисления координат. Результаты



Рис. 4. Зависимость ошибки от пройденного расстояния

испытаний показывают, что ошибка отклонения координаты не превышает 20 см на 300 м пройденного пути как при использовании данных коррекции, так и без них. При возврате установки на исходную позицию отклонение полученных координат от исходных составило 12 см. Однако в составе системы навигации комбайна необходимо использовать устройства коррекции для уменьшения ошибки счисления координат при простоях оборудования в период пересменки.

Взаимодействие с системой навигации комбайна и вывод измеряемых данных осуществляли с помощью специального программного обеспечения, разработанного авторами статьи. В дальнейшем это позволит машинисту комбайна оценивать ориентацию комбайна в пространстве и корректировать его курс по отношению к заданному.

Выводы

Результаты наземных испытаний показали, что опытный образец системы контроля направления движения комбайна обеспечивает точность определения координат в пределах 20 см на длине пути 300 м.

На следующем этапе планируется проведение опытно-промышленных испытаний системы в рудничных условиях на территории рудника БКПРУ-4 ПАО «Уралкалий». В случае положительного результата внедрение системы поможет снизить затраты маркшейдерской службы на задание направления движения комбайну, а также уменьшить зависимость от опыта машиниста комбайна при выполнении визуального контроля отклонения движения машины.

Следует отметить, что система имеет хорошие перспективы применения по следующим направлениям:

- дистанционная работа маркшейдерской службы рудника при задании проектной траектории движения комбайна;
- автоматизация процесса передачи данных по проходческим и добычным работам в горно-геологическую информационную систему предприятия;
- мониторинг параметров и циклограммы работы комбайна;
- автоматизация процесса управления комбайном.

Библиографический список

1. Левин Л. Ю., Исаевич А. И., Семин М. А., Газизуллин Р. Р. Исследование динамики пылевоздушной смеси при проветривании тупиковой выработки в процессе работы комбайновых комплексов // Горный журнал. 2015. № 1. С. 72–75. DOI: 10.17580/gzh.2015.01.13
2. Яценко С. Н., Яценко М. А., Николайчук Н. А. Применение системы автоматизации в добычных процессах на подземных горнорудных предприятиях // International Scientific Review. 2016. № 20(30). С. 23–26.
3. Trifanov G. D., Shishlyannikov D. I., Lavrenko S. A. Assessment of URAL-20R machine use efficiency while developing potash salt fields // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 11. No. 9. P. 5722–5726.
4. Сонг Ганг. Опыт внедрения автоматизации процессов подземной добычи угля на примере китайской угольной промышленности // Уголь. 2016. № 2. С. 25–29.
5. Татаринович Б. А., Котляров В. О. Комплексный подход к проектированию подсистем ориентирования и управления движением мобильных роботов, применяемых в горном деле // ГИАБ. 2016. № 8. С. 183–189.
6. Семькина И. Ю., Григорьев А. В., Гаргаев А. Н. Подходы к созданию роботизированного проходческого комбайна в условиях безлюдной шахты // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017 : сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. — СПб. : Санкт-Петербургский горный ун-т, 2017. С. 202–205.
7. Селиванова Л. М., Шевцова Е. В. Инерциальные навигационные системы : учеб. пособие. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. Ч. 1: Одноканальные инерциальные навигационные системы. — 46 с.

«GORNYY ZHURNAL», 2021, № 4, pp. 92–96
DOI: 10.17580/gzh.2021.04.13

Navigation system for heading machines in potash mines

Information about authors

L. Yu. Levin¹, Head of Aerology and Thermophysics Department, Doctor of Engineering Sciences, aerolog_lev@mail.ru
D. S. Kormshchikov¹, Researcher at Aerology and Thermophysics Department, Candidate of Engineering Sciences
E. G. Kuzminykh¹, Post-Graduate Student
A. M. Macheret², Chief Surveyor, Head of Surveying Department

¹Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

²Uralkali, Berezniki, Russia

Abstract

Mining operations at potash mines are carried out by heading machines. Setting of a direction and control of the movement of the machines is carried out by the mine surveyor and by the machine operator in the manual mode. The lack of automation of this process during production leads to large labor costs of the mine surveying service, while the experience of the machine operator affects accuracy of maintenance of a specified course. Currently, there are no ready-made technical products for automating the process of setting the course and controlling the movement of heading machines. This paper deals with the implementation of the navigation system for heading machines in the underground mines of Uralkali company. At the mines of Uralkali, the requirements for the accuracy of such a system are dictated by the requirements for the accuracy of mine surveying support for underground mining operations in driving new roadways. Possible ways of constructing navigation systems and the problems of their application are considered. The analysis of the existing methods shows that the most promising option for navigation of heading machines in underground mine openings are the systems based on the principles of inertial navigation. To use such systems in underground mines and to ensure the required accuracy, the technical requirements for the systems are formulated. It is shown that modern strapdown inertial navigation systems satisfy the required accuracy. On their basis, a prototype of the heading machine navigation system was developed, and its ground tests were carried out. The achieved accuracy of the system makes it possible to proceed to testing of a real heading machine in a mine. The study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 19-77-30008.

Keywords: underground mine, heading machine, strapdown inertial navigation system, testing, deviation, accuracy, mine openings.

8. Степанов О. А. Методы обработки навигационной измерительной информации : учеб. пособие. — СПб. : ун-т ИТМО, 2017. — 196 с.
9. Шэнь Кай, Пролетарский А. В., Неусыпин К. А. Исследование алгоритмов коррекции навигационных систем летательных аппаратов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2016. № 2(107). DOI: 10.18698/0236-3933-2016-2-28-39
10. Кивокуртсева А. Л., Соколов О. А. Особенности оптимизации алгоритмов ориентации бесплатформенной инерциальной навигационной системы современного самолета // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2019. № 3(24). С. 62–73.
11. Qiangwen Fu, Yang Liu, Zhenbo Liu, Sihai Li, Bofan Guan. Autonomous In-motion Alignment for Land Vehicle Strapdown Inertial Navigation System without the Aid of External Sensors // The Journal of Navigation. 2018. Vol. 71. Iss. 6. P. 1312–1328.
12. Hai Yang, Wei Li, Chengming Luo, Jinyao Zhang, Zhuoyin Si et al. Research on Error Compensation Property of Strapdown Inertial Navigation System Using Dynamic Model of Shearer // IEEE Access. 2016. Vol. 4. P. 2045–2055.
13. Kai Shen, Selezneva M. S., Neusypin K. A. Development of an Algorithm for Correction of an Inertial Navigation System in Off-Line Mode // Measurement Techniques. 2018. Vol. 60. Iss. 10. P. 991–997.
14. Jiangning Xu, Hongyang He, Fangjun Qin, Lubin Chang. A Novel Autonomous Initial Alignment Method for Strapdown Inertial Navigation System // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2017. Vol. 66. No. 9. P. 2274–2282.

References

1. Levin L. Yu., Isaevich A. I., Semin M. A., Gazizullin R. R. Dynamics of air-dust mixture in ventilation of blind drifts operating a team of cutter-loaders. *Gornyy Zhurnal*. 2015. No. 1. pp. 72–75. DOI: 10.17580/gzh.2015.01.13
2. Yatsenko S. N., Yatsenko M. A., Nikolaychuk N. A. Application of automation system in underground mining processes. *International Scientific Review*. 2016. No. 20(30). pp. 23–26.
3. Trifanov G. D., Shishlyannikov D. I., Lavrenko S. A. Assessment of URAL-20R machine use efficiency while developing potash salt fields. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016. Vol. 11, No. 9. pp. 5722–5726.
4. Song Gang. Experience in the implementation of process automation and data communication for underground coal mining on the example of China's coal industry. *Ugol*. 2016. No. 2. pp. 25–29.
5. Tatarinov B. A., Kotlyarov V. O. Control of two-mass system with a DC motor and change direction at the exit. *GIAB*. 2016. No. 8. pp. 183–189.
6. Sem'ykina I. Yu., Grigorev A. V., Gargaev A. N. Approaches to robotic heading machine engineering for manless mines. *Innovations and Prospects for Development in Mining Machine and Electrical Engineering — IPDME 2017 : International Conference Proceedings*. Saint-Petersburg : Sankt-Peterburgskiy gornyy universitet, 2017. pp. 202–205.
7. Selivanova L. M., Shevtsova E. V. Inertial navigation systems : Educational aid. Moscow : Izdatelstvo MGTU im. N. E. Bauman, 2012, Part I: Single-channel inertial navigation systems. 46 p.
8. Stepanov O. A. Processing methods for navigation measurement information : Educational aid. Saint-Petersburg : Universitet ITMO, 2017. 196 p.
9. Kai Shen, Proletarskiy A. V., Neusypin K. A. The research into correction algorithms for aircraft navigation systems. *Vestnik MGTU im. N. E. Bauman. Seriya Priborostroyeniye*. 2016. No. 2(107). pp. 28–39.
10. Kivokurtsev A. L., Sokolov O. A. Special features optimization of algorithms of orientation of the strapdown inertial navigation system of the modern plane. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoy aviatsii*. 2019. No. 3(24). pp. 62–73.
11. Qiangwen Fu, Yang Liu, Zhenbo Liu, Sihai Li, Bofan Guan. Autonomous In-motion Alignment for Land Vehicle Strapdown Inertial Navigation System without the Aid of External Sensors. *The Journal of Navigation*. 2018. Vol. 71, Iss. 6. pp. 1312–1328.
12. Hai Yang, Wei Li, Chengming Luo, Jinyao Zhang, Zhuoyin Si et al. Research on Error Compensation Property of Strapdown Inertial Navigation System Using Dynamic Model of Shearer. *IEEE Access*. 2016. Vol. 4. pp. 2045–2055.
13. Kai Shen, Selezneva M. S., Neusypin K. A. Development of an Algorithm for Correction of an Inertial Navigation System in Off-Line Mode. *Measurement Techniques*. 2018. Vol. 60, Iss. 10. pp. 991–997.
14. Jiangning Xu, Hongyang He, Fangjun Qin, Lubin Chang. A Novel Autonomous Initial Alignment Method for Strapdown Inertial Navigation System. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2017. Vol. 66, No. 9. pp. 2274–2282.

ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ В НОВЫХ МАСШТАБАХ



► ОБОГАТИТЕЛЬНЫЕ ФАБРИКИ ПОД КЛЮЧ

► МЕЛЬНИЦЫ
ШАРОВЫЕ/СТЕРЖНЕВЫЕ/ПОЛУ-/САМОИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

► ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АГЛОМЕРАЦИИ

► ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ
ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

► ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СУШКИ КОНЦЕНТРАТОВ

► ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ
КАЖДОГО ЗАКАЗЧИКА

► 30-ЛЕТНИЙ ОПЫТ РАБОТЫ НА МИРОВОМ РЫНКЕ

CEMTEC

Cement & Mining Technology



4470 г. Эннс, Эннсхафенштрассе 40, Австрия
☎+43/7223/83620-0 ✉info@cemtec.at

www.cemtec.at/ru



**1-4 июня 2021
Новокузнецк**



XXIX Международная специализированная выставка
технологий горных разработок

УГОЛЬ и МАЙНИНГ РОССИИ

XI Международная специализированная выставка

ОХРАНА, БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА И ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

VI Международная специализированная выставка

НЕДРА РОССИИ

300 ЛЕТ
КУЗБАСС

Организаторы



Messe
Düsseldorf



уголь



руды



промышленные минералы



охрана и безопасность труда

МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ:

Выставочный комплекс "Кузбасская ярмарка", ул. Автотранспортная, 51, г. Новокузнецк

т./ф: 8 (3843) 32-11-89, 32-22-22 e-mail: com@kuzbass-fair.ru, dr@kuzbass-fair.ru



РЕКЛАМА

www.ugolmining.ru

12+

TECH MINING RUSSIA

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ
МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ И ВЫСТАВКА
9-10 СЕНТЯБРЯ 2021, МОСКВА

Приглашаем Вас принять участие в 3-й международной конференции TECH MINING RUSSIA 2021, НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, которая пройдет 9-10 сентября 2021 в Москве, отель Marriott Courtyard Павелецкая.

TECH MINING RUSSIA посвящена работе горнодобывающей отрасли, одной из самых важных отраслей промышленности Российской Федерации. Основной фокус конференции - это технологии, которые применяются в отрасли и направлены на повышение эффективности и увеличение производительности на всех этапах работы предприятия.

Конференция объединяет представителей горнодобывающей промышленности, разработчиков, инженеров, производителей горнодобывающего оборудования, специалистов по цифровизации и роботизации предприятий отрасли, представителей научного сообщества. Это место для укрепления деловых связей, налаживания новых контактов и договоренностей о сотрудничестве.

Для представителей горнодобывающих предприятий участие бесплатное.

Деловая программа конференции будет освещать вопросы:

- Удаленного управления на горном предприятии;
- Проектирования, реконструкции и строительства горнодобывающего предприятия;
- Современных IT решений и их внедрения;
- Передовых технологий в обработке, обогащении и транспортировке;
- Новых решений в разведке месторождений и добыче полезных ископаемых;
- Технологий охраны труда;
- Технологий безопасности современного предприятия;
- Другие вопросы.

На конференции будет работать **выставка современных технологий**, где Вы сможете получить консультацию специалистов и экспертов отрасли.

Для получения дополнительной информации и регистрации на мероприятие направляйте Ваш запрос на почту info@techmining.ru
Телефон +7-499-11-205-11

Сайт мероприятия www.techmining.ru

Даты проведения: 9-10 сентября 2021 года

РЕКЛАМА

«Eurasian Mining» («Горная промышленность Евразии»)

- Выходит 2 раза в год
- С 2013 г. включен в Международную базу данных Scopus
- С 2015 г. публикуемым статьям присваиваются уникальные идентификационные номера DOI (digital object identifier)
- С 2019 г. включен в Международную базу данных Web of Science (ESCI).

Подробнее о журнале на сайте:

<http://www.rudmet.ru/catalog/journals/8/>

Вышел в свет журнал «Eurasian Mining» № 2 за 2020 г.

MINERAL GEOLOGY AND EXPLORATION (Геология, поиск и разведка полезных ископаемых)

Kerimov V. Yu., Leonov M. G., Mustae R. N., Guryanov S. A. Postmagmatic tectonics of basement granites of the Far Eastern seas of Russia (Керимов В. Ю., Леонов М. Г., Мустаев Р. Н., Гурьянов С. А. Постмагматическая тектоника гранитов фундамента дальневосточных морей России)

PHYSICS OF ROCKS AND PROCESSES (Физика горных пород и процессов)

Baryah A. A., Evseev A. V., Lomakin I. S., Tsayukov A. A. Operational control of rib pillar stability (Барях А. А., Евсеев А. В., Ломакин И. С., Цайюков А. А. Оперативный контроль устойчивости междуканальных целиков)

Tyupin V. N. Geomechanical behavior of jointed rock mass in the large-scale blast impact zone (Тюпин В. Н. Геомеханическое состояние трещиноватого массива горных пород в зоне сейсмического действия массового взрыва)

Baranov S. V., Zhukova S. A., Korchak P. A., Shebalin P. N. Seismic productivity of blasts: A case-study of the Khibiny Massif (Баранов С. В., Жукова С. А., Корчак П. А., Шебалин П. Н. Сейсмическая продуктивность взрывов на примере Хибинского массива)

DEVELOPMENT OF DEPOSITS (Разработка месторождений)

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 (Казанин О. И., Сидоренко А. А., Мешков А. А., Сидоренко С. А. Воспроизводство очистного фронта: современные требования к технологии и организации проходческих работ на угольных шахтах)

Prokopenko S. A., Sementsov V. V., Dobrovolsky M. S., Nifanov E. V. Classification of protective pillars toward higher safety and innovation in room-and-pillar coal mining (Прокопенко С. А., Семенов В. В., Добровольский М. С., Нифанов Е. В. Классификация подзавальных целиков для инновационного развития и повышения безопасности камерно-столбовой отработки пластов угля)

PROCESSING AND COMPLEX USAGE OF MINERAL RAW MATERIALS (Переработка и комплексное использование минерального сырья)

Khrunina N. P. Improvement of a treatment processes of high-clayey gold-bearing placers (Хрунина Н. П. Совершенствование процессов переработки высокоглинистых золотоносных россыпей)

Yushina T. I., Dumov A. M., Nguyen Van Chon, Nguyen Thu Thuy. Mineral composition and commercial application feasibility of sericite ore in Ha Tinh Province (Юшина Т. И., Думов А. М., Нгуен Ван Чонг, Нгуен Тху Тхуй. Исследование минерального состава серицитовой руды месторождения Хатинь и рассмотрение возможности ее переработки и использования в промышленности)

EQUIPMENT AND MATERIALS (Оборудование и материалы)

Tereshchenko S. V., Shibaeva D. N., Shumilov P. A., Vlasov B. A. Effect of vibrating feeder pan geometry on radiometric separator performance (Терещенко С. В., Шибаева Д. Н., Шумилов П. А., Власов В. А. Оценка влияния геометрии канала лотка вибропитателя на производительность радиометрического сепаратора)

Sklyanov V. I., Figurak A. A., Emelina N. B., Eremenko A. A. Improvement of well flushing technology during drilling in permafrost (Склянов В. И., Фигурак А. А., Емелина Н. В., Еременко А. А. Совершенствование технологии промывки скважин при бурении в многолетнемерзлых породах)

Zenkov I. V., Morin A. S., Vokin V. N., Kiryushina E. V. Remote sensing of mining and haulage equipment arrangement in Russia: A case-study of the coal and iron ore industry (Зеньков И. В., Морин А. С., Вокин В. Н., Кирюшина Е. В. Результаты дистанционного мониторинга размещения горнотранспортного оборудования на угольных и железорудных месторождениях России)

AUTOMATION (Автоматизация)

Beloglazov I. I., Petrov P. A., Bazhin V. Yu. The concept of digital twins for tech operator training simulator design for mining and processing industry (Белоглазов И. И., Петров П. А., Бажин В. Ю. Концепция цифровых двойников для разработки тренажеров оператора-технолога для горно-обогатительных предприятий)

Temkin I. O., Myaskov A. V., Deryabin S. A., Rzazade U. A. Digital twins and modeling of the transporting-technological processes for on-line dispatch control in open pit mining (Темкин И. О., Мясков А. В., Дерябин С. А., Рзазаде У. А. Цифровое дублирование транспортно-технологических операций в карьере для оперативно-диспетчерского управления)

Nikitenko M. S., Malakhov Yu. V., Kizilov S. A., Zhuravlev S. S. Multifunction walking roof support for underground mining of stratified deposits and placers (Никитенко М. С., Малахов Ю. В., Кизилов С. А., Журавлев С. С. Многофункциональная шагающая платформа для подземной разработки мощных пластовых и россыпных месторождений)

ENVIRONMENTAL PROTECTION (Охрана окружающей среды)

Galchenko Yu. P., Kalabin G. V. Nature-like mining technology as a potentially monumental resolution of environmental contradictions during the development of solid mineral deposits (Галченко Ю. П., Калабин Г. В. Природоподобная горная технология, как перспектива кардинального разрешения экологических противоречий при разработке месторождений твердых полезных ископаемых)

TRAINING OF PERSONNEL (Подготовка кадров)

Koteneva A. V., Chelyshev P. V. Spiritual and moral bases of psychological safety of mining-students (Котенева А. В., Челышев П. В. Духовно-нравственные основы психологической безопасности студентов-горняков)

По всем вопросам обращайтесь в редакцию:

119049, Москва, Ленинский проспект, д. 6, стр. 2, оф. 619

Тел.: +7(495) 638-45-18

Эл. почта: gornjournal@rudmet.ru



«Руда и Металлы»
Издательский дом



АО «ВНИИ Галургии»



Начало деятельности АО «ВНИИ Галургии» связано с созданием в 1931 году в Ленинграде Соляной лаборатории АН СССР

90 лет успешной деятельности
в калийной промышленности

Более 200 научно-исследовательских
и проектных работ ежегодно

Осуществление полного цикла –
от научной проработки технического
решения и разработки технологии
до создания проекта
и передачи его заказчику

Обеспечение заказчика
проектно-сметной документацией
и сопровождение объектов
на всех стадиях их жизненного цикла

21 проектное подразделение
14 научно-исследовательских лабораторий
5 докторов наук
35 кандидатов наук
около 600 сотрудников

Санкт-Петербург
(165 работников)

Березники
(41 работник)

Пермь
(384 работника)

