

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ НЕДР
ИМ. АКАДЕМИКА Н.В. МЕЛЬНИКОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ НЕДР В XXI ВЕКЕ ГЛАЗАМИ МОЛОДЫХ

17 МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ
ШКОЛА МОЛОДЫХ
УЧЁНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

Москва

2025

**Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Российская академия наук
Отделение наук о Земле
Научный совет РАН по проблемам горных наук
Научный совет РАН по проблемам обогащения
полезных ископаемых
Институт проблем комплексного освоения недр
им. академика Н.В.Мельникова РАН
Совет молодых ученых и специалистов**

**ПРОБЛЕМЫ
ОСВОЕНИЯ НЕДР В XXI ВЕКЕ
ГЛАЗАМИ МОЛОДЫХ**

***17 МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ ШКОЛА
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ***

27-31 октября 2025 г.

**Москва
2025**

Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. Материалы 17 Международной научной школы молодых ученых и специалистов. 27-31 октября 2025 г. – М: ИПКОН РАН, 2025 – 416 с.

В сборнике опубликованы материалы 17 Международной научной школы молодых ученых и специалистов, посвященные последним достижениям в области теории и технологии комплексного освоения недр Земли. Представлены результаты новых исследований по таким направлениям как геология, техника и технология освоения месторождений твердых полезных ископаемых, геомеханика, разрушение горных пород, обогащение полезных ископаемых. Рассмотрены вопросы, связанные с управлением горного производства, техникой безопасности и охраной окружающей среды, геоэкологией. Освещены экономические аспекты проблемы освоения недр.

Для широкого круга специалистов, работающих в области освоения, добычи и переработки минерального сырья, геоэкологии и экономики.

Ответственность за аутентичность и точность цитат, имен и иных сведений, а также за соблюдение законов об интеллектуальной собственности несут авторы публикуемых материалов.

Редакционный совет: академик РАН *В.Н. Захаров* (председатель), канд. техн. наук, *А.В. Шляпин* (директор Института), академик РАН *К.Н. Трубецкой*, академик РАН *В.А. Чантурия*, член-корреспондент РАН *Д.Р. Каплунов*, *И.И. Айнбиндер*, *А.И. Докучаева*, *С.С. Кубрин*, *С.Б. Кулибаба*, *Т.Н. Матвеева*, *О.Н. Малинникова*, *Н.А. Милетенко*, *П.Г. Пацкевич*, *Б.Н. Пашичев*, *М.В. Рыльникова*, *Д.Н. Радченко*, *А.Л. Самусев*, *Т.В. Чекушина*, *И.В. Шадрунова*, *А.А. Добрынин*, *В.Г. Миненко*, *В.А. Трофимов*, *А.В. Харченко*

*Спонсоры проведения 17 Международной научной школы
молодых ученых и специалистов*



ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 622.063.4

РОБОТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ПО ДОБЫЧЕ УГЛЯ. ЗАДАЧИ, ТРЕБУЮЩИЕ РЕШЕНИЯ

Кубрин С.С.

ИПКОН РАН, г. Москва

Выемка угля на шахте требует присутствие машиниста выемочного комбайна в очистном забое. Это обусловлено в виду большой неопределённости горно-геологических условий залегания угольного пласта и слабоуправляемыми или почти не управляемыми процессами, вызванными выемкой угля из массива горных пород. Условия труда оператора комбайна в очистном забое относятся к тяжелым и, следовательно, разработка роботизированного очистного комплекса по выемке угля, работающего в автоматическом режиме, является важнейшей актуальной задачей в угольной промышленности.

Работы по созданию роботизированных устройств, машин и механизмов по добыче угля ведутся мировыми производителями технологического оборудования: JOY, Caterpillar, предприятиями группы FAMUR. Полученные на сегодня результаты применимы, в основном, для выдержанных по мощности пологих угольных пластов не имеющих нарушений, выклиниваний, пережимов, расщеплений и т.д. [1-4]. Угольные пласты в Российской Федерации разительно отличаются от пластов в США и Австралии.

Поэтому, в блоке управления роботизированным очистным комплексом должна находиться информация об угольном пласте с отметками, углами и азимутов падения, которая позволит виртуально отстраивать поверхности кровли и почвы впереди забоя. Это требуется для определения оптимальных траекторий движения исполнительных органов (шнеков) выемочного комбайна, и позволяет избегать присечек и обеспечивать получение угля с установленными параметрами качества.

Кроме этого, роботизированный очистной комплекс должен быть оснащен более 2000 датчиками, которые будут производить непрерывные измерения различных параметров с частотой 50-100 раз в секунду. При этом часть из них будут размещены стационарно вдоль забоя, а часть, должна находиться на движущемся выемочном комбайне. Требуется разработать алгоритмы по снижению уровня рисков, определяющие

режимы работы роботизированного комплекса, самодиагностики, оценки и прогноза состояния отказов оборудования [5].

Для эффективности добычи угля необходимо разработать математическую модель пласта с учетом углов и азимутов падения. Она позволит прогнозировать поверхности кровли и почвы впереди забоя. Это требуется для определения оптимальных траекторий движения исполнительных органов выемочного комбайна, обеспечивающих получение угля с установленными параметрами качества. При этом, полученные траектории движения исполнительных органов комбайна необходимо будет корректировать по фактическому залеганию кровли и почвы пласта. Для этого следует выявить контакты угольного пласта с вышележащим и нижележащим слоями породы. Это представляется крайне сложной проблемой, которая простым применением искусственного (компьютерного) зрения не будет решена. Для этого потребуется комплекс различных устройств, таких, как гиперспектральные и инфракрасные камеры, со специализированной подсветкой (низкоугловой, купольной, коаксиальной, стробоскопической, структурированной и др.).

Блок управления роботизированным комплексом должен решать большой объем задач по прогнозированию параметров техногенной среды. В первую очередь параметры рудничной атмосферы и, в частности, концентрацию метана. В зависимости от концентрации метана необходимо выбирать оптимальный режим изменения скорости подачи выемочного комбайна, чтобы при его движении вдоль лавы концентрация метана не превышала нормативный уровень и при этом добыча угля была бы максимально возможной. Кроме этого, при изменении скорости подачи комбайна изменяются усилия взаимодействия резцов с угольным пластом. Для обеспечения товарных требований к размеру кусков угля необходимо будет корректировать скорость вращения переднего и заднего шнеков.

Особую важность имеют режимы передвижки секций крепи очистного комплекса, изменения длины ленточного конвейера, передвижка перегружателя, дробильного комплекса и энергопоезда [6]. При этом возможно частичное управления кровлей с помощью создания избыточного давления в стойках крепи.

Важной задачей является навигация. То есть определение положения очистного комплекса в пространстве. Для этого необходимо использовать современные нерациональные системы навигации. Это лазерные, волоконно-оптические, микромеханические, твердотельные гироскопы. Наиболее перспективными являются, конечно, разрабатываемые квантовые гироскопы и гироскопы де Бройля.

Следует учесть возможность для блока управления роботизированным комплексом по выемки угля возможность проведения самодиагностики, оценки и прогноза состояния элементов, создание модели выбора стратегии использования и технического обслуживания роботизированного очистного комплекса.

Выводы.

Представленный список задач, требующих алгоритмической и программной реализации в блоке управления роботизированного очистного комплекса явно неполный. Решение их должно базироваться на научно обоснованных зависимостях, уравнениях, эмпирических формулах и фактических данных. Приведенный анализ необходимых возможностей роботизированного очистного комплекса свидетельствует о сложности проблем роботизации угольной промышленности. Однако, их решение позволит вывести людей из опасной зоны выемочного участка угольной шахты, повысить безопасность горных работ и поднять престиж шахтерского труда.

Список литературы.

1. Optimizing Wireless LAN for Longwall Coal Mine Automation. Industry Applications, IEEE Transactions on Date of Publication: Jan.-feb. 2007. Hargrave, C.O. Exploration & Min., Commonwealth Sci. & Ind. Res. Organ., Pullenvale, Qld. Ralston, J.C.; Hainsworth, D.W. Volume: 43 , Issue: 1 Page(s): 111–117.
2. Real-World Automation: New Capabilities for Underground Longwall Mining. Peter B Reid, Mark T Dunn, David C Reid and Jonathon C Ralston. CSIRO Mining Technology. Queensland Centre for Advanced Technologies. Pullenvale, Qld 4069 Australia 06.03.2014 14:27.
3. P. Swanson, M. Boltz, D. Chambers Seismic monitoring strategies for deep longwall coal mines / National Institute for Occupational Safety and Health, Mining Program. 2016 DOI:10.26616/nioshpub2017102.
4. Industrial Ethernet for Control and Information Interconnectivity in Automated Longwall Mining. D.C. Reid D.W. Hainsworth J.C. Ralston R.J. McPhee & P.G. Ingram-Johnson. CSIRO, Mining Automation. Technology Court, Pullenvale, Qld, Australia 4069.
5. Федунец Н.И., Кубрин С.С., Развитие информационных технологий на горнодобывающих предприятиях. // Горный журнал. – 2009. - №1. – С. 83-85.
6. Виленкин Е.С., Концепция пространственно-распределенной системы децентрализованного событийного управления технологическим процессом добычи угля очистным забоем. // Уголь. - М.: 2013. - № 2. С. 29-31.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПО ИНДЕКСУ R_m В УСЛОВИЯХ РАЗРАБОТКИ РУДНЫХ И НЕРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Еременко В.А., Косырева М.А.

Горный институт НИТУ МИСИС, г. Москва

В Горном институте НИТУ МИСИС разработаны «Методические рекомендации по оценке устойчивости горных выработок в условиях разработки рудных и нерудных месторождений» [1], которые определяют I-V категорий устойчивости подземных горных выработок различного назначения, количественные параметры устойчивости по индексу R_m , методику расчета вероятностей разрушения горных выработок на основе определения их временной устойчивости с оценкой рисков обрушения и параметры крепления.

Определение категории устойчивости выработок производится расчетом числового значения индекса R_m по формуле:

$$R_m = R'_m \cdot K_{VT_{24}} \cdot K_{VT_{27}} \cdot K_{VT_{28}},$$

$$R'_m = \frac{\sum_i (R_{mp_i} \cdot K_{VP_i}) + \sum_i (R_{mt_i} \cdot K_{VT_i})}{\sum_i K_{VP_i} + \sum_i K_{VT_i}},$$

($R_{mt_{24}}, R_{mt_{27}}, R_{mt_{28}}$, в расчет R'_m не входят)

где R'_m – базовый индекс устойчивости горной выработки, который не учитывает факторов техногенного влияния на устойчивость ширины пролета выработки, на выработку других выработок и способа проведения выработки;

R_{mp_i} – индекс природных составляющих, влияющих на устойчивость горной выработки отдельного параметра, показателя или фактора;

R_{mt_i} – индекс техногенного влияния на устойчивость выработки отдельного параметра, показателя или фактора;

K_{VP_i} – коэффициент влияния K_{VP_i} по параметру, показателю или фактору (природная составляющая);

K_{VT_i} – коэффициент влияния K_{VT_i} по параметру, показателю или фактору (техногенное влияние);

$K_{VT_{24}}$ – коэффициент влияния ширины пролета выработки по индексу $R_{mt_{24}}$;

$K_{VT_{27}}$ – коэффициент влияния на выработку других выработок по индексу $R_{mt_{27}}$;

$K_{VT_{28}}$ – коэффициент влияния способа проходки выработки по индексу $R_{mt_{28}}$;

i – порядковый номер индекса.

Диапазон оценки индекса R_m изменяется от 0 до 1 и представляет собой пять категорий устойчивости подземных горных выработок (табл. 1). По значению индекса R_m выбирается категория устойчивости выработки, согласно которой определяются тип и параметры крепи [2, 3].

Таблица 1

Категории устойчивости подземных горных выработок по индексу R_m

Диапазон индекса R_m	Категория устойчивости	Оценка состояния устойчивости	Характеристика состояния устойчивости
1	2	3	4
$1 \div 0,8$	I	Очень устойчивое	Деформации и смещения отсутствуют, массив сохраняет целостность.
$0,8 \div 0,6$	II	Устойчивое	Локальные нарушения, затухающие деформации. Начальная стадия формирования зоны неупругих деформаций. Деформации пород носят затухающий характер.
$0,6 \div 0,4$	III	Средне-устойчивое	Распространение нарушений пород вглубь массива. Развитие зон неупругих деформаций, возможны локальные обрушения в ослабленных зонах.
$0,4 \div 0,2$	IV	Неустойчивое	Значительные смещения контура выработки, слабо затухающие деформации.
$0,2 \div 0$	V	Очень неустойчивое	Критическое развитие зон разрушения, незатухающие деформации. Смещения свободного (или при малом отпоре крепи) контура выработки носят слабо затухающий и незатухающий характер.

Факторы, определяющие устойчивость подземных горных выработок, допустимые типы и параметры крепи классифицируются на шесть групп, включающие природные (неуправляемые) и техногенные (горнотехнически управляемые).

К природным управляемым факторам относятся группы: физико-механические свойства горных пород; качество породного массива и состояние трещиноватости.

К природным факторам, определяющим естественное состояние массива горных пород, относятся:

- пространственная ориентация, частота, протяженность основных систем трещин в массиве, характеристики сопротивления сдвигу по поверхностям ослабления [4];

- наличие крупных тектонических нарушений;
- обводненность массива;
- склонность пород к выветриванию;
- температурный режим;
- физико-механические свойства;
- глубина заложения выработок;
- характер природного напряженного состояния массива.

Природные неуправляемые факторы участвующие в определении устойчивости горных выработок представлены в таблице 2.

К техногенным горнотехнически управляемым факторам относятся группы: геометрические параметры выработки и ориентации трещин; горное давление и способ проведения выработки.

К техногенным горнотехнически управляемым факторам, определяющим категорию устойчивости выработок, относятся:

- форма и параметры (размеры) выработок;
- взаимное расположение выработок;
- назначение и срок службы выработок;
- направления проходки выработок;
- способы проведения и обеспечения устойчивости выработок;
- тип применяемых крепей и их характеристики;
- способ управления состоянием массива (горным давлением) при ведении очистных работ, очередность и порядок отработки запасов.

Техногенные горнотехнически управляемые факторы участвующие в определении устойчивости горных выработок представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры, показатели или факторы в рейтинговой классификации оценки устойчивости подземных горных выработок по индексу R_m

Название группы	Параметр, показатель или фактор	Индекс природного неуправляемого влияния на устойчивость горной выработки отдельного параметра, показателя или фактора R_{mp_i}	Коэффициент влияния K_{VP_i} природных неуправляемых параметров, показателей или факторов
1	2	3	4
1. Физико-механические свойства горных пород	Прочность горной породы на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ в образце, МПа	R_{mp_1}	0,12
	Сцепление в массиве C , МПа	R_{mp_2}	0,1
	Угол внутреннего трения в массиве φ , град.	R_{mp_3}	0,1
2. Качество породного массива	Показатель качества породного массива RQD, %	R_{mp_4}	0,09
	Модуль трещиноватости (частота трещиноватости FF), тр./м.	R_{mp_5}	0,06
	Модуль кусковатости, кс./пог. м	R_{mp_6}	0,04
	Выход керна, %	R_{mp_7}	0,02
	Коэффициент структурного ослабления $K_{с.д}$	R_{mp_8}	0,04
	Геологический индекс прочности GSI	R_{mp_9}	0,06
3. Состояние трещиноватости	Расстояние между трещинами I_{A2} , мм	$R_{mp_{10}}$	0,03
	Шероховатость поверхности стенок трещин I_{A41}	$R_{mp_{11}}$	0,02

продолжение таблицы 2

1	2	3	4
	Длина трещин l_{A42} , м	R_{mp11}	0,02
	Раскрытие трещин l_{A43} , мм	R_{mp12}	0,03
	Заполнитель трещин l_{A44} , мм	R_{mp14}	0,02
	Измененность стенок трещин l_{A45}	R_{mp15}	0,02
	Обводненность пород выработки l_{A5}	R_{mp16}	0,02
	Показатель количества систем трещин l_n	R_{mp17}	0,01
	Показатель шероховатости поверхности стенок трещин l_r	R_{mp18}	0,01
	Показатель измененности (выветрелости) трещин l_a	R_{mp19}	0,01
	Показатель присутствия воды в трещинах l_w	R_{mp20}	0,02
4. Геометрия выработки и ориентации трещин	Влияние ориентации трещин на устойчивость выработки l_B	R_{mt21}	0,03
	k_a - коэффициент влияния угла залегания пород и направления проходки выработки относительно простирания пород или основных плоскостей трещиноватости	R_{mt22}	0,03
	k_B - коэффициент направления смещения пород со стороны кровли и почвы выработки или со стороны боков выработки	R_{mt23}	0,02

продолжение таблицы 2

1	2	3	4
	Фактор, учитывающий ширину (пролет) выработки B , м	$R_{mt_{24}}$	
	Фактор, учитывающий угол падения плоскости обнажения выработки, град.	$R_{mt_{25}}$	0,02
5. Горное давление	Фактор напряженного состояния массива $\sigma_{сж}/\sigma_{max}$	$R_{mt_{26}}$	0,06
	Фактор, учитывающий воздействия на выработку других выработок	$R_{mt_{27}}$	
6. Способ проведения выработки	Фактор, учитывающий способ проведения выработки	$R_{mt_{28}}$	
Суммарный коэффициент влияния K_V			1

Оценка устойчивости горизонтальных, наклонных и вертикальных выработок по базовому индексу R'_m рассчитывается как по одному выбранному параметру, показателю или фактору из каждой группы, так и по нескольким параметрам из каждой группы.

Факторы внутри групп могут заменять друг друга. При выборе факторов предпочтение следует отдавать параметрам с максимальным весом в группе представленным в табл. 2. Допускается использование других факторов с меньшим весом при условии сохранения общей структуры оценки.

Минимальный набор для оценки устойчивости подземной горной выработки или ее участка по индексу R_m в конкретных горно-геологических и горнотехнических условиях рудника включает 9 ключевых параметров:

- индекс R_{mp_1} – прочность горной породы на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ в образце, МПа (коэффициент влияния $K_{VP1}=0,12$);

- индекс R_{mp_4} – показатель качества породного массива RQD, % (коэффициент влияния $K_{VP4}=0,09$);

- индекс $R_{mp_{11}}$ – показатель шероховатости поверхности стенок трещин J_{A41} (коэффициент влияния $K_{VP11}=0,02$);

- индекс $R_{mp_{14}}$ – показатель заполнителя трещин J_{A44} (коэффициент влияния $K_{VP14}=0,02$);

- индекс $R_{mp_{20}}$ – показатель присутствия воды в трещинах J_w (коэффициент влияния $K_{VP20}=0,02$) или индекс $R_{mp_{16}}$ – показатель обводненности пород выработки J_{A5} (коэффициент влияния $K_{VP16}=0,02$);

- индекс $R_{mt_{21}}$ – влияние ориентации трещин на устойчивость выработки J_B (коэффициент влияния $K_{VT21}=0,03$) или индекс $R_{mt_{22}} - k_\alpha$ - коэффициент влияния угла залегания пород и направления проходки выработки относительно простирания пород или основных плоскостей трещиноватости (коэффициент влияния $K_{VT21}=0,03$);

- индекс $R_{mt_{24}}$ – фактор, учитывающий ширину (пролет) выработки b через коэффициент влияния $K_{VT_{24}}$, м;

- $R_{mt_{27}}$ – фактор, учитывающий воздействие на выработку других выработок через коэффициент влияния $K_{VT_{27}}$;

- $R_{mt_{28}}$ – фактор, учитывающий способ проведения выработки через коэффициент влияния $K_{VT_{28}}$.

Разработанные «Методические рекомендации...» на основе метода рейтинговой оценки устойчивости подземных горных выработок по индексу R_m позволяют проводить комплексную оценку горно-геологических условий проходки и поддержания выработок. Опытно-промышленное тестирование представленного метода и его корректировка с учетом индивидуальных условий разрабатываемых месторождений в 2025 году проводится на рудниках компаний Норильский никель, АЛРОСА, Полиметалл, СУБР, Евраз, рудниках Кумроч на Камчатке и Джеруй в Киргизии и др.

Список литературы

1. Еременко В.А., Лушников В.Н., Косырева М.А. Метод рейтинговой оценки устойчивости подземных горных выработок R_m // Горный журнал. – 2025. – № 1. – С. 9-19.
2. Марысюк В.П., Дарбинян Т.П., Сергунин М.П., Шиленко С.Ю. Реализация концепции совершенствования комплекса крепления горных выработок на рудниках ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» // Горная промышленность. – 2019. – № 3(145). – С. 10-13.
3. Еременко В.А., Айнбиндер И.И., Марысюк В.П., Наговицин Ю.Н. Разработка инструкции по выбору типа и параметров крепи выработок рудников Талнаха на основе количественной оценки состояния массива // Горный журнал. — № 12 — 2018. — С. 101-106.
4. Barton N., Lien R. and Lunde J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, Rock Mechanics, 6 (4): 183-236.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАССОПЕРЕНОСА В ГЕОСРЕДАХ РЕГУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ С КОНТРАСТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ

Назаров Л.А., Назарова Л.А.

ИГД СО РАН, г. Новосибирск

Введение. Захоронение газообразных отходов производства в геологических структурах, извлечение и промышленная утилизация метана угольных месторождений, заблаговременная дегазация подготавливаемых к выемке угольных пластов – при решении этих и многих других геомеханических и геотехнических задач необходима информация о транспортных свойствах углепородных массивов [1,2]. Последние могут иметь квазирегулярную слоистую структуру (рис. 1), фильтрационные свойства которой зачастую обладают выраженной анизотропией и зависят от напряжений [3]. Подавляющее большинство исследований транспортных характеристик таких объектов связаны с определением фильтрационно-емкостных свойств в направлении простирания слоев [4].

В работе теоретически обоснован метод определения проницаемости геоматериалов регулярно-блочной структуры при движении потока флюида вкрест простирания нарушений сплошности.



Рисунок 1 – Слоистый образец угля

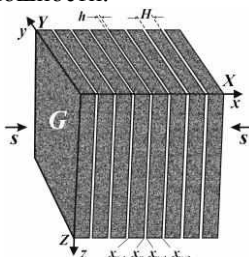


Рисунок 2 - Схема расчетной области

Схема эксперимента: постановка и решение задачи. Рассмотрим регулярно-блочную среду (рис. 2), состоящую из N блоков размерами $X \times Y \times H$, разделенных $N-1$ нарушением сплошности мощностью h ($h \ll H$). Массоперенос в области G описывается системой, включающей:

уравнение сохранения массы

$$(\text{фр})_t + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0; \quad (1)$$

закон Дарси

$$\vec{v} = -k\nabla p / \mu \quad (2)$$

и уравнение состояния

$$\rho / \rho_a = (p / p_a)^\gamma, \quad (3)$$

где ρ , p , $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$ и μ – плотность, давление, скорость и вязкость флюида, ρ_a – его плотность при атмосферном давлении p_a , γ – эмпирическая константа ($\gamma=0$ для воды; для газа, как правило, $\gamma=1$). На $\mathcal{E}\mathcal{G}$ сформулируем граничные условия, соответствующие условиям эксперимента

$$\begin{aligned} p(0, y, z) &= p_a, \quad p(X, y, z) = p_c, \\ v_y(x, 0, z) &= v_y(x, Y, z) = v_z(x, y, 0) = v_z(x, y, Z) = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

На внутренних границах G задаются условия равенства расходов

$$k_L \frac{\partial p(x_n, y, z)}{\partial x} = k_J \frac{p(x_n, y, z) - p(x_{n+1}, y, z)}{h} = k_L \frac{\partial p(x_{n+1}, y, z)}{\partial x}, \quad (5)$$

k_L и k_J – проницаемости блоков и межблочных нарушений, $n=1, \dots, 2N-3$, $x_{2i-1}=iH$, $x_{2i}=x_{2i-1}+h$ ($i=1, \dots, N-1$), $X_0=0$, $x_{2N-1}=X$.

При $\gamma=0$ система (1)–(5) имеет аналитическое стационарное решение $p(x) = p_a + (p_c - p_a)[P_{2i} + (P_{2i+1} - P_{2i})(x - x_{2i})/H]$

если $x_{2i} \leq x \leq x_{2i+1}$,

$P_{2i} = i(a+1)/D$, $P_{2i+1} = P_{2i} + a/D$, $1 \leq i \leq N-2$, $P_0=0$, $P_{2N-1}=1$, $D=N(a+1)-1$

Тогда расход на выходе рассчитывается по формуле

$$Q = Q_0 f(a), \quad f(a) = a/D \quad (6)$$

где $Q_0 = YZk_L(p_c - p_a)/\mu H$ – расход через одиночный блок, $a = k_J H / k_L h$. На рис. 3 показана функция f для различного числа блоков N . Можно видеть, что при возрастании a блочный образец ведет себя как однородная среда.

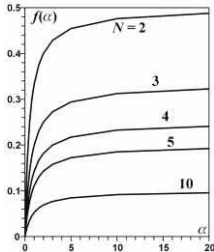


Рисунок 3 – Относительный расход флюида через образец при различном числе блоков N

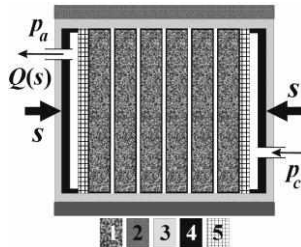


Рисунок 4 – Фильтрационные испытания: 1) образец; 2) камера; 3) изолирующая манжета; 4) плиты для передачи нагрузки; 5) перфорированные пластины

Таким образом, проведя при различном напряжении s фильтрационные испытания по схеме, представленной на рис. 4, и зарегистрировав расход $Q(s)$ на выходе из образца, можно по (6) найти эмпирическое соотношение для «поперечной» проницаемости нарушения сплошности

$$k_j(s) = k_L \frac{h(s)}{H} \frac{(N-1)Q(s)}{Q_0 - NQ(s)},$$

если предварительно определить «собственную» проницаемость блоков k_L и зависимость раскрытия нарушения h от нормального напряжения s .

Деформационные испытания блочных образцов. Из полноразмерного керна песчаника были изготовлены 14 пластин размерами 65×75×10 мм и три цилиндрических образца (диаметр 30 мм, высота 60 мм). Последние испытаны по стандартной методике с определением модуля Юнга $E=915$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu=0,27$ и проницаемости $k_L=1,38$ Д. Блочные образцы компоновались из набора пластин (от 4 до 7) и испытывались по предложенной в [4] схеме (рис. 5): проводилось нагружение и при заданном напряжении s регистрировалось изменение высоты образца U (табл. 1), по которому определялись константы $u_0=18$ мкм и $s_0=0,118$ МПа в эмпирических зависимостях

$$u(s)=u_0s/(s+s_0), \quad h(s)=u_0s_0/(s+s_0),$$

где $u=u_0h$ - сближение берегов нарушения сплошности.

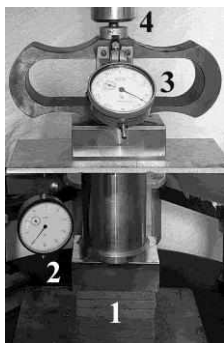


Рисунок 5 - Деформационные испытания: 1) блочный образец; 2) микрометр; 3) динамометр; 4) шток пресса

Таблица 1
Результаты деформационных испытаний образца из 4 пластин

s МПа	U мкм	$u(s)$ мкм	$h(s)$ мкм
0.16	40	10.35	7.65
0.32	50	13.15	4.86
0.48	70	14.45	3.56
0.80	80	15.69	2.32
0.96	90	16.03	1.61
1.20	100	16.39	1.61
1.60	120	16.77	1.24
1.76	130	16.87	1.13
2.00	140	17.00	1.01

Заключение. Разработана схема и теоретически обоснован эксперимент, позволяющий определить зависимость от нормальных напряжений фильтрационных характеристик межблочных нарушений сплошности при массопереносе вкрест простирания последних.

Работа выполнена в рамках проекта НИР (номер гос. рег. 124020700085-5).

Список литературы

1. Забурдяев В.С., Малинникова О.Н., Трофимов В.А. Метанообильные шахты: добыча угля, газовыделение, метановая опасность. Калуга: Манускрипт. 2020. 334 с.
2. Flores R.M., Moore T.A. Coal and Coalbed Gas. 2nd Edition. Elsevier Science. 2024.
3. Назаров Л.А., Голиков Н.А., Скулкин А.А., Назарова Л.А. Метод экспериментального определения деформационных и фильтрационных характеристик горных пород регулярно-блочной структуры. ГИАБ. 2023. №11. С. 70–81.
4. Wagner A., Eggenweiler E., Weinhardt F. et al. Permeability estimation of regular porous structures: A benchmark for comparison of methods. Transport in Porous Media. 2021. V. 138(6). P. 1–23.

УДК 622.765.061

ПРИМЕНЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРОВ В КАЧЕСТВЕ СЕЛЕКТИВНЫХ РЕАГЕНТОВ В ПРОЦЕССЕ ФЛОТАЦИИ ЦВЕТНЫХ И БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Гетман В.В., Каркешкина А.Ю.

ИПКОН РАН, г. Москва

Отечественные предприятия, перерабатывающие руды благородных, цветных и редких металлов применяют в основном классический подход при выборе реагентных режимов и крайне редко используют селективные собиратели и модификаторы для избирательного извлечения ценных металлов, что приводит к значительным (10-15% и более) потерям цветных и благородных металлов с хвостами обогащения.

Расширение ассортимента отечественных флотационных реагентов избирательного действия является актуальной задачей.

В ИПКОН РАН предложен и научно обоснован новый класс флотационных реагентов – термочувствительные полимеры с функциональными группами на благородные металлы для флокуляции и флотации тонкоизмельченных фракций, которые в обычных условиях теряются с хвостами обогащения [1-3]. В настоящее время перспективным направлением в области исследования термочувствительных полимеров является варьирование их свойств путем введения дополнительных функциональных групп методом твердофазной модификации [4].

В основе твердофазного модифицирования лежат химические реакции, в которых, хотя бы один из реагентов находится в виде твердого вещества. Реакции широко используются в технологии производства керамики, огнеупоров, люминофоров, ферритов, и многих других материалов для различных отраслей современной техники. Т.о. метод позволяет получать продукты химического синтеза взаимодействием твёрдых реагентов без участия растворителей.

В качестве водорастворимого полимера в работе использовали неионный, нетоксичный, водорастворимый, термочувствительный и биосовместимый полимер - поливинилкапролактam (ПВК). Он содержит гидрофильные карбоновые и амидные группы и гидрофобную углеродную (винильную) основу. Для получения селективных реагентов по отношению к цветным и благородным металлам проведена модификация ПВК морфолиндитиокарбаматом (ПВКмдтк) и тиомочевинной (ПВКтм) методом твердофазного модифицирования.

Изучены флокулирующие свойства модифицированных полимеров и определена температура фазового перехода. Методами лазерной и растровой электронной микроскопии идентифицирована адсорбция модифицированных полимеров на золотосодержащих сульфидах.

Технологические свойства модифицированных полимеров (ПВКмдтк и ПВКтм) изучены на бедной руде Находкинского рудного поля, хвостах Солнечного ГОКа и руде Олимпиадинского месторождения.

На рисунке представлены результаты флотации руды Находкинского рудного поля. В качестве основного собирателя применяли бутиловый ксантогенат калия (БКК) – 10 г/т. При введении ПВКмдтк (10 г/т) в качестве дополнительного реагента к БКК максимальное извлечение меди составило 92,2%, золота 86,8%. При этом качество концентрата по меди увеличилось на 0,6%, по золоту на 0,66 г/т. Увеличение расхода ПВКмдтк до 20 г/т позволило повысить качество концентрата по меди и золоту на 0,8% и 0,9 г/т соответственно, по сравнению с применением одного БКК при незначительном снижении извлечения.

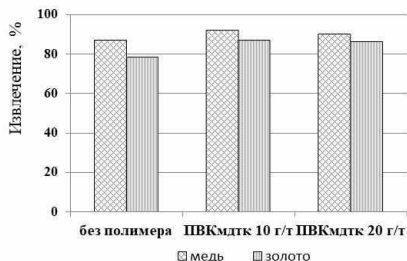


Рисунок – Гистограмма зависимости извлечения Си и Au при флотации руды Находкинского рудного поля

На золотосодержащей Олимпиадинской руде установлено, что применение ПВК_{тм} в качестве дополнительного реагента к БКК повышает технологические показатели флотации (таблица).

Таблица

Технологические показатели флотации золотосодержащей руды Олимпиадинского месторождения

Реагентный режим	Продукт	Выход, %	Содержание Au, г/т	Извлечение Au, %
1	2	3	4	5
БКК 200 г/т	концентрат	11,49	19,92	81,14
	хвосты	88,51	0,60	16,86
	исходная руда	100,00	2,82	100,00
БКК 200 г/т ПВК _{тм} 20 г/т	концентрат	9,00	29,47	93,88
	хвосты	91,00	0,19	6,12
	исходная руда	100,00	2,83	100,00
БКК 200 г/т ПВК _{тм} 30 г/т	концентрат	9,05	29,36	95,11
	хвосты	90,95	0,15	4,89
	исходная руда	100,00	2,79	100,0

В базовом опыте при применении БКК (200 г/т) получен концентрат с содержанием золота 19,92 г/т и извлечением 81,14%. Применение ПВК_{тм} 10-30 г/т совместно с БКК (200 г/т) позволило улучшить качество концентрата на 8,66 – 9,55 г/т по содержанию золота и повысить извлечение золота на 12,74–14,39%.

Применение модифицированных термочувствительных полимеров (ПВК_{тм} и ПВК_{мдтк}) в качестве дополнительных реагентов к БКК при флотации сульфидных руд и хвостов обогащения, содержащих цветные и благородные металлы, позволит получать более высококачественные концентраты и сократить потери ценных металлов в хвостах с тонкими фракциями.

Список литературы

1. Чантурия В.А., Недосекина Т.В., Иванова Т.А., Гетман В.В., Недосекин Д.А. Способ извлечения цветных и благородных металлов Патент РФ № 2390382 опубли. 27.05.2010 г.
2. Chanturia VA., Matveeva TN., Ivanova TA., Getman VV. Mineral processing and extractive metallurgy review 2016(37)3 p. 187-195
3. Матвеева Т.Н., Чантурия В.А., Гапчич А.О. Извлечение тонкодисперсных микро- и наночастиц золота с применением термоморфного полимера с функциональной группой дифенилфосфина ФТПРПИ. – 2017. – №3. – С. 131-140.
4. Денисова Э.И., Карташов В.В., Рычков В.Н. Твердофазный Синтез Металлооксидных Порошков: учебно-методическое пособие / Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2008. 31 с.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ В ЗОНАХ ВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ, КАК УСЛОВИЕ РЕАЛИЗАЦИИ СТРАТЕГИЧЕСКИХ НАЦИОНАЛЬНЫХ ПРИОРИТЕТОВ

Милетенко Н.А.

ИПКОН РАН, г. Москва

Предложена система мер по предотвращению прорывов воды в горные выработки, охране водных объектов и окружающей среды при освоении недр.

Одним из 9-ти направлений обеспечения национальной безопасности и устойчивого развития Российской Федерации (п.26 Указа Президента РФ от 2.07.2021 № 400) определены экологическая безопасность и рациональное природопользование, к числу которых относится эффективное безопасное освоение недр, охрана водных объектов, находящихся в районе влияния добычных работ и обеспечение экологической составляющей при этом. Решению данного комплекса вопросов уделяется особое внимание, основанное, в первую очередь, на анализе процессов, происходящих в массиве горных пород при освоении недр вблизи водных объектов. Следует также учитывать, что возможный вред, наносимый водным объектам, может превышать экономическую выгоду от освоения минеральных ресурсов.

Проникновение воды в горные выработки при освоении недр показывает, что основной причиной тому служат деформационные процессы, протекающие в подработанном массиве, которые способствуют развитию водопроводящих трещин в экранирующем слое до зон скопления воды. Прорыв воды в выработки также может произойти при недостаточной мощности водоупора, в результате пересечения горных работ с затопленной выработкой, не отмеченной на плане горных работ и других природно-техногенных факторах [1,2].

При ведении горных работ десятки и даже сотни тысяч кубометров воды могут скапливаться в погашенных и изолированных выработках, пустотах, трещинах, образовавшихся от обрушения и расслоения горных пород над выработанным пространством очистных забоев. Особую опасность представляют геологические нарушения. Сами по себе поверхностные водоемы и подземные места скопления воды, при соблюдении определенных требований и параметров работ не представляют опасности для шахт. Для проникновения и прорыва воды в шахту необходимо наличие гидравлической связи между местами скопления воды и действующими горными выработками. От характера этой связи,

расстояния от выработки до места скопления воды, объема и столба воды зависит величина поступления воды в виде притока или прорыв ее с затоплением выработок по водопроводящим трещинам [3,4].

Из анализа аварий видно, что наибольшее число несчастных случаев происходит при локальных прорывах воды объемом от 50 до 400 м³, например, из старых водосборников, ниш, камер. Такие локальные, неожиданные прорывы не приводят к затоплению, однако вместе с водой, вынесенным илом, угольной и породной мелочью вызывают заиливание механизмов, местных водоотливов. Образуются своеобразные гидрозатворы в мульдобразных частях выработок, тем самым прекращается проветривание и невозможно бывает воспользоваться вторым запасным выходом.

Особую остроту проблема прорыва воды в горные выработки действующих шахт приобретает при массовой ликвидации угольных предприятий, приводящей в некоторых случаях к катастрофическим последствиям, что связано с постоянным увеличением уровня воды в закрытых шахтах.

Обеспечение безопасного ведения горных работ требует развития системы мер по предотвращению прорывов воды, основой которых которых являются: – анализ и систематизация накопленных натурных данных по аномальному взаимодействию геомеханических и гидрогеологических процессов, а также по катастрофическим гидродинамическим явлениям на рудниках и шахтах; – выделение из числа анализируемых случаев нетипичных ситуаций и поиск эффективных решений предупреждения их развития; – аналитическое и численное моделирование условий развития техногенных водоносных трещин в массиве горных пород при определенных геодинамических, геомеханических и гидрогеологических условиях, изучение условий формирования природно-техногенного гидроразрыва массива пород в виде одиночных протяженных трещин и зон техногенного гидрогеологического расслоения массива; – моделирование качественного изменения флюидомиграционных свойств породы при переходе процесса деформирования породы в стадию запредельного деформирования, моделирование условий динамического разрушения гидроизолирующих целиков при изменении их флюидомиграционных свойств; – моделирование влияния геодинамических факторов на взаимодействие геомеханических и гидрогеологических процессов (величина и ориентация главных компонент природных напряжений, степень стесненности среды на границе рассматриваемой области исследования, деформационная и прочностная неоднородность массива); – разработка методики прогноза, контроля и предотвращения опасного взаимодействия геомеханических и гидрогеологических процессов с целью повышения безопасности горных

работ и уменьшения экологических последствий разработки полезных ископаемых [2].

Особого подхода требует решение вопроса охраны протяженных водных объектов на земной поверхности при освоении недр. С целью защиты земной поверхности от затопления необходимо в предохранительном целике непосредственно под водным объектом отработать лаву, параметры которой рассчитываются так, чтобы водный объект попал в зону сжатия и в толще пород не образовались сквозные водопроводящие трещины. В результате этих мероприятий оседание горных пород и водного объекта происходит на величину, при которой сохраняется естественная поверхность прибрежной зоны с наклоном в сторону водоема, при этом над барьерными целиками появятся лавы, образующие водозащитные дамбы [5].

Обеспечение безопасного ведения горных работ при подработке водных объектов, непосредственно водных объектов, а также экологического состояния регионов при освоении недр стратегически важная проблема, решение которой обеспечивается путем применения комплексного подхода инженерных методов, способов математического моделирования в комплексе решения геомеханических, гидрогеологических вопросов, а также флюидодинамики.

Список литературы

1. Трубецкой К.Н., Иофис М.А., Милетенко И.В., Милетенко Н.А., Одинцев В.Н. Проблемы комплексного гидрогеологического и геомеханического техногенного воздействия на геосреду. В сб. «Фундаментальные проблемы формирования техногенной среды». – Новосибирск: Изд. ИГД СО РАН, 2012, с.13-19.
2. Митишова Н.А. Милетенко Н.А. Негативное техногенное воздействие на недра при добыче полезных ископаемых // Вестник современной науки. – 2015.-№7-2(7). С.117-121.
3. Одинцев В.Н., Милетенко И.В., Милетенко Н.А. Геомеханическая оценка изменения гидрогеологических условий налегающих пород при скважинной гидродобыче железных руд. Маркшейдерия и недропользование. 2010 №5. С.51-54.
4. Одинцев В.Н., Милетенко И.В., Милетенко Н.А. Новый геомеханический подход к прогнозу опасных гидрогеологических процессов при подземной разработке твердых полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. - №7. – С.103-108.
5. К.Н. Трубецкой, М.А. Иофис, Б.Н. Поставнин, В.В. Грицков, Н.А. Митишова, А.А. Навитня Способ рекультивации деформированием земной поверхности береговой зоны водных объектов. Патент РФ №2206749 от 20.06.2003 г.

ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 622.012:556.3

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СВЯЗИ И ИХ РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ ШАХТ

Зозуля Я.Д., Касьяненко А.Л.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Донецкий национальный
технический университет», г. Донецк*

Аннотация. Статья посвящена анализу влияния ликвидации угольных шахт на гидрогеологическую безопасность района и воздействие этого процесса на деятельность действующих угледобывающих предприятий.

Введение. Несмотря на то, что угольная промышленность Донбасса всегда была ключевой отраслью экономики региона, сейчас она находится в глубоком кризисе. Количество действующих шахт в регионе ежегодно уменьшается, если в 2014 году на территории ДНР находилось 88 шахт, в 2019 году действующих шахт уже 18 [1], по состоянию на 2025 год добычу угля осуществляют порядка 9 шахт. Остальные предприятия переданы в Главное управление реструктуризации шахт ДНР, которое обеспечивает работу предприятий в режиме водоотлива до их передачи инвесторам [2]. К сожалению, большинство из переданных предприятий всё-таки будет ликвидировано введя своей не перспективности в инвестиционном плане.

Ликвидируемая шахта, помимо антропогенного воздействия на окружающую среду, оказывает влияние на работу действующих угледобывающих предприятий, гидравлически связанных с ней, ухудшая их гидрогеологическую обстановку. Гидрогеологические условия месторождения являются важным природным фактором, влияющим на технологию разработки, безопасность горных работ и технико-экономическую целесообразность эксплуатации.

Гидравлические связи между шахтами могут происходить по водоносным горизонтам, горным выработкам, по зонам тектонической нарушенности пород, а также вызванные технологическими ошибками [3]. Наиболее существенная гидравлическая связь между шахтами происходит

по сбойкам горными работами, пройденными в различное время с различными технологическими целями. Наилучшую сохранность и соответственно пропускную способность имеют капитальные и подготовительные выработки, но если они были пройдены давно и не поддерживались в рабочем состоянии, то могут оказаться заваленными, что ухудшает условия перетока воды между шахтами [4].

Для того, чтобы понять какое воздействие оказывает ликвидация шахт на действующие угольные предприятия, проведен ретроспективный анализ гидрогеологической обстановки шахтного поля шахты «Калиновская-Восточная».

В промышленном отношении поле шахты «Калиновская-Восточная» входит в состав Донецко-Макеевского района Донбасса. В административном отношении поле расположено на территории Горняцкого и Советского районов города Макеевки Донецкой Народной Республики.

Схема шахтных полей с указанием гидравлических связей по шахтам Советского и Горняцкого районов г. Макеевки приведена на рисунке.

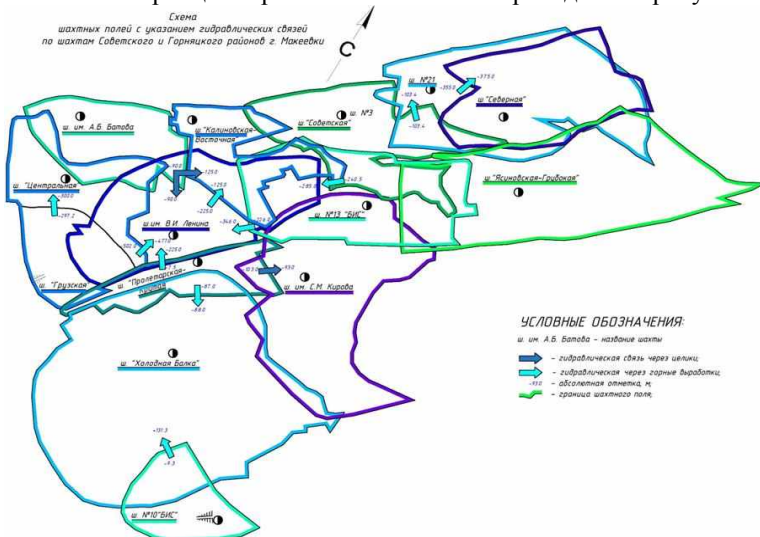


Рисунок – Схема шахтных полей с указанием гидравлических связей по шахтам Советского и Горняцкого районов г. Макеевки

Анализируя геологические отчеты поля шахты «Калиновская-Восточная», журналы учета замеров притоков воды в горные выработки, а также проекты затопления соседних шахт можно сделать вывод, что его гидрогеологическая обстановка постоянно ухудшалась. Водоотливной комплекс шахты «Калиновская-Восточная» принимает и откачивает более 50% водопритока, приходящего со стороны старых шахт. Эта

проблема актуальна и для других шахт района, так как каждая из современных шахт имеет гидросвязи до трех и более ранее существовавших.

В период наблюдений с 2014 по 2025 годы минимальный водоприток по шахте составлял 568 м³/час, максимальный – 813 м³/час. В настоящее время суммарный приток воды в горные выработки - 655 м³/час.

Шахта «Калиновская-Восточная» получает переток воды на западном откаточном штреке горизонта 440м в количестве – 152 м³/час и на порожняковом квершлагге горизонта 552м в количестве – 197 м³/час. Данный переток воды поступает с шахт им. А.Б. Батова, им. В.И. Ленина (старая) и «Ново-Калиново». Шахта «Калиновская-Восточная».

Заключение. Таким образом из-за закрытия и затопления горных выработок шахт, имеющих прямые или косвенные связи с шахтой «Калиновская-Восточная» ее гидрогеологическая обстановка постоянно ухудшалась. При этом приходилось принимать, технические решения по улучшению водоотливного комплекса, внедрять мероприятия, обеспечивающие безопасность ведения горных работ. Переток воды с соседних шахт многократно увеличил затраты на электроэнергию для откачки воды.

При этом глубокий анализ гидравлических связей между шахтами участка «Макеевка», расхода перетоков, периода затопления техногенных горизонтов ликвидированных шахт и инфраструктуры поверхности поможет определить оптимальную схему водоотливных комплексов на базе погружных насосных агрегатов, что обеспечит как гидрогеологическую безопасность действующих предприятий, так и минимизирует экологические риски для региона.

Список литературы

1. Попов, С.М. Экономическая оценка минерально-сырьевой базы Донбасса: состояние и перспективы / С.М. Попов, Э.А. Попова, И.Г. Тумоян // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – Москва, 2022. – №64(5). – С. 94-100. – DOI: 10.32454/0016-7762-2022-64-5-94-100.
2. Государственная поддержка угольной промышленности Луганской и Донецкой Народных Республик: состояние и тенденции развития / В.Я. Афанасьев, Е.А. Митрофанова, С.В. Чуев и др. // Уголь. – 2025. – № 1. – С. 45-52. – DOI: 10.18796/0041-5790-2025-1-45-52.
3. Гордиенко, М.В. Анализ существующих гидравлических связей при затоплении шахт г. Донецка // Гордиенко М.В., Артеменко П.Г./ Проблемы горного дела: сб. науч. тр. III Междунар. форума студентов, аспирантов и молодых ученых-горняков, г. Донецк, 6–7 апреля 2023 г. / Донецк: ДонНТУ, 2023. - С. 176-185
4. Петренко, Ю.А. О некоторых проблемах закрывающихся шахт // Петренко Ю.А., Ивашенко В.Д., Касьяненко А.Л., Зельдин Б.Б. / Проблемы

УДК 502.075.8

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СНИЖЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВЕ ПРИ БИОРЕМЕДИАЦИИ

Сарзу Н.Ю.

НИТУ МИСИС, г. Москва

Аннотация

Представлена разработка и применение лабораторной установки СТ-1443 для рекультивации почвы, загрязнённой тяжёлыми металлами, в частности свинцом. Эксперименты проводились с использованием биологических агентов – бактерий родов *Pseudomonas* и *Rhizobium* в комбинациях, направленных на повышение эффективности снижения содержания токсичных элементов в почвогрунте. Описана конструкция установки, методика проведения экспериментов, приведены результаты исследования и их интерпретация. Установка СТ-1443 показала высокую эффективность в создании устойчивых условий для функционирования микроорганизмов, способных участвовать в процессах биоремедиации.

Введение

Загрязнение почвы тяжёлыми металлами остаётся острой экологической проблемой, особенно в районах с интенсивной промышленной деятельностью. Свинец – один из наиболее токсичных элементов, оказывающих негативное влияние на здоровье человека и экосистемы. Традиционные методы рекультивации почвы зачастую являются затратными и малопродуктивными. Альтернативой выступают биотехнологические подходы, в том числе биоремедиация и фиторемедиация с участием специализированных микроорганизмов.

Для успешной реализации подобных методов требуется создание стабильной микробиологической среды в лабораторных условиях. Нами принята установка СТ-1443, которая была адаптирована для поддержания необходимых температурных параметров для выращивания бактерий определенного рода, что позволило обеспечить их жизнедеятельность в течение длительного времени и провести сравнительный анализ эффективности различных бактериальных комбинаций.

Обсуждение результатов

Для проведения эксперимента по использованию биологических агентов для снижения концентраций тяжелых металлов в почвах была использована установка СТ-1443 (рис. 1).

СТ-1443 — термоконтролируемая система с функцией таймера и подогрева, оснащённая следующими компонентами:

- углеродный греющий кабель;
- термостат;
- Arduino Nano ATmega328;
- таймер и реле;
- модули термодатчиков и дисплея TM1637;
- защитные цепи и блок питания на 12V (рис. 2).

Аппарат обеспечивает поддержание температуры в диапазоне 20–60°C с точностью до $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Отдельно проработана схема защиты в случае выхода датчика из строя, исключающая перегрев.



Рисунок 1 - Общий вид установки

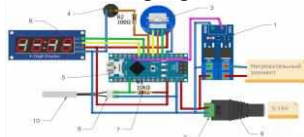


Рисунок 2 - Схема установки:

1 - углеродный греющий кабель, 2 - адаптер 12V 3A, 3 - термостат, 4 - реле времени, 5 - Arduino Nano ATmega328, 6 - дисплей TM1637, 7 - энкодер, 8 - блоки питания, 9 - мосфет модуль, 10 - термистор и пицалка (пассивная)

Методика эксперимента состояла в следующем. Были использованы 8 пробирок, содержащих по 100 г загрязнённого почвогрунта (влажность 50–70%). В четыре из них внесены бактерии рода *Pseudomonas* (*aeruginosa* + *chlororaphis*), в остальные четыре — смесь *Rhizobium leguminosarum*, *Bradyrhizobium japonicum*, *Trichoderma viride*, *Pseudomonas koreensis*, *Bacillus subtilis*.

Температура выдержки: 42°C; длительность — 7 суток. Измерения проводились с интервалом в 2 дня с помощью TDS-метра и микроскопа Sada.

В эксперименте рассматривались 2 группы биологических агентов:

1. *Группа PP (Pseudomonas)*: среднее содержание свинца уменьшилось с 70,4 до 12,4 мг/кг, в одном из случаев — с 66,5 до 11 мг/кг.

2. *Группа RTPBV* (комбинированная смесь *Rhizobium leguminosarum*, *Bradyrhizobium japonicum*, *Trichoderma viride*, *Pseudomonas koreensis*, *Bacillus subtilis*): среднее содержание свинца снизилось с 73,5 до 22 мг/кг, наилучший результат — 80,5 → 2 мг/кг.

Анализ эффективности использования биологических агентов проводился в 4 этапа, результаты отражены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Промежуточные результаты исследования

Название группы	Первый этап				Второй этап				Среднее значение
	1 проба	2 проба	3 проба	4 проба	1 проба	2 проба	3 проба	4 проба	
РР	64	72,5	66,5	80,5	18,2	25,5	31,3	25,6	48
РТПВВ	69,8	80,3	89,6	56,15	74	38	27,5	34,2	58,7

Было замечено, что *Pseudomonas* создаёт быстрый локальный эффект по выведению тяжелых металлов из почвы, но медленнее распространяется в ней. Комбинированная группа обеспечила более равномерное снижение концентрации металлов.

Таблица 2

Окончательный результат

Название группы	Третий этап				Четвертый этап				Среднее значение.
	1 проба	2 проба	3 проба	4 проба	1 проба	2 проба	3 проба	4 проба	
РР	16,3	21	17,5	18,3	8,4	4,1	11	2,7	12,4
РТПВВ	55,1	27,9	46,2	18,2	16,6	6,2	4,5	2	22

Анализ микробиологической активности биологических агентов показал, что в пробах РТПВВ отмечено высокое микробное разнообразие и устойчивость. Выявлена синергия между азотфиксирующими, антагонистическими и фитостимулирующими микроорганизмами, что положительно сказалось на биодоступности тяжёлых металлов и их перераспределении в почвенной матрице.

Заключение

Результаты эксперимента показали, что установка СТ-1443 эффективно обеспечивает стабильную среду для роста бактерий, способствующих биологической очистке почвы. Применение биологических агентов рода *Pseudomonas* показало их высокую локальную эффективность для снижения концентрации свинца, в то время как комбинированная смесь из пяти видов биологических агентов (*Rhizobium leguminosarum*, *Bradyrhizobium japonicum*, *Trichoderma viride*, *Pseudomonas koreensis*,

Bacillus subtilis) обеспечила более стабильное и глубокое восстановление почвы.

Таким образом, аппарат СТ-1443 может быть рекомендован для проведения лабораторных и пилотных исследований в области рекультивации почв и разработки устойчивых биотехнологических решений для борьбы с загрязнением тяжёлыми металлами, в том числе и для горнодобывающих регионов, а также при подземном строительстве.

Благодарности. *Исследования проведены в рамках написания диссертационной работы. Автор благодарит университет «МИСИС» и организацию «МИП-Строй №1» за содействие в проведении исследований.*

Список литературы

1. Спирина А.А. / Биоремедиация почв, загрязнённых тяжёлыми металлами / М.: Издательство: Оренбургский государственный университет. / 2022.
2. Климова Е.В. / Микробиологические аспекты биоремедиации почв и повышения качества продукции в условиях техногенеза. / Экологическая безопасность в апк. реферативный журнал, 12(3), 45-58. / 2006.
3. Кайгородова И.А., Дзюба Е.В., Федорова Л.И., Саловаров В.О. / Введение в гидробиологию: Том. Часть 3. Антропогенное загрязнение водоемов. Мониторинг и охрана водных систем. / Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, 24(4), 102-115. / 2019.
4. Филонов А.Е. / Микробные биопрепараты для очистки окружающей среды от нефтяных загрязнений в условиях умеренного и холодного климата. / Диссертация, 78-89. / 2016.
5. Захарова М.М., Юдин А.Г, Потапов И.И. / Достижения в области современных технологий и охрана окружающей среды. / Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, 18(2), 120-134. / 2022.

ПРОБЛЕМЫ ГЕОМЕХАНИКИ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

О ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗА ОСЕДАНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Кулибаба С.Б.

ИПКОН РАН, г. Москва

Изменение условий подземной разработки влечет за собой снижение точности прогноза деформаций земной поверхности, и, в частности, максимального оседания. Отметим, что эта проблема касается не только действующих, но и ликвидируемых шахт [1, 2]. Сопоставление их ожидаемых значений с фактическими, измеренными на целом ряде наблюдательных станций шахт Донбасса, показывает, что отношение этих величин изменяется в пределах от 0,25 до 1,37. На рис. 1 показаны графики оседаний земной поверхности на некоторых из них, где точками обозначены фактические величины оседаний, а пунктиром – ожидаемые, рассчитанные по нормативному документу [3] (L – удаление от начала профильной линии реперов). Обращает на себя внимание тот факт, что на графике *а* фактические оседания значительно меньше ожидаемых, а на графике *б* – наоборот, превышают их.

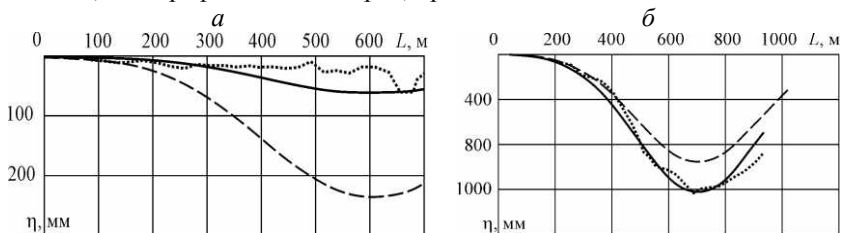


Рисунок 1 - Графики оседаний земной поверхности η , измеренных на натуральных наблюдательных станциях в Донбассе: *а* – шахта «Шахтерская-Глубокая» (г. Шахтерск), *б* – шахта им. А.Г. Стаханова (г. Димитров)

В формулу расчета максимального оседания согласно действующим методикам [3, 4] входит величина относительного максимального оседания q_0 , полученное на основе обобщения экспериментальных данных 60-х годов прошлого столетия. В состав расчетной формулы входили такие параметры, как крепость, объемный вес горных пород, а также предел их прочности на одноосное сжатие. Следует отметить, что при этом не учитывался ряд факторов, которые, как показывает практика,

также оказывают влияние на величину q_0 в изменившихся условиях разработки в современных угольных пластах условиях, и в первую очередь – значительно увеличившаяся за более, чем полвека, глубина ведения горных работ. В процессе исследований были сделаны выводы о влиянии на ее величину таких параметров, как отношение размера выработанного пространства разрабатываемого пласта к мощности, и относительная удаленность расчетной точки массива от разрабатываемого пласта в границах зоны полных сдвижений в одном из двух главных сечений мульды сдвижения [5], в котором размер выработанного пространства минимален. Однако, и в том, и в другом случае прочностные свойства горного массива отдельно не рассматривались, поскольку предполагалось, что они уже учтены нормативными значениями q_0 .

Подчеркнем, что величина относительного максимального оседания, как было упомянуто выше, определена для условий полной подработки. Однако, она же без изменения используется и для расчетов сдвижения при неполной подработке земной поверхности. Корректность такого подхода не является очевидной, поскольку значение q_0 определяется общим уплотнением всей толщи подработанных горных пород – от очистной выработки до земной поверхности.

На основе проведенного анализа нами были выделены основные факторы, ранее не учитываемые при определении q_0 , которые в современных условиях разработки могут влиять на ее значение: отношение размера выработанного пространства в разрабатываемом пласте к мощности неподрабатываемого междупластья, прочностные свойства горных пород первично подрабатываемого массива и кратность подработки земной поверхности. Для определения степени их влияния на точность прогноза нами было исследовано изменение коэффициента $k_{q0}=q_{0ф}/q_{0н}$, показывающего отношение фактических значений относительных максимальных оседаний $q_{0ф}$, полученных из результатов инструментальных наблюдений на двух десятках натуральных наблюдательных станций, заложенных в разное время на шахтах Донбасса, с нормативными $q_{0н}$ [3, 4], в зависимости от выделенных факторов:

$$k_{q_0} = U \left(\frac{D_{\min}}{F \cdot \Delta H}; \frac{H}{m} \right), \quad (1)$$

где $D_{\min}$ – меньший из двух размеров выработанного пространства пласта в главных сечениях мульды сдвижения, м; F – показатель прочности подрабатываемого горного массива – средневзвешенный коэффициент крепости подрабатываемых породных слоев; ΔH – мощность неподработанного междупластья; H – средняя глубина разработки, м; m – вынимаемая мощность пласта; U – некоторая функция, объединяющая данные факторы.

В результате статистического анализа были установлены вид и параметры зависимости (1):

$$k_{q_0} = 1 + c_1 \ln \left(\frac{D_{\min}}{F \cdot c_2 \cdot \Delta H} \right) \left(\frac{H}{m} \right)^{c_3}, \quad (2)$$

где $c_1 = 0,0128$; $c_2 = 0,266$; $c_3 = 0,485$ – эмпирические коэффициенты.

Коэффициент детерминации полученной зависимости превышает 0,8, что говорит о высокой тесноте связи прогнозных и фактических величин в исследованной выборке.

Учет дополнительных факторов значительно (в несколько раз) повышает точность прогноза сдвижений и деформаций земной поверхности. Так, на графиках оседаний (см. рис. 1), где сплошными линиями показаны прогнозные значения, рассчитанные предлагаемым способом, видно, что они более точно описывают кривые фактических величин.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлены ранее не учитываемые факторы, влияющие на величину относительного максимального оседания подрабатываемой земной поверхности. На основе анализа результатов натурных инструментальных наблюдений получена новая зависимость, позволяющая существенно повысить точность прогноза сдвижений и деформаций.

Список литературы

1. Кулибаба, С.Б. Натурные исследования вертикальных сдвижений подрабатываемого горного массива / С.Б. Кулибаба // Маркшейдерский вестник. – 2019. – № 1(128). – С. 46-51. – EDN TUANZU.
2. Дрибан, В.А. Оценка рисков провалообразования при затоплении угольных шахт / В.А. Дрибан, Б.В. Хохлов, А.В. Антипенко // Проблемы недропользования. – 2025. – № 1(44). – С. 65-77. – DOI 10.25635/2313-1586.2025.01.065.
3. Правила подработки зданий, сооружений и природных объектов при добыче угля подземным способом: ДСТУ 101.00159226.001-2003. – Донецк: УкрНИМИ, 2003. – 128 с.
4. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. – С.-Петербург, ВНИМИ, 1998. – 291 с.
5. Кулибаба С. Б. Прогноз сдвижений и деформаций подрабатываемого породного массива // Уголь Украины. – 2000. – № 1. – С. 41-43.

УДК:622.35

ТЕХНОЛОГИЯ ДЕГАЗАЦИИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

Леконцев Ю.М., Сажин П.В.

ИГД СО РАН, г. Новосибирск

В настоящее время на угольных шахтах Кузбасса, с целью повышения эффективности дегазации отработываемых пологих угольных пластов,

широко применяются различные стандартные технологии, представляющие собой, как правило, бурение сеток дегазационных скважин [1–7]. Однако, несмотря на реализацию профилактических мероприятий, повышающих безопасность ведения проходческих и очистных работ, остаточное метановыделение в горные выработки остается на опасном уровне, не редко превышающем требуемый по нормативным указаниям (Методические положения по выбору и применению новых технологий дегазации и управления метановыделением на угольных шахтах. Люберцы.: – ННЦ ГП – ИГД им. А.А. Скочинского, 2000, 116 с.). Это обстоятельство значительно сдерживает работу очистных механизированных комплексов. Кроме того, содержание метана и интенсивность его выделения в горные выработки растут с увеличением глубины отрабатываемых угольных пластов.

При расчете параметров сетки заложения дегазационных скважин на шахтах Кузбасса, в настоящее время пользуются известными выражениями (Разрушение горных пород. Санкт–Петербург.: ЛГИ им. Г.В. Плеханова, 1991, 92 с.). Однако, опыт ведения дегазационных работ по указанным методикам, показывает, что большая часть метана (~70%) остается в угольном массиве, и впоследствии поступает в очистной забой, что ведет не только к снижению рентабельности, но и к снижению безопасности и экономической эффективности. Этому есть несколько объяснений, в частности, небольшая площадь обнажения для выхода сорбированного метана, которая зависит от параметров буримых дегазационных скважин в угольном пласте (глубины, интервала, диаметра и т.д.), а также нарушение герметичности скважин, которое ведет к снижению концентрации газа в дегазационном трубопроводе вследствие подсоса атмосферного воздуха.

В последнее время технология гидроразрыва и различные ее модификации получают все более масштабное распространение на угольных шахтах Кузбасса для решения широкого спектра задач. Одним из лидеров в данном направлении исследований является ИГД СО РАН им. Н.А. Чинакала, в котором накоплен значительный опыт в этой сфере, разработана и запатентована линейка образцов нового оборудования и технологических решений [8–10]. К ним в частности относятся конструкции для нарезания иницирующих полостей на стенках скважин и герметизирующие устройства, являющиеся основой для проведения как одноуровневых, так и многоуровневых – поинтервальных гидроразрывов.

На шахте «им. С.Д. Тихова» впервые были проведены экспериментальные работы по дегазации угольного пласта методом поинтервального гидроразрыва. Применение этой технологии из скважин, пробуренных из подземных горных выработок приводит к образованию в пласте

многочисленных, равномерно распределенных искусственных трещин и более полному раскрытию естественных. Известно, что выделение сорбированного метана прямо пропорционально обнажаемой (открытой) поверхности угля. Следовательно, увеличивая площадь обнажения угля посредством гидроразрыва пласта, увеличивается его метаноотдача.

В соответствии с горно-геологическими условиями залегания угольного пласта 23 (система отработки – длинными столбами по простиранию; глубина ведения работ – 200 м; угол падения пласта – от 2° до 8°; мощность пласта – 1,2 м) разработана схема (рис. 1) заложения дегазационных скважин диаметром 76 мм на экспериментальном участке пласта.

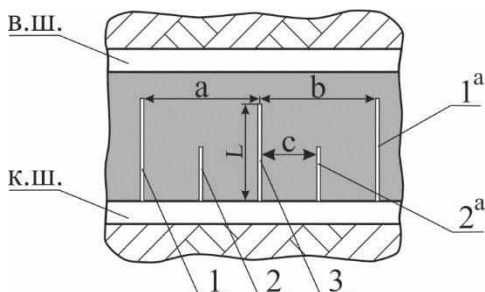


Рисунок 1 - Схема расположения скважин при проведении шахтных исследований. 1, 1^а – типовые скважины длиной 200 м; 2, 2^а – контрольные скважины длиной 75 м; 3 – экспериментальная скважина длиной 185 м; a, b, c – расстояния между скважинами, соответственно равные 16 м, 24 м и 8 м

Параллельно основным дегазационным скважинам были пробурены экспериментальные скважины (поз. 3 рис. 1) и контрольные (поз. 2 и 2^а рис. 1). Из экспериментальных скважин 3, по всей длине, были выполнены гидроразрывы с интервалом в 20–30 метров.

В ходе проведения шахтных экспериментов исследователи столкнулись с проблемой, которая заключается в следующем: угли, образующие пласт 23 представляют собой горную породу прочностью 10–15 МПа на сжатие, что ставит их в ряд слабойустойчивых. Это обстоятельство приводит к тому, что после бурения дегазационных скважин и извлечения бурового инструмента, через короткий промежуток времени стенки скважин начинают деформироваться и осыпаться и, если работы по поинтервальному гидроразрыву не производятся в течение 1–1,5 часа, то форма просвета искажается настолько, что досылка герметизатора становится сильно затрудненной, а в некоторых случаях – невозможной.

Лабораторные исследования подтвердили предположение о слабой устойчивости угля, образующего пласт 23, о чем свидетельствует тот

факт, что буровая мелочь заполняет до 50% объема скважины, а ее стенки имеют значительные нарушения.

По результатам исследований было сделано заключение о том, что для перемещения пакера по скважине необходима специальная конструкция – фонарь или расштыбовщик (рис. 2), позволяющая проходить нарушенные участки скважины.

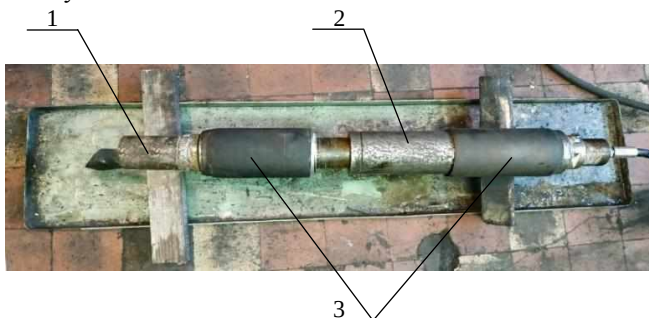


Рисунок 2 - Внешний вид герметизирующего устройства с расштыбовщиком. 1 – фонарь (расштыбовщик); 2 – гидравлический поршень; 3 – уплотнительные элементы

Введение в конструкцию герметизатора нового элемента – фонаря позволило значительно увеличить глубину доставки устройства в дегазационную скважину. В ходе экспериментальных шахтных экспериментов, таким модернизированным устройством, была достигнута максимальная глубина проведения гидроразрыва – около 180 м.

Список литературы/References:

1. Пармузин П.Н. Зарубежный и отечественный опыт освоения ресурсов метана угольных пластов. Ухта.: УГТУ, 2017, 109 с. [Parmuzin P.N. Foreign and domestic experience in the development of coalbed methane resources. Ukhta.: UGTU, 2017, 109 p.]
2. Рубан А.Д., Забурдяев В.С., Забурдяев Г.С. и др. Метан в шахтах и рудниках России: прогноз, извлечение и использование. М.: ИПКОН РАН, 2006, 312 с. [Ruban A.D., Zaburdyaev V.S., Zaburdyaev G.S., etc. Methane in mines and mines of Russia: forecast, extraction and use. M.: IPKON RAS, 2006, 312 p.]
3. Lu S., Cheng Y., Ma J. and Zhang Y. Application of in-seam directional drilling technology for gas drainage with benefits to gas outburst control and greenhouse gas reductions in Daning coal mine, China, Nat Hazards. 2014. Vol. 73, No.3, p. 1419–1437.
4. Gray I., Zhao X., Liu L. Mechanical properties of coal measure rocks containing fluids at pressure, Coal Operators' Conf., Wollongong, Australia. 2018. p. 195–204.

5. Курта И.В. Методы и схемы дегазации угольных пластов. Ухта: УГТУ, 2015, 35 с. [Kurta I.V. Methods and schemes of degassing of coal seams. Ukhta: UGTU, 2015, 35 p.]

6. Пучков Л.А. Извлечение метана из угольных пластов. М.: МГТУ, 2002, 383 с. [Puchkov L.A. Extraction of methane from coal seams. Moscow: MGSU, 2002, 383 p.]

7. Mills K., Jeffrey R., Black D., Meyer T., Carey K., and Goddard S. Developing methods for placing sand-propped hydraulic fractures for gas drainage in the bully seam, In: Underground Coal Operators' Conference, Wollongong, Australia, 2006. p. 190-199.

8. Сердюков С.В., Патутин А.В., Шилова Т.В., Азаров А.В., Рыбалкин Л.А. Технологии повышения эффективности разработки твердых полезных ископаемых с использованием гидроразрыва горных пород. ФТПРПИ, 2019, №4, с. 90–97. [Serdyukov S.V., Patutin A.V., Shilova T.V., Azarov A.V., Rybalkin L.A. Technologies for improving the efficiency of developing solid minerals using hydraulic fracturing of rocks. FTPRPI, 2019, №4, pp. 90-97.]

9. Ушаков С.Ю., Леконцев Ю.М., Сажин П.В., Мезенцев Ю.Б. Теоретическое обоснование дебита метана из угольного пласта после гидроразрыва. Уголь, 2022, №5(1154), с. 72–75. [Ushakov S.Yu., Lekontsev Yu.M., Sazhin P.V., Mezentsev Yu.B. Theoretical substantiation of methane flow rate from a coal seam after hydraulic fracturing. Coal, 2022, №5(1154), pp. 72-75.]

10. Леконцев Ю.М., Сажин П.В., Новик А.В., Мезенцев Ю.Б. Расчет дебита метана при гидроразрыве угольных пластов. ФТПРПИ, 2021, №4, с. 63 – 69. [Lekontsev Yu.M., Sazhin P.V., Novik A.V., Mezentsev Yu.B. Calculation of methane flow rate during hydraulic fracturing of coal seams. FTPRPI, 2021, №4, pp. 63-69.]

УДК 550.8.013

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОБЪЕМОВ ПЕРЕТОКА ВОДЫ МЕЖДУ ШАХТАМИ С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Долгих В.П., Кныш А.С.

ФГБОУ «ДонГТУ», г. Алчевск

Затопление закрытых угольных шахт в бассейне р. Белая Луганской Народной Республики (ЛНР) вызывает фильтрацию шахтных вод через барьерные целики, что влияет на поверхностный сток малых рек, качество воды и экосистемы. Переток подземных вод через разделительные целики является критическим фактором при проектировании мер охраны и оценке экологических рисков. Существующие методики расчета расхода воды (Q_1 – Q_4) основаны на упрощенных аналитических моделях,

не учитывающих стохастическую природу фильтрационных параметров (трещиноватость, фильтрация, геометрия целиков) [1-3]:

$$Q_1 = \frac{k \cdot \Delta H^2}{2 \cdot d}, \text{ м}^3/\text{сутки}, \quad (1)$$

$$Q_2 = \frac{k \cdot M \cdot \Delta H^2}{2 \cdot d}, \text{ м}^3/\text{сутки}, \quad (2)$$

$$Q_3 = \frac{k \cdot M \cdot \Delta H \cdot L}{d}, \text{ м}^3/\text{сутки}, \quad (3)$$

$$Q_4 = k \cdot d \cdot \frac{\Delta H}{L}, \text{ м}^3/\text{сутки}, \quad (4)$$

где Q – удельный расход перетекания вод, $\text{м}^3/\text{сутки}$; k – коэффициент фильтрации, $\text{м}/\text{сутки}$; ΔH – разница отметок на расчетном участке, м ; d – ширина барьерного целика, м ; M – высота зоны водопроводящих трещин над выработанным пространством на расчетном участке, м ; L – длина расчетного участка барьерного целика, м .

При рассмотрении водосборной территории р. Белая, под частью которой находятся выработки ликвидированных шахт, предлагается необходимо учитывать зоны водопроводящих трещин, которые образуются в барьерных целиках при перманентном давлении толщи земли и водопритока. Оценить вклад трещин в общую фильтрацию можно по следующей формуле:

$$k_m = \frac{b^3}{12 \cdot s} \quad (5)$$

где b – среднее раскрытие трещин, м ; s – среднее расстояние между трещинами, м .

Учет фильтрационных параметров отражен в следующей формуле:

$$Q_5 = \frac{(k + k_m) \cdot M \cdot \Delta H \cdot L}{d}, \text{ м}^3/\text{сут}, \quad (6)$$

В данной работе для анализа неопределенностей применен метод Монте-Карло, позволяющий интегрировать вариативность ключевых характеристик массива и оценить устойчивость результатов. Для каждой из пяти моделей (Q_1 – Q_5) выполнено 10000 итераций (рисунок), а также получено распределение объемов перетока для различных методик [1-3].

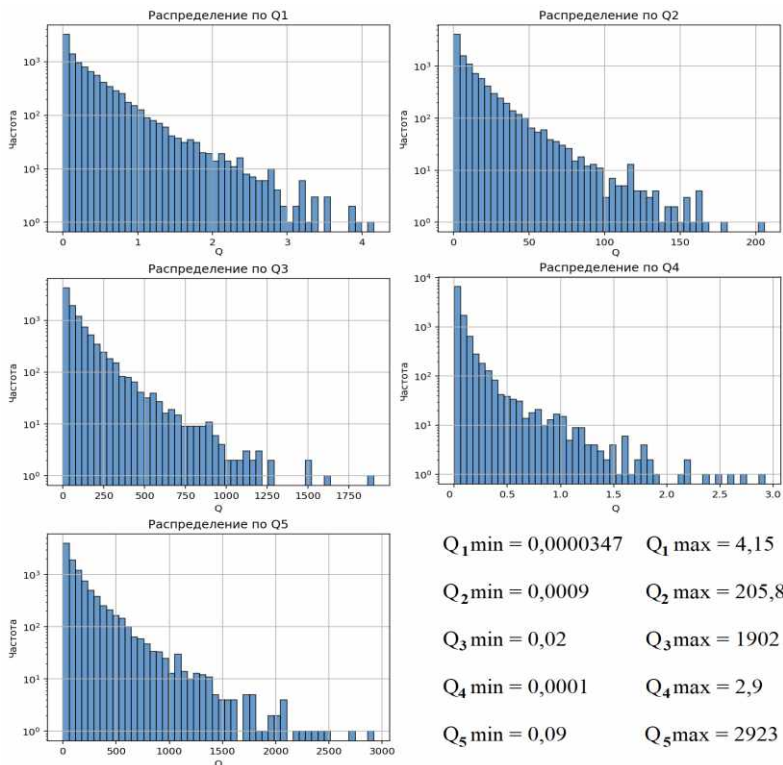


Рисунок – Распределение объема перетока

Модели Q_1 , Q_2 и Q_4 демонстрируют ограниченную область применения: максимальные значения перетока не превышают $100 \text{ м}^3/\text{сут}$, что противоречит данным натурных измерений на ряде шахт, где фиксировались объемы, на порядок выше [4]. Модель Q_3 , хотя и предсказывает более высокие значения ($Q_3 \max = 1902 \text{ м}^3/\text{сут}$), не учитывает влияние трещиноватости, что приводит к занижению медианных показателей ($51,5 \text{ м}^3/\text{сут}$).

Также анализировались 6 входных параметров, для каждого из которых в результате была получена регрессионная зависимость (таблица). Полученные уравнения дают оценку по влиянию рассматриваемого параметра на расход.

Таблица

Регрессионные зависимости в результате имитационного моделирования

№ п/п	Параметр	Диапазон значений	Регрессионная зависимость
1	коэффициент фильтрации (k), м/сут	10^{-3} - 10^{-2}	$Q_{(k)} = 66,5 + 15763k$, м ³ /сут
2	разница отметок (ΔH), м	1-100	$Q_{(\Delta H)} = -1,8 + 3,3\Delta H$, м ³ /сут
3	ширина барьерного целика (d), м	10-60	$Q_{(d)} = 364 - 5,67d$, м ³ /сут
4	высота зоны трещин (M), м	10-60	$Q_{(M)} = -4,7 + 4,8M$, м ³ /сут
5	длина участка фильтрации (L), м	10-500	$Q_{(L)} = 0,77 + 0,64L$, м ³ /сут
6	коэффициент фильтрации с учетом трещин (k_m), м/сут	10^{-7} - 10^{-1}	$Q_{(k_m)} = 93,8 + 17139k_t$, м ³ /сут

Выводы:

Метод Монте-Карло выявил ограничения упрощённых методик и обосновал адекватность формулы расчета расхода Q_5 для прогноза фильтрации в трещиноватых средах. Уравнение (6) учитывает влияние параметров трещин и фильтрационных свойств массива. Ее медианное значение (86,6 м³/сут) и широкий диапазон прогноза (0,09–2923 м³/сут) согласуются с опытными данными. Таким образом, учёт трещин в целиках критичен для точной оценки объемов возможного перетока, что особенно важно для малых рек региона. Модель Q_5 позволяет прогнозировать изменения водного баланса и разрабатывать стратегии управления водными ресурсами в подработанных районах.

Благодарности.

Исследования выполнены за счет средств федерального бюджета (код темы: FRRU-2024-0004 в ЕГИСУ НИОКТР).

Список литературы

1. Методические указания по оценке гидрогеологических условий ликвидации угольных шахт, обоснованию мероприятий по управлению режимом подземных вод и обеспечению экологической безопасности — М.: ИПКОН РАН, 1997. — 24 с.
2. Методическое руководство по прогнозу гидрогеологических условий ликвидации угольных шахт и обоснование мероприятий обеспечивающих предотвращение негативных экологических последствий. — СПб.: ВНИМИ, 2007. — 79 с.
3. Артеменко П.Г., Шевченко Е.Н., Краскова О.И., Ягмур А.Б., Камбурова Л.А. К вопросу учета факторов, влияющих на расчеты величины фильтрации в зонах междушахтных целиков при затоплении шахт // Труды РАНИМИ: сб. научных трудов — Донецк, 2022. № 16-17 (31-32). С. 78–85.
4. Селяков С.Ю., Артеменко П.Г., Шевченко Е.Н., Дроздова Н.А. О пропускной способности гидравлических связей между шахтами на примере

затопления шахт центрального района Донбасса // Труды РАНИМИ: сб. научных трудов — Донецк, 2021, № 12-13(27-28), С. 31–46.

УДК 622

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЯ В ОКРЕСТНОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО НАРУШЕНИЯ

Федоров Е.В., Кулибаба С.Б., Милетенко Н.А.

ИПКОН РАН, г. Москва

Безопасность и эффективность отработки метаноносных угольных пластов в значительной степени зависит от эффективности их предварительной дегазации [1,2].

Метаноносность угольных пластов зависит от общих газодинамических процессов, протекавших в угленосных толщах, и от локальных геологических условий сохранения метана в недрах месторождения — степени метаморфизма угля, природной проницаемости, характера и интенсивности развития геологических нарушений [3,4].

Из анализа многочисленных фактических данных [5,6] следует, что пересечение фронтом очистных работ геологических нарушений может сопровождаться значительным изменением характера метановыделения на выемочной участок.

Разрывные мелкоамплитудные геологические нарушения являются зонами углепородного массива с повышенной газопроницаемостью, вскрытие которых горными выработками (подготовительными или очистными) сопровождается интенсивными газопроявлениями и может существенно осложнить очистные работы не смотря на работу скважин предварительной дегазации отрабатываемого и сближенного пластов [7].

Рассмотрим влияние геологического нарушения на показатели метановыделения на выемочный участок и в дегазационные скважины в условиях шахты им. С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс». Шахта отрабатывает пласт Болдыревский, в почве которого (междупластье 9-11 м) находится сближенный пласт Промежуточный.

При отработке выемочного столба лава 24-64 пересекает зону геологического разрывного нарушения — опасная зона №387. На рис. 1 представлен геологический разрез лавы с указанным нарушением и продольный профиль конвейерной печи 24-65. Геологическое нарушение пересекает под углом 25-30 град пласты Промежуточный и Болдыревский, общая протяженность зоны нарушения порядка 30 м.

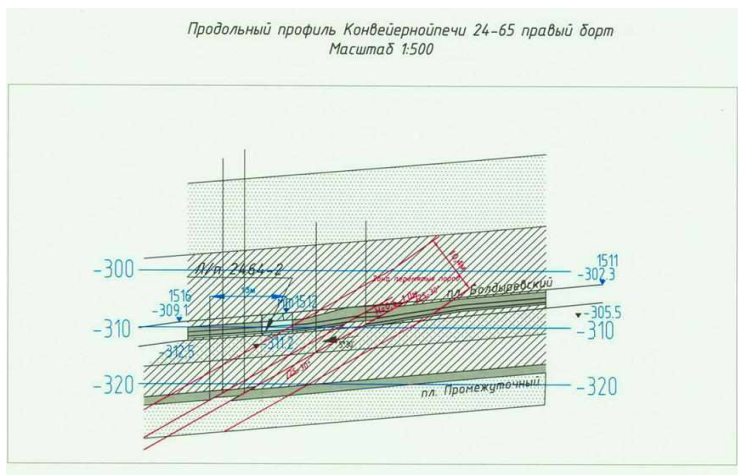


Рисунок 1 - Геологическое разрывное нарушение

Очистной забой лавы 24-64 находился в зоне геологического нарушения на протяжении 26 суток, с 10 октября по 5 ноября 2023 года. В ходе исследований был выполнен анализ концентрации метана в исходящей струе в очистном забое и вынужденных простоев выемочного комплекса на проветривание в период нахождения лавы в зоне нарушения, а также за сопоставимые периоды времени до и после его прохода.

Для оценки влияния геологического нарушения на метановыделение в дегазационные скважины предварительной дегазации был выполнен анализ работы пластовой предварительной дегазации: нисходящих скважин в пласт Болдыревский и Промежуточный и восходящих в пласт Болдыревский, расположенных в 50-70 м (2-3 куста) до и после нарушения и непосредственно в зоне. Полученные результаты представлены в табл. 1, 2.

Анализ показывает, что при входе очистного забоя в зону геологического нарушения происходит увеличение метановыделения в очистное пространство- концентрация метана в исходящей струе увеличивается на 8,1%. Как результат, это приводит к росту простоев на проветривание очистного забоя на 22,3%.

При выходе из зоны геологического нарушения указанные показатели практически возвращаются к величинам, которые фиксировались на протяжении 30 суток до входа в зону.

Причина таких изменений заключается в следующем. При входе очистным забоем в зону геологического нарушения вскрывается область перемятых газонасыщенных пород, которая в условиях разгрузки углепородного массива является коллектором, по которому метан, в том

числе из надработанного пласта Промежуточный, поступает на выемочный участок, дополнительно осложняя тем самым газовую обстановку в очистном забое.

Таблица 1

Влияние геологического нарушения на метановыделение на выемочный участок

Наименование	Вне зоны	В зоне	За зоной	Ср. прирост показателей в зоне, %
Концентрация метана в исходящей струе из забоя, %	0,62	0,67	0,61	8,1-9,0
Простои комплекса на проветривание, мин/сутки	269	329	254	22,3-22,8

При этом для дегазационных скважин ситуация обратная. Здесь наоборот, концентрация каптируемого в скважины метана, в зоне геологического нарушения, существенно ниже, чем для аналогичных скважин за пределами зоны влияния нарушения. Установлено, что снижение концентрации CH_4 скважин в пласт Болдыревский составляет до 25,8% и 27,7% соответственно для нисходящих (срок каптажа 650 сут.) и восходящих (срок каптажа 440 сут.) скважин. Для нисходящих скважин в пласт Промежуточный – это снижение составляет до 15%. У скважин, работающих в крыльях геологического нарушения (до зоны и после зоны разрывного нарушения) средние показатели концентрации метана в каптируемой смеси практически одинаковы, табл. 2.

Таблица 2

Влияние геологического нарушения на метановыделение в дегазационные скважины

Концентрация метана в смеси, %	Вне зоны	В зоне	За зоной	Ср. снижение показателей в зоне, %
Нисходящие скважины в пл. Болдыревский	11,54	8,74	11,78	24,2-25,8
Восходящие скважины в пл. Болдыревский	8,6	6,59	9,12	23,4-27,7
Нисходящие скважины в пл. Промежуточный	10,82	9,2	10,2	9,8-15,0

Указанные различия в газоотдаче пластов в дегазационные скважины связаны с тем, что зона геологического нарушения была вскрыта и частично дегазирована подготовительными выработками при подготовке выемочного столба лавы 24-64 (вент.печь, конв.печь 24-64, вент.печь 24-65). Именно поэтому у скважин, пробуренных и работающих в этой частично дегазированной зоне геологического нарушения, средняя

концентрация метана, ниже, чем у соседних кустов дегазационных скважин, расположенных за пределами зоны нарушения.

Таким образом, наличие в угольном пласте зон разрывных геологических нарушений оказывает (при их пересечении очистным забоем) значимое влияние на параметры метановыделения на выемочный участок и дебит метана, каптируемого скважинами предварительной дегазации, что требует своевременного выявления таких зон и принятия мер по заблаговременной интенсификации газоотдачи в скважины.

Список литературы

1. Шмат В.Н. Разработка технологии пластовой дегазации выбросоопасных пластов в условиях их интенсивной и безопасной отработки. // ГИАБ (научно-технический журнал). №6. 2014. С. 185-201.
2. Ютяев Е.П. Проблемы совершенствования технологии пластовой дегазации в условиях интенсивной разработки. // ГИАБ №7. М. 2015. С. 253-261.
3. Сластунов С.В., Ермак Г.П. Обоснование выбора и эффективная реализация способов дегазации при интенсивной отработке газоносных угольных пластов — ключевой вопрос обеспечения метанобезопасности угольных шахт// Журнал «Уголь», 2013. — №1. — С.21-24.
4. Малышев Ю.Н., Айруни А.Т. Комплексная дегазация угольных шахт. — М., Издательство Академии горных наук, 1999. - 327 с.
5. Окалелов В.Н., Лисянский П.Л. О метановыделении в окрестности геологических нарушений // Сборник научных трудов ДонГТУ. — №37/2012. — С. 64–68.
6. Забурдяев В.С., Малинникова О.Н., Трофимов В.А. Метанообильные шахты: добыча угля, газовыделение, метановая опасность. Калуга: Изд-во Манускрипт, 2020. — 334 с.
7. Шевченко Л.А., Костеренко В.Н., Смирнов О.В. Аэрология горных предприятий, М., Горная книга, 2020 — 224 с.

УДК 624.139

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОЗВЕДЕНИЯ МОДУЛЬНЫХ СВАЙНЫХ ОСНОВАНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЛАТФОРМ В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ

Баева Е.К.

*Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург*

Аннотация. В работе представлена инновационная технология возведения свайных оснований для технологических платформ в условиях

многолетнемерзлых пород (ММП). Технология основана на применении демонтируемых свай-оболочек с запираемой пробкой-пятой. С помощью численного моделирования в геомеханическом программном комплексе проведена оценка несущей способности предложенной конструкции. Результаты показали увеличение несущей способности на 68% для сваи с пробкой-пятой. Ключевыми преимуществами технологии являются высокая надежность, экономическая эффективность и возможность полного демонтажа, что отвечает современным экологическим требованиям при освоении Арктики.

Введение

Интенсивное освоение арктических территорий, в частности полуострова Ямал, требует создания надежной и экономически эффективной инфраструктуры. Строительство в условиях ММП сопряжено с серьезными геокриологическими вызовами, а традиционные технологии возведения свайных оснований имеют существенные ограничения [1]. Так, существующие методы устройства свай не всегда обеспечивают прогнозируемую несущую способность из-за попадания в скважину шлама и талой воды, а альтернатива в виде насыпных островов является чрезвычайно дорогостоящей и может наносить значительный экологический ущерб [2–4]. Ключевой проблемой является отсутствие технологии, которая бы сочетала высокую несущую способность, всесезонность работ и, что принципиально важно, возможность полного демонтажа по окончании срока службы объекта.

В настоящей работе предложена и научно обоснована новая технология устройства модульных свайных оснований, базирующаяся на двух взаимосвязанных патентах РФ [5, 6]. Основой технологии является демонтируемая свая-оболочка с запираемой пробкой-пятой. Способ ее устройства основан на методе бурения с одновременной обсадкой (по типу «Symmetrix» [7]), что гарантирует сохранение целостности и прочности окружающих ММП. Ключевое усовершенствование заключается в установке на нижнем конце сваи специальной пробки-пяты, которая надежно фиксируется байонетным соединением. Это преобразует сваю из преимущественно висячей в комбинированную сваю-стойку, способную эффективно передавать нагрузку на прочные слои мерзлых пород. Сваи служат универсальными несущими элементами для создания модульных технологических платформ [8], собираемых из стандартных модулей с помощью быстроразъемных соединений.

Для оценки эффективности решения было выполнено трехмерное численное моделирование в геотехническом программном комплексе. Рассматривалась одиночная свая диаметром 325 мм и длиной 10 м, установленная в двухслойном породном массиве (талый и многолетнемерзлый

суглинок). В качестве входных параметров использовались физико-механические характеристики пород, полученные в ходе комплексных лабораторных испытаний образцов ММП с полуострова Ямал [9].

Обсуждение результатов

Результаты численного моделирования показали, что предельная несущая способность сваи-оболочки с пробкой-пятой составляет 855 кН (рис. 1). Это на 68% превышает несущую способность аналогичной поллой сваи-прототипа без пяты (510 кН) в тех же породных условиях.

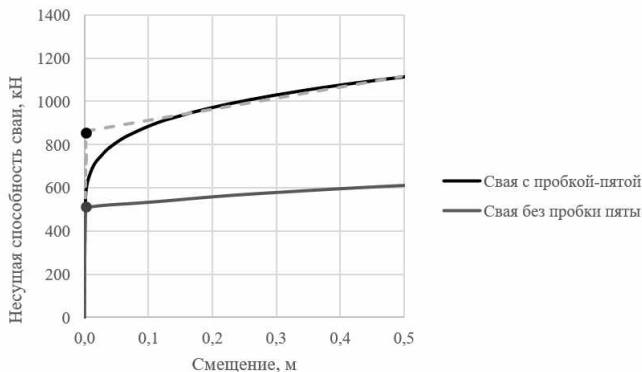


Рисунок 1 - Зависимость смещений от приложенной нагрузки для свай с пробкой-пятой и без

Значительное увеличение несущей способности объясняется трансформацией схемы работы сваи: из висячей она превращается в комбинированную сваю-стойку. Пробка-пята обеспечивает эффективную передачу нагрузки на более прочные нижележащие слои мерзлых пород. Технология бурения с одновременной обсадкой сохраняет природную структуру и прочность окружающего мерзлого массива, позволяя в полной мере реализовать силы смерзания по боковой поверхности. Важнейшим преимуществом является возможность полного демонтажа сваи путем ее внутреннего разогрева, что кардинально снижает экологический след и позволяет повторно использовать конструкции.

Заключение

В результате проведенного исследования сделаны следующие выводы:

Разработана и численно обоснована новая технология демонтируемых свай-оболочек, превосходящая по несущей способности аналоги на 68%.

Технология обеспечивает высокую надежность за счет сохранения целостности мерзлых грунтов и эффективной передачи нагрузки через пяту сваи.

Предложенное решение является экологически и экономически эффективной альтернативой для широкого применения при строительстве объектов нефтегазовой инфраструктуры и создания модульных технологических платформ в Арктике, обеспечивая возможность полной рекультивации территорий.

Для подтверждения расчетных данных и оценки реальной эффективности технологии необходима ее верификация в натурных условиях. Направлениями дальнейших исследований являются проведение полномасштабных полевых испытаний одиночной сваи и фрагмента модульной платформы, а также анализ долгосрочной работы сваи с учетом реологических свойств мерзлых грунтов и оптимизация термомеханических процессов при ее демонтаже.

Список литературы

1. Dourado J.B. de O.L. et al. Foundations in Permafrost of Northern Canada: Review of Geotechnical Considerations in Current Practice and Design Examples // *Geotechnics*. 2024. Vol. 4, №1. P. 285–308.

2. Plotnikov A.A., Merzlyakov V.P. Increasing the Bearing Capacity and Durability of Building Foundations on Frozen Soils // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2021. Vol. 58, №1. P. 71–77.

3. Mussakhanova S. et al. Calculation and numerical modeling of the effect of heat and mass transfer on the properties of pile foundations in seasonally freezing soils // *Technobius*. 2024. Vol. 4, №1. P. 0054.

4. Брушков А.В. и др. Опыт эксплуатации сооружений и необходимость управления тепловым режимом грунтов в криолитозоне // *Записки Горного института*. 2023. Vol. 263. P. 742–756.

5. Трушко В.Л., Климов В.Я., Баева Е.К., Ожигин А.Ю. Способ сооружения свай в криолитозоне // Патент RU 2 841 446 C1; заявл. 12.09.2024; опубл. 06.06.2025.

6. Литвиненко В.С., Трушко В.Л., Двойников М.В. Способ сооружения морской буровой платформы на мелководном шельфе Арктических морей // Патент RU 2 704 451 C1 2018137333; заявл. 19.02.2019; опубл. 28.10.2019.

7. Концепция Symmetrix [Электронный ресурс] URL: <http://miningcomp.ru/generic/uploaded/symmetrix.pdf> (дата обращения: 01.07.2025)

8. Litvinenko V.S., Dvoynikov M. V., Trushko V.L. Elaboration of a conceptual solution for the development of the Arctic shelf from seasonally flooded coastal areas // *Int J Min Sci Technol. China University of Mining and Technology*, 2022. Vol. 32, № 1. P. 113–119.

9. Trushko V.L., Baeva E.K., Blinov A.A. Experimental Investigation on the Mechanical Properties of the Frozen Rocks at the Yamal Peninsula, Russian Arctic. *Eng.* 2025; 6(4):76. DOI:10.3390/eng6040076.

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЗАЛЕГАНИЯ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА НА КОНВЕРГЕНЦИЮ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ ВЫРАБОТКИ

Ягель Н.В., Загоршменный И.М., Блохин Д.И.

ИПКОН РАН, г. Москва

Аннотация. В работе представлены результаты численных экспериментов по оценке влияния мощности пород кровли угольного пласта на конвергенцию подготовительной выработки. С учетом горногеологических характеристик пласта и вмещающих пород установлены закономерности деформации горного массива в зависимости от мощности непосредственной и основной кровли в процессе перемещения лавы.

Введение

Эффективное управление устойчивостью горных выработок невозможно без учета геомеханических и горногеологических особенностей пород кровли. В практике проектирования подготовительных выработок часто используются усредненные значения геомеханических характеристик горных пород без учета их значительных флуктуаций вдоль выемочного столба, что может приводить к неоптимальным решениям.

Цель настоящей работы - установление количественных зависимостей между мощностью пород кровли и деформациями выработки в процессе перемещения лавы.

Исследования выполнены для условий отработки пласта Печорского угольного бассейна.

Постановка задачи

Для численного анализа использовался программный комплекс Plaxis 3D, в котором реализовано моделирование в приближённо трёхмерной постановке участка массива горных пород вмещающего подготовительную горную выработку, подвергающуюся влиянию примыкающего очистного забоя в процессе его перемещения (рис. 1).

Расчеты выполнены с использованием критерия разрушения Кулона-Мора, описывающего поведение горных пород с учётом предельного состояния по сдвигу [1]. Масштаб модели соответствует одному шагу обрушения основной кровли пласта, что позволяет учесть механизмы деформации и перераспределения напряжений в характерных зонах в процессе перемещения очистного забоя вдоль подготовительной выработки.

Для учета влияния вышележащих пород использовано эквивалентное вертикальное давление в виде распределённой нагрузки [2]. Такой подход позволил достоверно смоделировать перераспределение горного давления без чрезмерного усложнения модели.

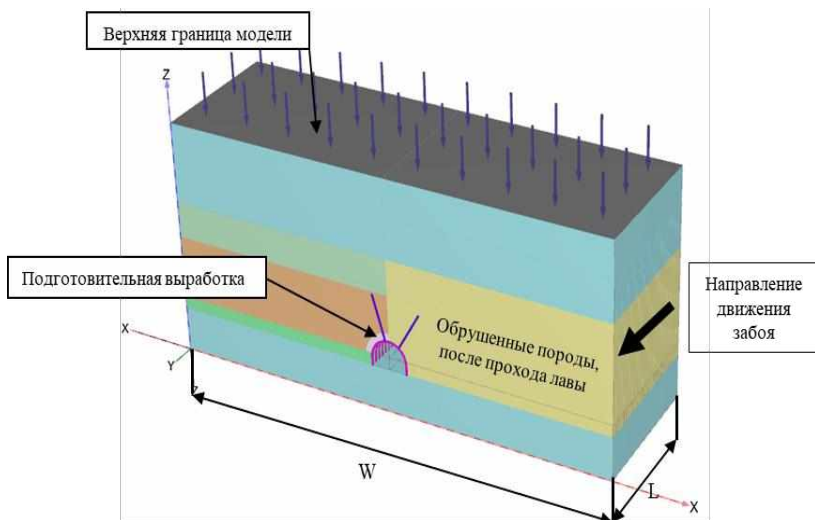


Рисунок 1 – Общий вид модели

Продвижение механизированной крепи моделировалось поэтапно, с шагом 0,8 метра. Сразу после перемещения крепи предполагалось мгновенное обрушение непосредственной кровли. Процесс моделирования состоит из 26 стадий, которые отображают перемещение лавы в пределах рассматриваемого массива. Окончание последней стадии соответствует обрушению основной кровли. Номер стадии моделирования соответствует числу шагов перемещения механизированного комплекса. Соответственно: №0 - выработка в массиве горных пород, №5 – перемещение лавы 4 м, а №25 – 20 м и №26 обрушение основной кровли. Сопротивление крепи влиянию окружающего массива пород задавалось через ограничения перемещений со стороны обрушенной породы. Последовательность установки элементов крепления горной выработки соответствует проекту [2].

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены зависимости значений конвергенции подготовительной выработки $\varepsilon_{\max}$ от номера стадии моделирования при двух различных величинах мощности основной кровли. Из представленных на рис. 2 графиков видно, что на начальных стадиях перемещения лавы на величину шага обрушения основной кровли конвергенция выработки слабо зависит от изменения мощности пород в кровле выработки. Это обусловлено тем, что напряжённое состояние массива определяется в первую очередь перераспределением нагрузки в породах, прилегающих к крепи, и влиянием обрушившейся непосредственной кровли [3]. Более

существенные различия значений конвергенции начинают проявляться на завершающих этапах моделирования, соответствующих процессам поддержания выработки после прохода лавы и обрушения основной кровли. Таким образом показано, что мощность и прочностные характеристики основной кровли оказывают критическое влияние на устойчивость подготовительных выработок, особенно при отработке пластов на глубоких горизонтах. Полученные результаты сравнимы с данными натурных инструментальных наблюдений [2].

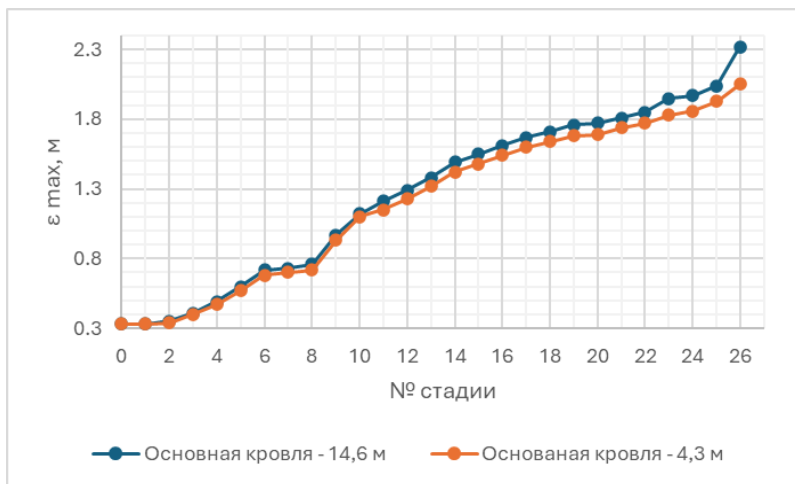


Рисунок 2 – Зависимость ε_{max} от стадии моделирования

Заключение

1. Результаты моделирования показали соответствие инструментальным замерам, полученным на объекте исследования
2. Установлено, что глубина отработки, свойства и мощность вмещающих пород существенно влияют на конвергенцию выработки, что следует учитывать при отработке длинных выемочных полей.

Список литературы

1. Баклашов И.В. Геомеханика. М.: Издательство МГТУ, 2005. – 208 с.
2. Ягель Н.В., Закоршменный И.М., Харитонов И.Л., Блохин Д.И. Оценка деформаций повторно используемых подготовительных выработок на пологозалегающих угольных пластах // Строительство: наука и образование. – 2025. – Т. 15. – №1. – С. 71–80.
3. Соломойченко Д.А. Определение величин напряжений и деформаций в окрестностях подготовительных выработок // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2015. – №1. – С. 68–71.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ УРАНОВЫХ ПЛАСТОВ ПРИ ПОДЗЕМНОМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ

Заиров Ш.Ш.¹, Халимов И.У.², Мехмонов М.Р.²

¹Алмалыкский филиал НИТУ «МИСИС», г. Алмалык,
Республика Узбекистан

²Навоийский государственный горно-технологический университет,
г. Навои, Республика Узбекистан

Аннотация. Рассмотрены современные подходы к повышению проницаемости урановых пластов при подземном выщелачивании. Описаны физические, химические и комбинированные методы интенсификации фильтрации. Отмечены проблемы кольматации фильтров и при-фильтровых зон. Обоснована необходимость комплексного и адаптивного подхода с учётом геолого-гидродинамических условий месторождений.

Введение. Подземное выщелачивание урана является высокоэффективной технологией освоения месторождений. Однако его успех во многом зависит от проницаемости ураносодержащих пластов. Процесс выщелачивания предполагает замену поровой жидкости на растворитель, который взаимодействует с минеральными компонентами пород. В результате в недрах происходят различные физико-химические процессы, такие как образование химических осадков, выделение газов и развитие суффозионных явлений. Комплекс этих процессов приводит к ухудшению первоначальной проницаемости пласта. Для её восстановления применяются физические, химические и комбинированные методы, выбор которых должен учитывать геолого-гидродинамические условия.

Одним из основных факторов, определяющих фильтрационно-емкостные свойства пород, является гранулометрический состав [1]. Размер, форма и сортировка зерен существенно влияют на пористость и проницаемость пород. Как показано в работе [2], проницаемость k породы может быть выражена уравнением:

$$k = C \cdot d^2 \frac{n^3}{(1-n)^2}, \quad (1)$$

где C – коэффициент формы зерен (0,5–0,7 для окатанных частиц);
 d – эффективный диаметр зерен, мм; n – пористость, %.

На основании выражения (1) сделан вывод, что песчаники с разной зернистостью наблюдаются следующие закономерности: при увеличении среднего размера зерен с 0,1 до 1 мм проницаемость возрастает в 100–200 раз; наибольшая проницаемость характерна для хорошо отсортированных пород (коэффициент сортировки $<1,5$). [3-5].

Плохая сортировка (наличие мелких частиц в крупнозернистой матрице) снижает проницаемость за счет заполнения порового пространства тонкодисперсным материалом и образования «мостовых» структур, блокирующих фильтрационные каналы.

Для эффективного ПВ требуются пласты с проницаемостью [6]: оптимальная: >50 мД; предельно допустимая: 10–50 мД (требуются методы интенсификации); нерентабельная: <10 мД.

Для низкопроницаемых разностей применяют [7, 8]: Гидроразрыв пласта – эффективен для песчаников с размером зерен $>0,25$ мм; Кислотную обработку – удаление глинистого и карбонатного цемента; Селективное выщелачивание – использование реагентов, растворяющих тонкодисперсные включения

Таким образом, гранулометрический состав является определяющим фактором фильтрационных свойств урановых пластов. Наибольшей проницаемостью обладают хорошо отсортированные крупнозернистые песчаники. Для месторождений с мелкозернистыми разностями требуются специальные методы интенсификации.

Наличие цементирующих минералов (кварц, кальцит, глинистые минералы) существенно снижает проницаемость [9]: кварцевый цемент повышает механическую прочность, но уменьшает пористость; карбонатный цемент (кальцит, доломит) легко растворяется в кислотах, что можно использовать для увеличения проницаемости; глинистые минералы (каолинит, монтмориллонит) склонны к набуханию, что приводит к закупорке пор.

Глинистые прослои создают барьеры для фильтрации, что требует применения ПАВ или кислотной обработки [10].

В процессе ПВ происходит засорение пор коллоидными частицами и осадками (гидроксиды железа, кремнезем), биологическое обрастание (сульфатредуцирующие бактерии) и механическое уплотнение при длительной закачке растворов.

Таблица

Основные техногенные факторы снижения проницаемости

Фактор	Механизм воздействия	Методы борьбы	Источник
1	2	3	4
Коллоидное засорение	Осаждение $\text{Fe}(\text{OH})_3$, SiO_2	Фильтрация растворов, кислотная промывка	(Brown, 2022)

1	2	3	4
Бактериальное обрастание	Образование биопленок	Обработка бактерицидами (NaClO)	(Johnson et al., 2021)
Механическое уплотнение	Уплотнение породы под давлением	Циклическая закачка/откачка	(Sidorov, 2023)

Обсуждение результатов

Цементирующие минералы существенно влияют на проницаемость урановых пластов при ПВ. Кварцевый цемент снижает пористость, ухудшая фильтрационные свойства, тогда как карбонатные цементы легко растворяются в кислотах и могут быть удалены для повышения проницаемости. Глинистые минералы склонны к набуханию и закупорке пор, что требует химической обработки. Помимо природных, на проницаемость влияют техногенные факторы: коллоидное засорение, обрастание и уплотнение. Для эффективного ПВ необходим комплексный подход с учётом литологической структуры и внедрением методов интенсификации, особенно в условиях низкопроницаемых песчаников [11].

Заключение

Таким образом, обеспечение устойчивой проницаемости требует как учета литолого–минералогических особенностей, так и внедрения технологий интенсификации фильтрации в ходе эксплуатации. В условиях низкопроницаемых песчаников эффективность ПВ может быть существенно повышена за счёт предварительной кислотной или физико–химической обработки пласта.

Гранулометрический состав и минеральные компоненты ураносодержащих пород определяют их проницаемость и эффективность ПВ. Крупнозернистые песчаники обладают высокой фильтрационной способностью, в то время как мелкозернистые и глинистые породы требуют интенсификации. Устойчивость ПВ зависит и от борьбы с техногенными факторами: химических осадков, выделение газов и развитие суффозионных явлений, что требует комплекса мероприятий – фильтрации, химической обработки и циклической закачки – на всех этапах разработки месторождений.

Список литературы

1. Иванов А.А., Петров Б.В. Современные методы интенсификации ПВ урана. – М.: Недра, 2020. – 245 с.
2. Литвиненко В.Г. Гранулометрический состав и фильтрационные свойства урановых руд. – М.: Горная книга, 2018. – 210 с.
3. Дуллен Ф. Пористые среды: Транспортные свойства. – М.: Мир, 1992. – 560 с.

4. Krumbein W.C., Monk G.D. Permeability as a function of grain-size parameters // J. Sediment. Petrol. – 1942. – Vol. 12. – P. 35–48.

5. Кузнецов А.А., Петров Б.В. Минералогия и геохимия урановых месторождений. – СПб.: Недра, 2020. – 185 с.

6. Smith J., Brown R. Impact of cementation on permeability in uranium-bearing sandstones // Journal of Petroleum Geology. – 2021. – Vol. 44(2). – P. 123–135.

7. Petrov K.L. et al. Microscopic analysis of uranium ore cementation types // Minerals Engineering. – 2019. – Vol. 136. – P. 45–53.

8. Ivanov A.A. Acid leaching techniques for carbonate removal in ISL uranium mining // Hydrometallurgy. – 2020. – Vol. 195. – P. 105–112.

9. Johnson M., Lee S. Microbial control in in-situ leaching operations // Applied Microbiology. – 2021. – Vol. 107(3). – P. 789–801.

10. Sidorov P.D. Hydrodynamic methods for permeability enhancement in uranium ISL // Mining Science and Technology. – 2023. – Vol. 5(1). – P. 22–34.

11. Сидоров К.Л. Применение ПАВ в процессах подземного выщелачивания. – СПб.: Горная книга, 2021. – 180 с.

УДК 622.834

К ВОПРОСУ ОТРАБОТКИ УГЛЯ В ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ЗОНЕ В УСЛОВИЯХ ВЫВЕТРЕЛЫХ И ОБВОДНЕННЫХ ПОРОД

Рожко М.Д., Хохлов Б.В.

ФГБНУ «РАНИМИ», г. Донецк

Аннотация. Рассмотрен порядок выбора оптимальных параметров системы отработки на примере отработки 1-й «бис» западной лавы пласта I^7 (I^7_n) – Давыдовского шахты «Полтавская-Комсомольская №1»

Введение Ведение горных работ на малых глубинах осложнено многими факторами, в том числе возможностью образования провалов. Это может происходить, как в период эксплуатации шахты под влиянием обрушения покрывающих пород, так и после ликвидации горного предприятия над оставшимися в массиве пустотами. Кроме этого оказывают значительное влияние ослабленность вмещающих пород, а также их обводненность.

Следует отметить, что ведение горных работ в приповерхностной зоне не охватывается действующими нормативными документами в части выбора системы разработки, типа и параметров крепления. Таким образом, принимаемые технические решения имеют индивидуальный, нестандартный характер и устанавливают ряд ограничений, прежде всего, при выборе общей схемы и порядка отработки, типа крепи, параметров её установки, средств и способа охраны. В период 2005-2006 гг. по рекомендациям РАНИМИ была осуществлена отработка 1-й «бис»

западной лавы пласта l^7 (l^7_n) – Давыдовского шахты «Полтавская-Комсомольская №1». В 2025 году проведены экспериментальные и модельные исследования по калибровке полученных характеристик и параметров геомеханических процессов, протекающих в обводненных горных массивах, где использовались результаты работы тех лет.

Цель исследований – определение системы разработки и ее оптимальных параметров для обеспечения устойчивости массива и охраны объектов поверхности.

Особенности геологического и гидрогеологического строения участка. Отрабатываемый участок находится в зоне выветривания и имеет ряд особенностей геологического и гидрогеологического строения: слабые, неустойчивые породы в кровле, которые при намокании легко обрушаются; наличие капежа, размывов пласта. Пласт l_7 обработан очистными работами бывшей шахты «Контарная», вода из него дренирует в водосборники 7-го горизонта пласта l_3 , которые переданы шахте «Винницкая». Глубина разработки составляет в среднем 25-30 м, что делает возможным поступление в шахту поверхностных вод и возникновение крупных трещин.

На поверхности планируемого к отработке участка имеется: автодорога п. Стожковское – г. Шахтерск, асфальтированная, двухрядная 6,0 (12) А; и водовод пластиковый ПНД Ø 200 мм, уложенный в песок.

Оба эти объекта находятся в конце выемочного поля, где породы кровли являются наиболее устойчивыми и при применении камерной системы отработки запасов не претерпят значительного влияния разработки. Над конвейерным штреком возможно образование провалов [1].

Угольные пласты и вмещающие породы на неглубоких горизонтах под действием различных физико-химических факторов изменяют свои качественные показатели: увеличивается трещиноватость, рыхлость, слабость и неустойчивость. С глубиной степень окисления уменьшается, породы сохраняют свойственную им устойчивость и на этой глубине условно проводится граница годного угля.

Таким образом, добыча угля по пласту l_7 производится на небольшой глубине, в зоне частичного или полного выветривания пород, поэтому данные о фактических механических свойствах горных пород на этой глубине требуют уточнения, для чего был проведен отбор проб из непосредственной и основной кровли пласта l_7 и определение прочностных показателей пород при помощи механического прибора-пробника БУ-39.

Обсуждение результатов исследований. По результатам анализа условий отработки, а также проведенных исследований установлено, что на данном участке необходимо применение камерной системы отработки запасов.

На отдельных участках залегания запасов имеет место «ложная кровля», представленная глинистым сланцем, её поддержание при возведении крепи затруднительно или невозможно. То есть, наличие неустойчивой ложной кровли - основной ограничивающий фактор выбора типа крепи. Тип крепи с прямолинейным верхняком эффективен только при наличии достаточно устойчивого плоского обнажения кровли в забое. При имеющихся неконтролируемых вывалах кровли еще до ее установки (непосредственно вслед за выемкой угля) применение крепи с прямолинейным верхняком исключается. Естественно, что при незначительной мощности неустойчивой пачки непосредственной кровли последняя должна полностью извлекаться, а прямолинейный верхняк - устанавливаться под достаточно устойчивое плоское обнажение вышележащей пачки.

Рекомендуемая плотность установки крепежных рам по восстанию равна 1,25 рам/пог.метр, на осложненных участках - 2 рамы/пог.метр.

Расчет устойчивости межкамерных целиков [2]-[4] выполнен для следующих условий:

- ширина камеры – 5 м;
- коэффициенты концентрации напряжений в кровле 1,15; 1,18; 1,2;
- коэффициенты концентрации напряжений в почве 1,2;
- объемный вес пород 2,5 т/м³;
- мощность l_7 – 1,15 м; на одном из участков учтена ложная кровля;
- прочность угольного пласта на одноосное сжатие – 5; 7 МПа.

Заключение. Выемочный участок пласта l_7 – Давыдовского расположен в приповерхностной зоне между ранее отработанной 1-й западной лавой и границей годного угля. Фактором, осложняющим отработку участка, является его локализация в зоне выветривания, вследствие чего уголь и вмещающие породы ослаблены. Учитывая небольшую глубину разработки от дневной поверхности (в среднем 25-30 м), снижению устойчивости вмещающих пород способствует также возможность поступления в шахту поверхностных вод, которая увеличивается в весенне-осенние периоды. Следует отметить, также отсутствие отраслевых нормативных и нормативно-методических документов по отработке запасов угля на выходах.

Выполненные исследования позволяют сделать вывод о необходимости применения камерной системы разработки, основные параметры которой следующие.

Камеры проходятся по восстанию без подрывки пород почвы пласта. Их длина определяется устойчивостью нижней пачки непосредственной кровли, допускающей установку верхняка под плоское обнажение

(значительные неконтролируемые вывалы пород) и снижением кондиции угля из-за засорения его породой кровли.

Ширина камер – до 5 м.

Ширина целиков между камерами – от 2,5 до 3, 8 м на различных участках в соответствии с проведенными расчетами [2]-[4].

Плотность установки крепи – 1,25 рам /пог.метр, на осложненных участках – 2 рамы / пог.метр.

После отработки запасов на участке под водоводом и дорогой Стожково – Шахтерск в конвейерном штреке производится полная его закладка породой без извлечения крепи.

Камерная система отработки с оптимальными параметрами, разработанная РАНИМИ, может применяться на небольших глубинах в условиях выветрелых и обводненных пород в качестве меры охраны подрабатываемых объектов поверхности, что подтверждается инструментальными наблюдениями за состоянием водовода и автомобильной дороги.

Исследования выполнены в рамках работы FRSR-2023-0006 «Исследование устойчивости и трансформации напряженно-деформированного состояния обводненных массивов горных пород».

Список литературы

1. ГСТУ 101.00159226.001-2003. Правила подработки зданий, сооружений и природных объектов при добыче угля подземным способом. – 128 с.
2. Расположение, охрана и поддержание горных выработок на угольных шахтах Донецкого бассейна: РД. – Донецк, 2021.– 266 с.
3. Дрибан, В.А. Определение оптимальных параметров камерной отработки угольных пластов // Проблемы горного давления. – 2001. – № 5. – С. 90–107.
4. Теория защитных пластов / И.М.Петухов, А.М.Линьков, В.С.Сидоров и др. – М.: Недра, 1976. – 223 с.

МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ ПРОВАЛООБРАЗОВАНИЯ НАД СТАРЫМИ ГОРНЫМИ ВЫРАБОТКАМИ

Дрибан В.А., Дуброва Н.А., Колесник М.В.

ФГБНУ «РАНИМИ», г. Донецк

В настоящей работе предложен оригинальный механизм развития процесса провалообразования над старыми горными выработками. Основная идея заключается в том, что сезонные гидрометеорологические (паводковые) явления и увлажнение верхнего слоя породного массива

приводят к циклическому изменению физико-механических свойств и напряженно-деформированного состояния вмещающих массив горных пород. В первую очередь, речь идет об изменении бокового распора под влиянием сезонного обводнения-осушения и, соответственно, напряженно-деформированного состояния вмещающего массива [1].

Напряженное состояние описывается тремя компонентами: вертикальные σ_z и горизонтальные (боковые) σ_x , σ_y напряжения связаны между собой уравнением:

$$\sigma_x = \sigma_y = \lambda \sigma_z, \quad (1)$$

где λ – коэффициент бокового распора, который в упругой модели горной породы рассчитывается по формуле:

$$\lambda = \frac{\nu}{1 - \nu}, \quad (2)$$

где ν – коэффициент Пуассона.

Циклические обводнения и осушения массива постепенно снижают прочностные свойства пород до критических значений, при которых происходит интенсивный рост трещин, что в последствии приводит к образованию провалов на земной поверхности. Известно, что однократное обводнение породного массива из песчано-глинистых пород Донбасса приводит к снижению предела прочности на одноосное сжатие на 30-70% [2].

Коэффициент бокового распора (λ), характеризующий отношение бокового давления горной породы к вызвавшей его вертикальной нагрузке, зависит от типа породы и ее физико-механических свойств. Например, величина коэффициента бокового распора для песков – 0,3–0,4; для глин – 0,7–0,75; для полускальных пород – 0,2–0,3; для скальных – 0–0,1, при этом, обводнение приводит к его значительному увеличению (так боковой распор для малопрочных аргиллитов с влажностью 15% составляет 0,93 [3]).

Сезонные обводнения и осушения массива повторяясь из года в год приводят к циклическому изменению физико-механических свойств горных пород и, соответственно, бокового распора. Исходя формулы (2), если значение коэффициента Пуассона для сухих пород составляет 0,25, то коэффициент бокового распора равен 0,33. При увлажнении горных пород значение коэффициента Пуассона достигает значений близких к 0,5, тогда значение коэффициента бокового распора стремится к единице. Соответственно, диапазон изменения горизонтальных напряжений составляет 0,67γН. Образно это можно представить как

игру на гармошке (последовательное сжатие – растяжение массива в горизонтальном направлении).

Итак, сезонная смена состояний обводнение-осушение приводит к циклическому изменению НДС массива горных пород и возникновению эффекта малоциклового усталости материала, что провоцирует образование и рост трещин в кровле старых горных выработок неглубокого заложения.

Для моделирования влияния малоциклового усталости на развитие процесса провалообразования и рост трещин в кровле горной выработки использован программный комплекс конечно-элементного моделирования ANSYS. Построена «псевдоплоская» модель массива горных пород размером 40 м на 70 м, с горной выработкой, расположенной на глубине 50 м сечением 2,0 м на 2,5 м и единичной трещиной в кровле горной выработки высотой 30 см и раскрытием 1 см. Нижняя грань модели жестко закреплена от всех перемещений, а передняя и задняя грань от перемещений по ширине, что обеспечивает «псевдоплоское» поведение модели. К верхней грани модели приложено давление $\delta = \lambda \gamma H$, а к боковым граням растягивающее давление $\delta = \lambda \gamma H$ ($\lambda = 0,65$ - диапазон изменения значений бокового распора между сухими и влажными породами согласно табл. 1). Трещина смоделирована в модуле «Fracture» и выполнен расчет интенсивности напряжений при описанных нагрузках и граничных условиях.

Использованные при моделировании значения физико-механических свойств горных пород приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения основных физико-механических свойств аргиллитов

Свойство	Значение	
	сухая порода	влажная порода
1	2	3
Объемный вес, кг/м ³	2020	2020
Модуль упругости (Юнга), ГПа	2,5	1,9
Коэффициент Пуассона	0,2	0,47
Коэффициент бокового распора	0,25	0,9

После моделирования 50, 100 и 200 циклов воздействия растягивающих деформаций размеры трещины увеличились с 0,3 м до 16,4 м, 34,0 и 49,4 м соответственно (рис. 1). Таким образом скорость роста трещины составляет порядка 50 м за сто лет (200 циклов весенне-осенних паводковых явлений).

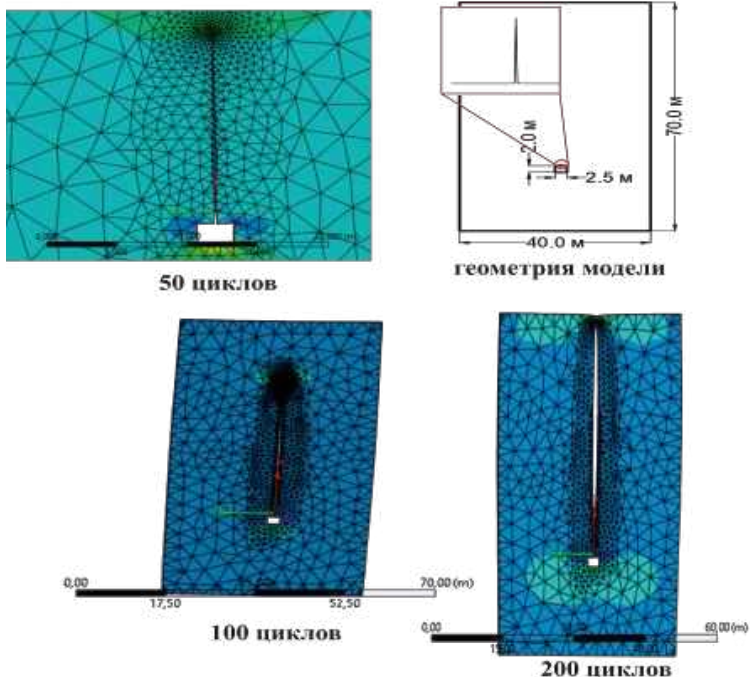


Рисунок 1 – Рост трещины после 50, 100 и 200 циклов моделирования

Выводы. Таким образом, предложенный подход к механизму провалообразования показал свою работоспособность. Более того, он впервые позволяет прогнозировать временные параметры появления критических деформаций земной поверхности.

Список литературы

1. Дрибан, В.А. О механизмах провалообразования над старыми горными выработками [Текст] / В.А. Дрибан, Н.А. Дуброва, В.П. Сажнев, А.В. Антипенко, М.В. Колесник // Труды РАНМИ: сб. науч. тр. – Донецк, 2024. - № 3 (41). – С. 104-123.
2. Гавриленко, Ю.Н. Прочность горных пород в зоне выветривания карбона [Текст] / Ю.Н. Гавриленко, В.Н. Ермаков, А.Н. Феофанов // Науч. тр. ДонНТУ. Серия: Горно-геологическая. - Донецк. – 2002. – №45 – С. 152-155.
3. Карташов, Ю.М. Прочность и деформируемость горных пород [Текст] / Ю.М. Карташов, Б.В. Матвеев, Г.В. Михеев, А.Б. Фадеев; под общ. ред. А.Б. Фадеева. – М: Недра, 1979. – 269 с.

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ УДАРООПАСНОСТИ МАССИВА МЕСТОРОЖДЕНИЯ «КРАСИВОЕ»

Бурдинская А.А.

*ИГД ДВО РАН обособленное подразделение
ХФИЦ ДВО РАН, г. Хабаровск*

Аннотация

При разработке месторождений полезных ископаемых подземным способом с увеличением глубины часто возникают проблемы удароопасности горного массива, а при достижении критических глубин возможны внезапные динамические разрушения горных пород. В связи с этим, важно заблаговременно оценить геомеханическое состояние горного массива, что и было выполнено на месторождении «Красивое».

Введение

Месторождение «Красивое» находится в северо-западной части Аяно-Майского района Хабаровского края, с 2007 г. разрабатывалось открытым способом, с 2009 г. перешло на подземный способ. К настоящему времени запасы до гор. 850 м (глубина 350 м) практически полностью отработаны. В отработанной части накоплены многочисленные целики, являющиеся основными концентраторами напряжений. В ближайшей перспективе планируется отработка запасов нижней части месторождения до отметки +615 м (глубина от поверхности 585 м). Для безопасной работы и предупреждения динамических проявлений необходимы комплексные исследования удароопасности: лабораторные испытания пород, оценка поля напряжений и инструментальные геоакустические наблюдения прибором «Prognoz-L», а также визуальный контроль [1, 2].

В декабре 2023 г. были выполнены полевые наблюдения напряженного состояния методом щелевой разгрузки по методике ИГД МЧМ СССР (ИГД УрО РАН) [3-5]. По результатам выполненных замеров были установлены компоненты первоначального поля напряжений в районе гор. 800-820 м: горизонтальные напряжения субмеридиональной ориентации $\sigma_{\text{СЮ}}$ в 2,4 раза превышают вертикальные $\sigma_{\text{В}}$, горизонтальные субширотной ориентации $\sigma_{\text{ЗВ}}$ — в 1,9 раза. Максимальные напряжения действуют горизонтально в субмеридиональной плоскости, минимальные — вертикально.

Полученные результаты свидетельствуют, что в массиве месторождения «Красивое» на глубине 350-400 м действует гравитационно-тектоническое поле напряжений, где горизонтальные напряжения в 2,4-1,9 раза превышают вертикальные. Выполненный анализ геодинамического состояния массива в пределах горизонтов 820 м и 800 м месторождения позволил выявить тектонически активные зоны и районировать имеющиеся выработки по их геомеханическому состоянию [6]. На рис. 1 приведена полученная схема для горизонта 820 м.

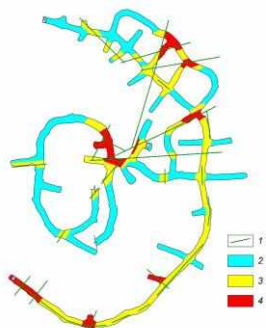


Рисунок 1 – Схема геомеханического районирования горизонта 820 м
1 – тектонически активные зоны.
Цветом выделены участки выработок:
2 – устойчивые, минимальные напряжения;
3 – склонные к динамическому разрушению, средние напряжения;
4 – в которых выявлены случаи динамического разрушения, наиболее напряженные

Данные, приведенные на рис. 1, показывают, что массив месторождения в пределах горизонта 820 м по геомеханическому состоянию неоднородный – наблюдается мозаичность поля напряжений. Южная часть горизонта более напряжена по сравнению с северной, присутствуют напряженные участки при пересечении выработок с активными разрывными нарушениями, где были зарегистрированы динамические проявления горного давления.

В ходе визуальных наблюдений на горизонтах 850 м, 820 м и 800 м были выявлены внешние признаки удароопасности в форме шелушения, динамического заколообразования, а также частичное разрушение целиклов и случаи раскрытия в местах пересечения выработок с активными разломами. Примеры шелушения горных пород показаны на рис. 2.



Рисунок 2 – Выявленное шелушение: а) на гор. +850 м в штреке Северный б) на гор. 820 м, штр. Южный

Кроме визуальных наблюдений были выполнены 23 измерения состояния приконтурного массива пород прибором «Prognoz-L» [7, 8] в 10 пунктах на горизонтах +800 м; +820 м; +850 м, включая замеры в активных проходческих забоях. В некоторых забоях установлен повышенный уровень акустической эмиссии. В штреке Северный на гор. +800 м интенсивность акустической эмиссии в массиве превышала 120 АЭ-импульсов за 5-минутный интервал измерений, что приближается к критическим значениям.

Заключение

Полученные результаты, включая параметры поля напряжений в массиве горных пород нижних горизонтов, данные натурных наблюдений и инструментальных измерений в горных выработках на месторождении «Красивое» были использованы при написании заключения по оценке склонности к горным ударам золоторудного месторождения «Красивое».

Список литературы

1. Рассказов, И.Ю. Прогнозная оценка удароопасности массива горных пород при отработке глубоких горизонтов Николаевского месторождения / И.Ю. Рассказов, М.И. Потапчук, Г.А. Курсакин, Ю.И. Болотин, А.В. Сидляр, М.И. Рассказов / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. №4. С. 96-102.
2. Rasskazov, M.I. Geomechanical substantiation of measures of safety in the process of development of the Southern Hingansk deposit / M.I. Rasskazov, A.V. Rasskazova, M.I. Potapchuk, A.A. Teryoshkin / Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure Development. Proceedings of the 14th International congress on rock mechanics and rock engineering. Сер. «Proceedings in Earth and geosciences» 2020. С. 793-799.
3. Влох, Н.П. Управление горным давлением на подземных рудниках / Н.П. Влох. / – Москва: Недра, 1994. – 208 с.
4. Зубков, А.В. Геомеханика и геотехнология / А.В. Зубков. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2001. – 333 с.
5. Криницын, Р.В. Мониторинг напряженного состояния массивов руд и пород в очистных блоках шахты «Магнетитовая» / Вестник магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 207. №4 (20). С. 18-21.
6. Крюков, В.Г. Золоторудное месторождение Красивое: новые данные / В.Г. Крюков, Ю.В. Федотова/ Материалы конференции «Тектоника, глубинное строение и минерагения востока Азии: XII Косыгинские чтения», Хабаровск, 10–13 сентября 2024 г, с 100-102.
7. Рассказов, И.Ю. Совершенствование технических средств локального контроля удароопасности при ведении горных работ /И.Ю. Рассказов,

П.А. Аникин, А.П. Грунин [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2023. – №5. – С.177-184.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024660155 Российская Федерация. SettingStaLtaOption: № 2024618870: заявл. 23.04.2024;опубл. 02.05.2024 / Д.С. Мигунов, А.П. Грунин; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Хабаровский федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук. – EDN FXDIBB.

УДК 622.831

ОБРАБОТКА ПЕРВИЧНЫХ ДАННЫХ ЛАЗЕРНОГО ДЕФОРМОМЕТРА В РАЙОНЕ РУДНИЧНОГО ПОЛЯ НИКОЛАЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

**Цой Д.И.¹, Рассказов М.И.¹, Терешкин А.А.¹,
Швец В.А.², Яковенко С.В.²**

¹*ИГД ДВО РАН, г. Хабаровск*

²*ТОИ ДВО РАН, г. Владивосток*

Аннотация. Николаевское полиметаллическое месторождение характеризуется достаточно сложными горногеологическими и геомеханическими условиями и отнесено к категории опасных по горным ударам [1,2]. Для комплексного геомеханического мониторинга удароопасности был разработан проект деформационной системы «Prognoz-D», реализованный совместно с коллегами из Тихоокеанского Океанологического института, г. Владивосток. В статье приведены первичные экспериментальные результаты внедрения системы лазерного деформометра «Prognoz-D» на Николаевском месторождении, что позволит организовать комплексный непрерывный мониторинг массива горных пород и более эффективно исследовать геомеханические и геодинамические процессы на больших глубинах. Также получены сравнительные данные записей двух систем, находящиеся на удалении около 500 км друг от друга (Николаевское месторождение, г. Дальнегорск и МЭС «м. Шульца», г. Владивосток), на которых зафиксирована регистрация удаленного землетрясения в Турции.

Введение

Лазерный деформометр многократно подтвердил свое значение как измерительного инструмента для регистрации колебаний деформационного поля Земли в широком частотном и динамическом диапазонах на уровне фоновых колебаний. Однако поверхностные и приповерхностные установки [3] обладают рядом недостатков и особенностей эксплу-

атации, которые затрудняют проведение измерений, зависимы от метеоусловий, времени года. Это связано с расположением их вблизи «шумящей» поверхности, подверженной колебаниям, вызванными ветровой нагрузкой, значительными перепадами температуры. Эти факторы могут быть минимизированы при размещении оборудования глубоко под землей, для чего удобно с экономической точки зрения использовать отработанные горные выработки.

В результате выполнения проекта для непрерывного геодинамического мониторинга массива горных пород Николаевского месторождения был установлен лазерный деформометр с автоматической системой сбора, передачи и обработки данных прецизионных измерений смещений земной коры и организован комплекс мер для непрерывного геодинамического мониторинга [4].

Обсуждение результатов

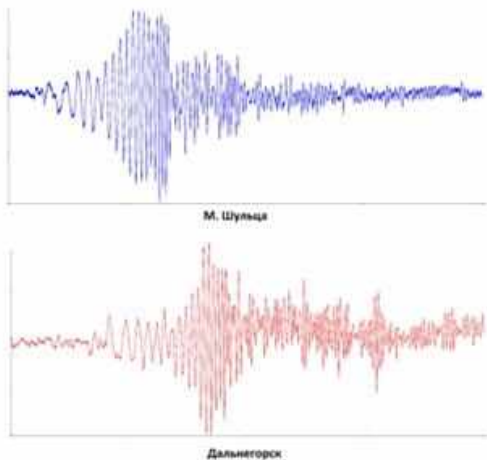
При проведении измерений все данные записывались в виде часовых файлов с частотой 500 Гц, что позволило исследовать сигналы с частотой до 250 Гц. В дальнейшем проводилась их обработка на основе современных методов спектрального и статистического оценивания. Выполненная обработка позволила выявить некоторые особенности деформаций земной коры в зоне расположения лазерного деформометра.

В целом, обобщение первичных экспериментальных данных на основе записей деформометра показало следующее.

В низкочастотной области наблюдаются колебания с периодом около 10-15 с., амплитуда которых изменяется со временем и присутствующие практически на всех участках записей лазерного деформометра. Постоянное присутствие в записях лазерного деформометра колебаний с периодом порядка 10-15 с. указывает на местное их происхождение, которое может быть обусловлено собственными частотами геоблоков, слагающих рудничное поле Николаевского рудника.

В высокочастотной области спектра выделяются источники с частотами на уровне 49, 98 и 132 Гц, которые обусловлены работой горных машин и оборудования. Также установлены «резонансы» на частотах около 150 и 199 Гц, связанные либо с собственными частотами отдельных участков шахты, либо с собственными частотами минигеоблоков горных пород.

В качестве примера правильной работы системы, хочется привести землетрясение, произошедшее в Турции в феврале 2023 года, которое было зафиксировано большим числом приемных систем по всему миру, в том числе и Николаевским деформометром.



**Рисунок 2 – Запись
землетрясения в Турции
6 февраля 2023 г.**

Данный рисунок свидетельствует о практически полном соответствии записанных сигналов, правильном функционировании нового инструмента для измерения деформационных процессов, происходящих в верхнем слое земной коры. Планируется оснащение установки несколькими цифровыми датчиками температуры и давления для контроля и учета вариаций этих параметров микроклимата вокруг прибора в данных регистрируемых деформаций.

Заключение

Исходя из полученных данных и проведенных испытаний делается вывод, что установка подземного Дальнегорского лазерного деформометра вполне готова для проведения научных исследований фундаментального характера, включающие изучение деформационного поля Земли в широком диапазоне частот на уровне фоновых колебаний. Кроме того, есть и прикладные задачи для ООО «Дальполиметалл», заключающиеся в изучении последствий взрывных работ для действующих выработок, прогнозировании горных ударов и других динамических процессов, имеющих влияние безопасность горнодобывающей деятельности человека.

Благодарности

Исследования проводились с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием «Центр обработки и хранения научных данных Дальневосточного отделения Российской академии наук», финансируемого Российской Федерацией в лице

Список литературы

1. Оценка геомеханического состояния горнорудного массива по данным сейсмоакустического мониторинга на удароопасных месторождениях / М.И. Рассказов, А.А. Терешкин, Д.И. Цой [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – №12-1. – С. 167-182. – DOI 10.25018/0236_1493_2021_121_0_167. – EDN FFOLBS.
2. Jiakun Lv, Zhijun Wan, Yongjie Yang, Junhui Wang, Yuan Zhang, Sifei Liu. Failure characteristics and stability control technology of dynamic pressure roadway affected by the mining activity: A case study, Engineering Failure Analysis. Volume 131, 2022, 105857, ISSN 1350-6307, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105857>
3. Разработка и исследование системы контроля состояния приборов лазерно-интерференционного геофизического комплекса / В.А. Швец, Г.И. Долгих, А.А. Плотников, С.В. Яковенко // Измерительная техника. – 2021. – №3. – С. 22-28. – DOI 10.32446/0368-1025it.2021-3-22-28. – EDN UQGHTe.
4. Николаевский лазерный деформометр / Д.И. Цой, В.А. Луговой, И.Ю. Рассказов [и др.] // Физика геосфер: Материалы докладов, Владивосток, 11–15 сентября 2023 года. – Владивосток: Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, 2023. – С. 390-394. – DOI 10.34906/9785604968383.385. – EDN HYUNXL.

УДК 622.83

ОБРАТНЫЙ АНАЛИЗ В ЗАДАЧАХ РЕКОНСТРУКЦИИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ РАЗЛИЧНОГО МАСШТАБНОГО УРОВНЯ

Назарова Л.А., Назаров Л.А., Панов А.В., Скулкин А.А.

ИГД СО РАН, г. Новосибирск

Введение. Геомеханическое обоснование технологий выемки залежей полезных ископаемых, прогноз горных ударов на основе обработки данных шахтных сейсмических наблюдений, форвардная оценка напряжений отрабатываемых участков месторождения для выявления зон потенциальных разрушений (очагов динамических событий) и оптимизации планов горных работ [1] – вот далеко не полный перечень проблем, решение которых требует детальной информации о напряженно-деформированном состоянии породного массива в окрестности объектов горнодобывающей промышленности. Такая информация может

быть получена на основе мультипараметрического анализа геомеханической модели, одним из ключевых элементов которой является напряжения в природном поле (либо вне зоны влияния исследуемого геотехнического объекта), необходимые для выбора пространственной ориентации расчетной области R и формулировки граничных условий на ∂R . Для количественной оценки параметров природного поля напряжений (величина и ориентация главных компонент) в настоящее время используют следующие подходы: измерение напряжений *in situ* [2,3] инструментальными методами; интерпретация косвенных (геодезических, сейсмотектонических, геолого-структурных) данных [4,5]; предположения (нередко без веской аргументации) о значении коэффициента бокового отпора k [1,6] (гипотеза Динника (1925) об отсутствии горизонтальных деформаций вне зоны влияния горных работ $k=v/(1-v)$, v – коэффициент Пуассона; гипотеза Гейма (1878) о гидростатическом поле внешних напряжений $k=1$). Первые два подхода могут быть реализованы при валидации геомеханической модели целевого объекта методами обратного анализа [7] посредством отыскания минимума целевой функции, например, следующей структуры

$$\Phi(\vec{v}) = \sum_{i,j} \left(1 - \frac{S_i(\vec{x}_j, \vec{v})}{S_i^0(\vec{x}_j)} \right)^2, \quad (1)$$

где $\vec{v}$ – вектор искомых параметров природного поля напряжений; S_i^0 – результаты измерения напряжений в пунктах с координатами $\vec{x}_j$.

Этот подход реализован на примере действующего горнотехнического объекта - Соликамского рудника (СР), ПАО «Уралкалий» [7].

Реконструкция напряженного состояния массива по данным натуральных экспериментов. Верхняя граница соляной толщи СР (мощность до 500 м) залежи соответствует отметке 350 м, при средней плотности пород $\rho=2,0-2,6$ г/см³ вертикальное напряжение S_v здесь составляет 7-9 МПа.

В пределах шахтного поля СР в зоне влияния горных работ были выполнено 119 определений напряжений (от 10 до 12 замеров в каждом из 10 пунктов, рис. 1а) методом множественного измерительного гидро-разрыва, фрагмент полученных данных приведен в табл. 1. Для отыскания параметров поля напряжений вне зоны влияния горных работ (максимального S_H и минимального S_h горизонтальных напряжений, а также угла α – азимута S_H) была построена целевая функция Φ , в которой $\vec{v}=(S_H, S_h, \alpha)$, а $j=1, \dots, 119$.

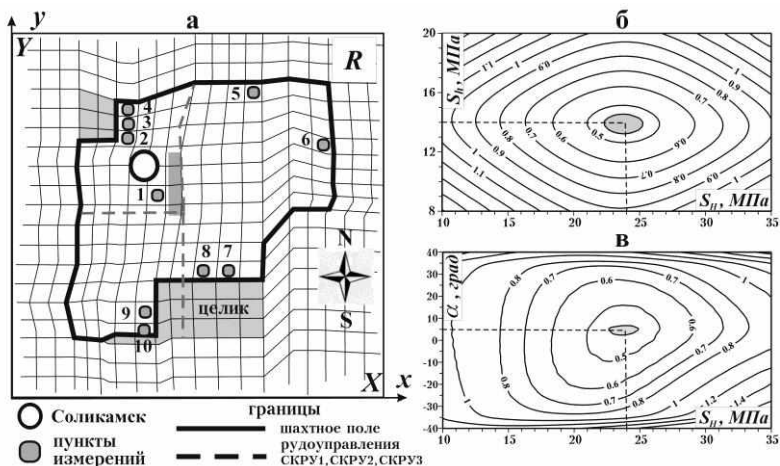


Рисунок 1 - Схема Соликамского рудника, фрагмент сетки КЭ (а);
изолинии сечений целевой функции $\Phi(S_n, S_{na})$ (б) и $\Phi(S_n, a_{n14})$ (в)

Таблица 1

Данные измерений напряжений в различных пунктах

пункт	ψ , град	D , м	S_1^0 , МПа	S_2^0 , МПа
7	30	8.0	12.4	19.0
7	30	8.5	10.2	16.4
8	60	7.0	10.7	16.4
8	0	9.0	10.0	18.8
8	30	10.0	10.2	17.1

Примечание. ψ – азимут измерительной скважины, D – расстояние от контура обнажения до устья трещины гидроразрыва, S_1^0 и S_2^0 – минимальное и максимальное напряжения в «точке» изменения.

Таблица 2

Физические свойства пород.

Порода	модуль Юнга, МПа	ν	ρ , г/см ³
Сильвинит	5100	0.3	2.1
Вмещающие	7200	0.3	2.6

Расчет напряжений проводился в рамках разработанной и с использованием оригинального МКЭ кода реализованной геомеханической модели рудника (рис. 1а, размеры прямоугольной расчетной области R в плане $X=100$ км, $Y=88$ км; шахтного поля 20×14 км, сетка конечных разрежена в 5 раз), которая учитывала основные геометрические

особенности выработанного пространства и физические свойства пород (табл. 2). На ∂R задавались следующие условия:

$$\sigma_{xx}(0,y)=\sigma_{xx}(X,y)=A+B\cos 2\alpha,$$

$$\sigma_{xx}(x,0)=\sigma_{yy}(x,Y)=A-B\cos 2\alpha,$$

$$\sigma_{xy}(0,y)=\sigma_{xy}(X,y)=\sigma_{xy}(x,0)=\sigma_{xy}(x,Y)=B\sin 2\alpha$$

где $A=0,5(S_H+S_h)$, $B=0,5(S_H-S_h)$, σ_{xx} , σ_{xy} , σ_{yy} – компоненты тензора напряжений в декартовой системе координат (x, y) .

На рис. 1б,в показаны изолинии целевой функции (нормированы на максимальное значение в области изменения аргументов) в различных сечениях (серым цветом тоном выделены области эквивалентности). Можно видеть, что Φ унимодальная, точка минимума $S_H=24$ МПа, $S_h=14$ МПа, $\alpha=5^\circ$ – искомые параметры поля напряжений вне зоны влияния геотехнического объекта. Поскольку оказалось, что $S_v < S_h < S_H$ то преобладающий тип природного поля напряжений – взбросовый.

Заключение. На примере действующего горного предприятия реализован метод валидации геомеханической модели, основанный на обратном анализе данных измерения напряжений *in situ*. Установлено, что природное поле напряжений за пределами геомеханического пространства Соликамского калийного рудника характеризуется преобладанием горизонтального сжатия.

Работа выполнена в рамках проекта НИР (номер гос. рег. 124020700085-5).

Список литературы

1. Турчанинов И.А, Иофис М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород. Л.: Недра. 2-ое издание. 1989. 488 с.
2. Hudson J.A., Harrison J.A. Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles. 4th Edition. Pergamon. 2005. Vol. I 444p. Vol. II 506 p.
3. Zang A., Stephansson O. Stress Field of the Earth's Crust. Springer. 2010. 322 p.
4. Nazarova L.A. Estimating the stress and strain fields of the Earth's crust on the basis of seismotectonic data. J. Min. Sci. 1999. 35(1): 26-35.
5. Nazarov L.A., Nazarova L.A. A geophysical data interpretation method for the reconstruction of the stressed-strained state of a rock massif. Doklady Earth Sci. 2004. 395(3): 429-432.
6. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений. 1994. М.: Недра. 382 с.
7. Назарова Л.А., Назаров Л.А., Панов А.В., Скулкин А.А. Особенности построения геомеханических моделей крупномасштабных природных и геотехнических объектов на основе прямых и косвенных данных о полях напряжений. Динамические процессы в геосферах. 2024. Т. 16. № 3. С. 92-101.

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ВЫБРОСООПАСНОСТИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ С РОСТОМ ГЛУБИНЫ НА ШАХТАХ ПО «ДОНЕЦКУГОЛЬ»

Радченко А.Г., Дыщук М.Ю., Салий С.Г.

ФГБНУ «РАНИМИ», г. Донецк

Состояние вопроса.

С ростом глубины ведения горных работ в Донбассе наблюдаются следующие тенденции: а) усложнение горно-геологических условий разработки угольных пластов; б) рост природной газоносности пластов и горного давления; в) повышенная тектоническая нарушенность горного массива; г) возрастают потенциальная энергия угольных пластов и вмещающих пород. В результате усложнения горно-геологических условий разработки угольных пластов в шахтах происходят следующие газо-динамические явления: а) суфляры, внезапные разломы почвы и кровли угольных пластов с повышенным газовыделением; б) внезапные выбросы породы и газа; в) внезапные выбросы угля и газа и т. д. В связи с этим, согласно данным работы [1], по производственным объединениям шахт Донбасса был выполнен статистический анализ внезапных выбросов угля и газа, произошедших за период 1982–2006 гг. Анализ показал, что самыми выбросоопасными являются Центральный и Донецко-Макеевский геолого-промышленные районы, а наибольшее количество внезапных выбросов зафиксировано на шахтах производственного объединения «Донецкуголь».

Целью настоящей работы является изучение особенностей изменения выбросоопасности угольных пластов с ростом глубины разработки на шахтах ПО «Донецкуголь». Прежде всего необходимо было выяснить, как изменяются количество внезапных выбросов угля и газа – $Q_{\text{уг}}$, в тоннах с ростом глубины. К важным факторам, влияющим на степень выбросоопасности угольных пластов, следует отнести:

- а) степень метаморфизма углей;
- б) глубина залегания пластов – H , м;
- в) геологические и тектонические условия разработки пластов.

Для установления влияния глубины залегания угольных пластов на проявления их выбросоопасности по данным [1] был выполнен **статистический анализ внезапных выбросов угля и газа**, произошедших на шахтах ПО «Донецкуголь» за период 1946–2006 гг. С целью выполнения объективного статистического анализа шахтные поля

ПО «Донецкуголь» были разделены на следующие части: 1) западную; 2) центральную и 3) восточную. В западной части наиболее выбросоопасным является пласт h_7 на шахтах: № 17-17 бис, №29 и им. А.А. Скочинского.

На шахте № 17-17 по пласту h_7 было зафиксировано: количество выбросов – $n=63$; минимальная глубина появления внезапных выбросов составила – $H_{\min}=519$ м; при этом интенсивность выброшенного угля равнялась – $Q_{\text{уг.}}=450$ т; весовой выход летучих веществ составил – $V^{\text{daf}}=33\text{--}30\%$.

На шахте № 29 по пласту h_7 было зафиксировано: $n=26$; $H_{\min}=519$ м, при этом – $Q_{\text{уг.}}=10$ т; максимальная интенсивность выброшенного угля составила $Q_{\max}=400$ т при $H=895$ м.

На шахте им. А.А. Скочинского по пласту h_7 (h_6^1) было зафиксировано: $n=15$; $H_{\min}=909$ м, а $Q_{\text{уг.}}=15$ т; $V^{\text{daf}}=30\%$; $Q_{\max}=2000$ т при $H=1050$ м.

Средняя часть шахтных полей характеризуется более низкой степенью выбросоопасности. Например, на шахте им. М. Горького по пласту h_7 было зафиксировано 3 внезапных выброса; при этом $H_{\min}=480$ м и $Q_{\text{уг.}}=10$ т; а $Q_{\max}=25$ т при $H=764$ м; $V^{\text{daf}}=24\text{--}22\%$.

На шахте № 7-8 им. М.И. Калинина по пласту h_7 зафиксирован 1 выброс; при этом $H_{\min}=805$ м и $Q_{\text{уг.}}=10$ т; $V^{\text{daf}}=17\%$. На этой же шахте по пласту h_8 было зафиксировано: $n=45$; $H_{\min}=348$ м и $Q_{\text{уг.}}=40$ т; $Q_{\max}=200$ т при $H=462$ м.

На шахте им. М.И. Калинина было зафиксировано: а) по пласту h_7 $n=24$; $H_{\min}=620$ м и $Q_{\text{уг.}}=60$ т; $Q_{\max}=450$ т при $H=876$ м; б) по пласту h_8 было зафиксировано: $n=6$; $H_{\min}=758$ м и $Q_{\text{уг.}}=100$ т; $Q_{\max}=250$ т при $H=820$ м.

К восточной части шахтных полей ПО «Донецкуголь» относятся шахты: Мушкетовская, Запореваляная-1, им. газеты «Социалистический Донбасс» - позже (Запореваляная -2), «Глубокая» и им. 60-летия Советской Украины («Восточная»). Восточная часть шахтных полей характеризуется повышенной степенью газодинамической активности угольных пластов.

Так, на шахте Глубокая зафиксировано всего 232 внезапных выброса, из них: а) по пласту h_8 – $n=105$; $H_{\min}=386$ м и $Q_{\text{уг.}}=6$ т; а $Q_{\max}=480$ т при глубине $H=591$; $V^{\text{daf}}=14\text{--}13\%$; б) по пласту h_4 – $n=120$; $H_{\min}=586$ м и $Q_{\text{уг.}}=55$ т; $Q_{\max}=160$ т при $H=660$ м.

На шахте им. 60-летия Советской Украины было зафиксировано наибольшее количество внезапных выбросов по пласту h_8 – $n=273$; $H_{\min}=393$ м и $Q_{\text{уг.}}=25$ т; а $Q_{\max}=780$ т при глубине $H=570$; $V^{\text{daf}}=14\text{--}13\%$. Природная газоносность пласта составляла $X_{\text{пр}}=28\text{--}31$ м³/т. с. б. м.

Анализ литературы [2] показал, что степень метаморфизма углей и глубина залегания угольных пластов оказывают существенное влияние на формирование и проявление выбросоопасности угольных пластов. С целью учета влияния этих факторов по данным [1] был выполнен статистический анализ внезапных выбросов угля и газа, произошедших на шахтах ПО «Донецкуголь» за период 1946–2006 гг. Результаты статистического анализа приведены в табл. 1.

В результате выполненных аналитических и статистических исследований [2, 3] установлено, что с ростом степени метаморфизма углей с запада на восток существенно возрастает количество внезапных выбросов угля и газа, растет степень их выбросоопасности. Из табл. 1 следует, что в пределах шахтных полей ПО «Донецкуголь» с ростом глубины наблюдаются следующие тенденции: 1) число внезапных выбросов уменьшается; 2) интенсивность выброшенного угля - $Q_{\text{уг}}$ возрастает.

Таблица 1

Изменение количества внезапных выбросов угля и газа по группам их метаморфизма и с ростом глубины на шахтах ПО «Донецкуголь»

Диапазон изменения глубин, м	Группы метаморфизма углей					Сумма выбросов, ед.
	2	3	4	5	6	
	Диапазон изменения показателя V^{daf} , %					
	35,0– 29,1	29,0 – 25,1	25,0– 18,1	18,0– 13,1	13,0– 9,0	
301– 600	1	1	78	208	–	288
601–900	69	–	19	363	5	456
901–1200	49	–	1	34	–	84
> 1200	11	–	–	–	–	11
Всего:	130	1	98	605	5	839

Выводы. Обзор литературы [1, 2, 3], выполненные аналитические и статистические исследования показали следующее:

1) степень метаморфизма угольных пластов и глубина их залегания определяют природную газоносность пластов и степень их выбросоопасности;

2) в пределах шахтных полей ПО «Донецкуголь» с ростом степени метаморфизма углей возрастает степень их выбросоопасности;

3) тектонические нарушения в одних случаях способствуют дегазации угольных пластов и снижению степени их выбросоопасности, а в других случаях приводят к росту природной газоносности и степени их выбросоопасности;

4) анализ 839 внезапных выбросов угля и газа, произошедших на шахтах ПО «Донецкуголь», показал, что с ростом глубины число

внезапных выбросов уменьшается, а интенсивность выброшенного угля - $Q_{уг}$ возрастает.

Список литературы

1. Волошин, Н.Е. Выбросы угля, породы в шахтах Донбасса в 1906–2007 гг.: справочник [Текст] / Н.Е. Волошин, Л.А. Вайнштейн, А.М. Брюханов и др. // Донецк: СПД Дмитренко, 2008. – 920 с.

2. Минеев, С.П. Горные работы в сложных условиях на выбросоопасных угольных пластах: [монография], [Текст] / С.П. Минеев, А.А. Рубинский, О.В. Витушко, А.Г. Радченко // Донецк: ООО «Східний видавничий дім», 2010. - 603 с.

3. Радченко, А.Г. Закономерности проявления внезапных выбросов угля и газа с глубиной [Текст] / А.Г. Радченко, В.А. Маркин, В.Д. Ашихмин, А.А. Радченко // Сб. научн. трудов Донбасского государственного технического Университета. Лисичанск, ДонГТУ, выпуск 1 (44), 2015. – С. 59-66.

УДК 622.831.322:63

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ВЫБРОСООПАСНОСТИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ ПО ПЛОЩАДЯМ НА ШАХТАХ ПО «ДОНЕЦКУГОЛЬ»

Радченко А.Г.¹, Дыщук М.Ю.¹, Радченко А.А.²

¹ФГБНУ «РАНИМИ» г. Донецк

²ООО «ДОКА», г. Таганрог

Состояние вопроса.

По данным работы [1] для условий угольных шахт Донбасса по производственным объединениям был выполнен следующий статистический анализ: 1) внезапных выбросов угля и газа, произошедших за период 1982–2006 гг.; 2) выбросов, зафиксированных при ведении буровзрывных работ в режиме сотрясательного взрывания - (СВ), за период 1951–2006 гг. Результаты анализа приведены в табл. 1.

Таблица 1

Статистика выбросов угля и газа по производственным объединениям в условиях шахт Донбасса

Производственное объединение	<u>Внезапные</u> СВ	Производственное объединение	<u>Внезапные</u> СВ
1	2	3	4
Дзержинскуголь	11/ 15	Донбассантрацит	49 / 176
Артемуголь	78 / 110	Краснодонуголь	7 / 64
Орджоникидзеуголь	64 / 289	Шахтерскантрацит	5 / 173
Донецкуголь	493/ 3297	Ростовуголь	– / 14

1	2	3	4
Макеевуголь	15 / 260	Гуковуголь	– / 76
Луганскуголь	18 / 88	Красноармейскуголь	8 / –
Стахановуголь	5 / 22	Октябрьуголь	3 / 221
Первомайскуголь	1 / 13	Всего: внезапные / СВ	756 / 4818

Из табл. 1 следует, что самыми выбросоопасными являются Центральный и Донецко-Макеевский геолого-промышленные районы, а наибольшее количество выбросов зафиксировано в условиях ПО «Донецкуголь», $n=3790$. Поэтому, **целью настоящей работы** является выяснение закономерностей изменения выбросоопасности угольных пластов по площадям на шахтах ПО «Донецкуголь»

Геологические и тектонические процессы, происходящие ранее в земных недрах, способствовали неравномерному распределению физико-механических, газокинетических свойств геологических слоев и их напряженно-деформированного состояния. Ранее были разработаны новые модели формирования и проявления внезапных выбросов угля и газа в шахтах Донбасса: а) на региональном уровне была представлена физико-химическая модель; б) на локальном и текущем уровнях была рассмотрена геомехано - газотермодинамическая модель [2]. Согласно указанным моделям, к основным факторам, участвующим в формировании и проявлении внезапных выбросов угля и газа в шахтах Донбасса, относятся: 1) степень метаморфизма углей – S_m ; 2) глубина залегания пластов – H, m ; 3) геологические факторы - (условия осадконакопления, процессы флюидизации); 4) тектонические процессы; 5) геомеханические процессы; 6) технологические процессы.

С учетом влияния выше указанных факторов по данным [1] был выполнен **статистический анализ внезапных выбросов угля и газа, произошедших на шахтах ПО «Донецкуголь»** за период 1946–2006 гг. Шахтные поля ПО «Донецкуголь» были условно разделены на три части: 1) западную; 2) центральную и 3) восточную части.

В западной части наиболее выбросоопасным является пласт h_7 на шахтах: №17-17 бис, №29 и им. А.А. Скочинского. На шахте №17-17 по пласту h_7 было зафиксировано: количество выбросов - $n=60$; глубина разработки - $H_{раз}=519-1029$ м; мощность пласта - $m=0,66-1,35$ м; углы падения $-\alpha=7-19^\circ$; весовой выход летучих веществ составил – $V^{daf}=33-30\%$; максимальная интенсивность выброса составила $Q_{max}=450$ т на глубине $H_b=519$ м.

На шахте №29 по пласту h_7 было зафиксировано: $n=26$; $H_{раз}=540-950$ м; $m=0,90-1,45$ м; $\alpha=8-12^\circ$; $V^{daf}=32-30\%$; $Q_{max}=480$ т при $H_b=838$ м.

На шахте им. А.А. Скочинского по пласту h_7 (h_6^1) было зафиксировано: $n=15$; $H_{\text{раз}}=900-1250$ м; $m=1,10-1,46$ м; $\alpha=8-17^\circ$; $V^{\text{daf}}=30\%$; $Q_{\text{max}}=2000$ т при $H_B=1050$ м.

Средняя часть шахтных полей характеризуется пониженной степенью выбросоопасности. Так, на шахте им. А.Ф. Засядько зафиксировано всего 22 внезапных выброса, из них: а) по пласту $m_3-n=9$; $H_{\text{раз}}=650-1345$ м; $m=1,60-2,30$ м; $\alpha=6-12^\circ$; $V^{\text{daf}}=35-34\%$; $Q_{\text{max}}=300$ т при $H_B=1343$ м.; б) по пласту $\ell_4 - n=1$; в) по пласту $\ell_1 - n=12$; $H_{\text{раз}}=1000-1320$ м; $m=1,80-1,90$ м; $\alpha=7-20^\circ$; $V^{\text{daf}}=34-33\%$; $Q_{\text{max}}=210$ т при $H_B=1320$ м.

На шахте 7-8 им. Калинина по пласту h_8 было зафиксировано: $n=45$; $H_{\text{раз}}=340-650$ м; $m=0,60-0,70$ м; $\alpha=8-12^\circ$; $V^{\text{daf}}=20-19\%$; $Q_{\text{max}}=200$ т при $H_B=462$ м.

На шахте им. Калинина по пласту h_7 было зафиксировано: $n=24$; $H_{\text{раз}}=700-1020$ м; $m=0,50-1,03$ м; $\alpha=12-22^\circ$; $V^{\text{daf}}=22-21$; $Q_{\text{max}}=200$ т при $H_B=903$ м.

В восточной части шахтных полей ПО «Донецкуголь» наблюдается повышенная степень газодинамической активности разрабатываемых угольных пластов. Так, на шахте им. газеты «Социалистический Донбасс» - позже (Заперевальная №2) по пласту h_8 было зафиксировано: $n=39$; $H_{\text{раз}}=700-970$ м; $m=0,65-0,74$ м; $\alpha=6-12^\circ$; $V^{\text{daf}}=15-14\%$; $Q_{\text{max}}=250$ т при $H_B=876$ м.

На шахте Глубокая зафиксировано всего 232 внезапных выброса, из них: а) по пласту $h_8 - n=105$; $H_{\text{раз}}=400-600$ м; $m=0,60-0,70$ м; $\alpha=6-12^\circ$; $V^{\text{daf}}=14-13\%$; $Q_{\text{max}}=480$ т при $H_B=591$; б) по пласту $h_4-n=120$; $H_{\text{раз}}=600-750$ м; $m=0,69-0,76$ м; $\alpha=5-15^\circ$; $V^{\text{daf}}=16-15$; $Q_{\text{max}}=160$ т при $H_B=660$ м.

На шахте им. 60-летия Советской Украины (Восточная) по пласту h_8 было зафиксировано наибольшее из всех разрабатываемых угольных пластов количество внезапных выбросов угля и газа – $n=273$; $H_{\text{раз}}=400-750$ м; $m=0,60-0,81$ м; $\alpha=6-12^\circ$; $V^{\text{daf}}=15-14\%$; $Q_{\text{max}}=780$ т при $H_B=570$ м; природная газоносность пласта составляла $X_{\text{пр}}=28-31$ м³/т. с. б. м.

В пределах шахтного поля угольный пласт h_8 относится к особо выбросоопасным, склонен к самовозгоранию. Непосредственная кровля пласта h_8 представлена горизонтально слоистым алевролитом мощностью до 1,5 м; основной кровлей является также алевролит, мощность слоя составляет от 2,0 м до 25,0 м. Основная кровля характеризуется способностью к зависанию на расстоянии 15-22,0 м от плоскости очистных забоев, что является причиной роста величины опорного давления в призабойной части лав и проявляется в повышенной степени выбросоопасности угольного пласта h_8 .

К факторам, способствующим формированию высокой степени выбросоопасности пласта h_8 , следует отнести также: а) высокую

тектоническую нарушенность шахтного поля и наличие зон дробления горного массива; б) наличие «зеркал скольжения» и участков препарированного угля непосредственно по пласту h_8 ; в) высокую природную газоносность пласта h_8 .

Опыт безопасного ведения горных работ на нарушенных выбросоопасных угольных пластах в условиях шахт ПО «Донецкуголь» подробно был рассмотрен в работе [3].

Выводы. Анализ 835 внезапных выбросов угля и газа, произошедших на шахтах ПО «Донецкуголь» за период 1946–2006 гг., показал следующее:

а) с запада на восток возрастает степень метаморфизма углей, растут их природная газоносность, сорбционная способность, скорость газоотдачи, крепость, способность накапливать значительное количество упругой энергии; б) рост степени метаморфизма углей и тектонической нарушенности шахтных полей в восточном направлении является причиной высокой степени выбросоопасности угольных пластов h_8 и h_{10} на шахтах Глубокая и им. 60-летия Советской Украины.

Список литературы

1. Волошин, Н.Е. Выбросы угля, породы в шахтах Донбасса в 1906–2007 гг.: справочник [Текст] / Н.Е. Волошин, Л.А. Вайнштейн, А.М. Брюханов и др. // Донецк: СПД Дмитренко, 2008. – 920 с.

2. Радченко, А.Г. Новые модели формирования выбросоопасных зон в угольных пластах на региональном и текущем уровнях [Текст] / А.Г. Радченко, Н.Н. Киселев, С.М. Федотов, Т.А. Решетняк, А.А. Радченко // Журнал теоретической и прикладной механики. – Донецк, ДонНУ, 2021. – №3 (76). С. 53–68.

3. Минеев, С.П. Горные работы в сложных условиях на выбросоопасных угольных пластах: [монография], [Текст] / С.П. Минеев, А.А. Рубинский, О.В. Витушко, А.Г. Радченко // Донецк: ООО «Східний видавничий дім», 2010. – 603с.

УДК 517.443:550.34.094:550.834

НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК ПАССИВНЫХ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Грицаенко А.Ю., Мартынов Г.П., Туманов В.В., Донченко Э.В.

ФГБНУ «РАНИМИ», г. Донецк

В работе приведены результаты экспериментальных исследований с использованием метода пассивного микросейсмического мониторинга

при проведении опытных работ по обнаружению зон трещиноватости и скоплений метана на угольных шахтах в рамках выполнения государственного задания по теме № FRSR 2023-0007. Наряду с анализом имеющихся геологических материалов в районе исследований особое внимание уделено методам анализа спектров микросейсмических колебаний, записанных различными модификациями сейсмических датчиков СМ-3КВ. При этом исследована взаимосвязь спектральных характеристик микросейсм со скоростными характеристиками зон повышенной трещиноватости и газоносности массива пород, предварительно установленных по данным геофизического исследования скважин.

Работы по изучению угольных месторождений Донбасса с помощью сейсморазведки были начаты ещё в 1970-х годах. Основанием для их развития стало то, что разрывные нарушения пластов с относительным смещением блоков пород величиной менее 10 метров практически не выявляются данными разведочного бурения. При изучении кернового материала помимо тектонического строения производится оценка трещиноватости горных пород и выделение систем трещин, но при наклонном залегании пород разрешающая способность геологоразведки существенно падает [1, 2].

Непредвиденное вскрытие коллекторов метана при проведении подземных работ на шахтах в горном массиве приводит к внезапным выбросам газа и авариям [3]. Малозатратным геофизическим методом поиска скоплений метана является мониторинг низкочастотного сейсмического фона, который позволяет исследовать пространственные характеристики газоносных трещинных структур. Это возможно благодаря тому, что спектр естественного низкочастотного сейсмического фона тектонических структур с дизъюнктивной нарушенностью в зонах динамического влияния разломов существенно отличается от спектра относительно однородных ненарушенных участков породы [4].

В качестве сейсмоприёмников в работе использованы чувствительные широкополосные датчики типа СМЗ-КВ с малым уровнем собственных шумов. При этом микросейсмические записи упругих колебаний горных пород почти всегда зашумлены всевозможными помехами природного и техногенного происхождения, что затрудняет выделение малоамплитудных сигналов и определение их частот [5].

Для достоверного выделения фоновых значений естественных микросейсм используется алгоритм усреднения амплитудных спектров сигналов, когда запись разделяется на блоки, для каждого из которых посредством преобразования Фурье вычисляются и усредняются мгновенные амплитудные спектры [6-7]. Хотя такая предобработка данных пассивного мониторинга позволяет отфильтровать паразитные квазигармонические сигналы, проблемным остаётся выделение и локализация

на фоне естественного шумового фона низкоэнергетических событий, порождаемых коллекторами метана [8]. Установлено, что существует зависимость между скоростями упругих волн (сейсмической жёсткостью массива) и амплитудами спектра на разных частотах [9,10]. Благодаря этому становится возможным выделение нормальной составляющей микросейсмического поля, в спектрах которого прослеживается корреляция с шахтными выработками или же отдельными участками трещиноватости пород в приразломных зонах.

На рис. 1 показаны восстановленные синтетические АЧХ микросейсмического фона, полученные посредством обработки многочасовых наблюдений в разных точках шахтного поля. Видно, что отчётливая характеристика протяжённых аномалий проявляется в диапазоне частот 2-4Гц. В более низкочастотной области 0,5-2Гц, как и в более высокочастотной 4-30Гц, поведение семейств АЧХ повторяется.

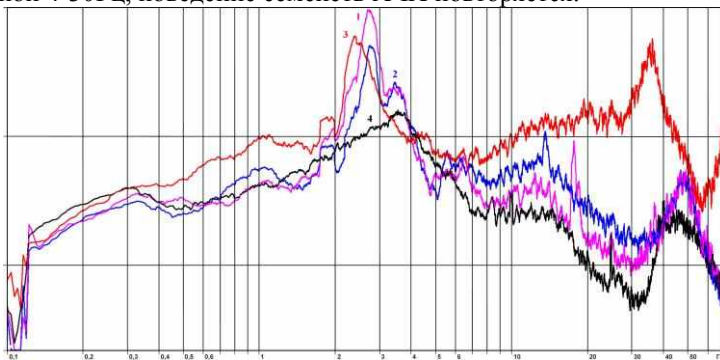


Рисунок 1 - Восстановленные АЧХ микросейсмических сигналов естественного фона на границах подработанного угленородного массива и тектонического разлома (кривые 1-3). АЧХ микросейсмического фона ненарушенного участка массива вдали от регионального надвига (кривая 4)

Список литературы

1. Анциферов А.В. Газоносность угольных месторождений Донбасса. Монография / А.В. Анциферов, М.Г. Тиркель, М.Т. Хохлов и др. – Киев: Наукова думка, 2004. – 232 с.
2. Анциферов А.В. Теория и практика шахтной сейсморазведки. Донецк, 2003. – 312 с.
3. Иванов Л.А. Скоростные параметры аномального скопления метана определенные по петрофизическим данным / Л.А. Иванов // Труды РАНИМИ: сб. науч. тр. – Донецк, 2023. – №. 22-23 (37-38) – С. 50-60.
4. Иванов Л.А. Структурно-геодинамические предпосылки использования микросейсм для поиска аномальных скоплений метана / Л.А. Иванов,

В.В. Туманов, А.В. Савченко // Труды РАНИМИ: сб. науч. тр. – Донецк, 2022. – № 16-17 (31-32). – С. 46-59.

5. Анциферов А.В. Помехи и шумы микросейсмических сигналов на примере мониторинговых наблюдений в Донбассе / А.В. Анциферов, В.В. Туманов, Л.А. Новгородцева, Г.П. Мартынов, Д.С. Бородин, Е.А. Ялпуга // Труды РАНИМИ: сб. науч. тр. – Донецк, 2023. – № 22-23 (37-38). – С. 137-147.

6. Сафронич И.Н. Повышение эффективности использования процессора обработки сигналов программы WSG в научно-исследовательской работе / И.Н. Сафронич, С.А. Красилов, С.И. Колесников, А.В. Савенков // Сборник материалов Восьмой Международной сейсмологической школы «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных». – Обнинск, 2013. – С. 372-385.

7. Сафронич И.Н. Выделение нормальной и аномальной составляющей сейсмического поля на урбанизованных территориях / И.Н. Сафронич // Материалы II Международной научно-практической конференции «Куражковские чтения». – Астрахань, 2023. – С. 397-401.

8. Мартынов Г.П. Анализ пассивных и активных сейсмических наблюдений на поле шахты «Калиновская-Восточная» / Г.П. Мартынов, В.В. Туманов, А.Ю. Грицаенко, Д.С. Бородин // Труды РАНИМИ: сб. науч. тр. – Донецк, 2024. – Т.1, № 3 (41). – С. 232 – 245.

9. Сафронич И.Н. Использование спектра Накамуры для зондирования пород в кровле докембрийского фундамента / И.Н. Сафронич // Сборник статей III Международного научно-исследовательского конкурса «Лучший исследовательский проект 2022». – Петрозаводск, 2022. – С. 114-124.

10. Данилов, К.Б. Выявление геологических неоднородностей в верхней части земной коры на основе анализа низкочастотных микросейсм (на примере Архангельской области): канд. дис. физ.-мат. наук: 25.00.10 / Данилов Константин Борисович // Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. Академика Н. П. Лаверова – Архангельск, 2017 – 181 с.

УДК 622.83:539.3

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСАДКИ КРОВЛИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЛАСТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Шиповский И.Е., Трофимов В.А.

ИПКОН РАН, г. Москва

Аннотация. Современные шахты характеризуются значительным увеличением протяженности и скорости подвигания очистных забоев. Выемочные работы и дренаж при добыче полезных ископаемых

перераспределяют напряжения в массиве, создавая зоны различного состояния горной породы и дневной поверхности. Это повышает геодинамическую активность и увеличивает риск опасных, включая катастрофические, проявлений, связанных с просадкой кровли. Для оценки рисков проведены численные расчеты с вариативными параметрами и обобщением результатов

Введение

Практика добычи угля демонстрирует, что изменение способа отработки увеличивает фронтальную скорость и производительность. Однако расчеты по действующим нормативам не всегда совпадают с фактическими разрушениями кровли. Поэтому расчет напряженно-деформированного состояния горных пород при разработке высокопродуктивных угольных пластов важен для безопасности подземных работ. В данной работе используется эволюционное моделирование накопления повреждений, позволяющее определить уровни обрушения кровли при различных скоростях фронта: над выработкой образуются зоны растягивающих напряжений, и при достижении критических значений происходит разрушение пород кровли трещинами. Численное моделирование способствует контролю увеличения разломов и отслеживает динамику разрушения угольного пласта, выявляя характерное состояние кровли и особенности деформации [1-3]. Используемый в работе метод SPH [4, 5] предпочтителен по сравнению с методами конечных элементов и разностей, так как позволяет смоделировать весь процесс движения с сохранением непрерывности, включая накопление повреждений и обрушение.

Ассоциативный и неассоциированный законы пластического течения

В основе математического моделирования поведения горных пород при техногенных воздействиях заложены фундаментальные законы механики. Ассоциативный закон пластического течения предполагает, что направление пластической деформации определяется градиентом функции пластического потенциала, совпадающего с функцией твердости (критической поверхностью напряжений). Это приводит к симметричным отношениям между напряжениями и деформациями.

Однако в реальных условиях горных пород возникают ситуации, когда ассоциативные модели не могут адекватно описать сложные механизмы деформации. Неассоциированный же закон пластического течения допускает наличие различий между функцией пластического потенциала и функцией твердости, что позволяет учитывать такие явления, как различная вязкость при растяжении и сжатии, асимметричное поведение при различных направлениях деформации и другие нелинейные эффекты.

Описание больших деформаций при динамических воздействиях

При техногенных воздействиях (например, выемка породы, взрывные работы) горные породы подвергаются быстрым и значительным деформациям. Для моделирования подобных процессов необходимо учитывать нелинейные характеристики материалов и их зависимость от скорости деформации.

Большие деформации характеризуются тем, что геометрические изменения материала значительны (значения деформаций превышают 1%), и поэтому необходимо использовать тензорные методы механики сплошных сред. В этом контексте уравнения механики представляются в форме тензоров, учитывающих как внутренние свойства материала, так и внешние воздействия.

Гиперболическая система квазилинейных дифференциальных уравнений

Моделирование динамических процессов в горных породах требует решения системы уравнений, полученных из законов сохранения массы, импульса и энергии. В случае больших деформаций и пластического течения такая система уравнений становится квазилинейной и гиперболической.

Гиперболическая система уравнений характеризуется тем, что информация распространяется в виде волн с конечной скоростью, что соответствует физической природе динамических процессов. Квазилинейность означает, что коэффициенты при производных зависят от состояния системы, что усложняет решение, но при этом сохраняется структура, позволяющая применять численные методы для нахождения приближенных решений.

Законы сохранения и связь между компонентами тензора скорости напряжений и перемещений

Основные законы, используемые при формулировке модели:

1. Закон сохранения массы обеспечивает непрерывность течения материала и влияет на плотность деформаций.
2. Закон сохранения импульса описывает динамику движения материала под действием внутренних и внешних сил.
3. Закон сохранения энергии учитывает тепловые эффекты и работу сил при деформации.

Связь между компонентами тензора скорости напряжений и компонентами вектора перемещений осуществляется через дифференцирование. Конкретно, скорость напряжений определяется производной от компонента напряжений по времени, которая, в свою очередь, зависит от производной от компонента перемещений по пространственным координатам. В неассоциированном пластическом течении эта связь

усложняется, так как направления и величины деформаций зависят от отдельных функций потенциалов, не совпадающих с твердостью.

Применение неассоциированного закона пластического течения

Использование неассоциированного закона пластического течения в описании больших деформаций позволяет более гибко моделировать поведение горных пород под воздействием сложных динамических нагрузок. Это включает:

- Учет разных механизмов пластического течения в различных направлениях деформации.
- Возможность моделирования асимметричных деформационных процессов.
- Повышение точности предсказаний поведения материала при экстремальных условиях.

При этом, применение гиперболической системы квазилинейных уравнений требует разработки специализированных численных методов для решения таких систем, учитывая сложность и нелинейность модели.

В рамках данной задачи необходимо определить компоненты упругих перемещений произвольной точки при подвигании забоя и компоненты тензора напряжений во всех точках массива.

Метод сглаженных частиц (SPH) был выбран для решения данной задачи как удобный для задач геомеханики с наличием больших деформаций геосреды. Суть данного метода заключается в разбиении массива на малые взаимосвязанные элементы, при этом их масса, плотность, положение, скорость и напряжение известны в любой момент времени. Использование сплайновой интерполяции вычисляются производные в дифференциальных уравнениях. Таким образом, каждый малый элемент массива является точкой интерполяции с известными параметрами деформируемой среды. Использование полученной интерполяции для получения численного решения во всей области интегрирования позволяет свести вычисление градиента к аналитической производной функции сглаживания.

Обсуждение результатов

Результаты расчета состояния кровли при подвигании забоя представлены на рис. 1.

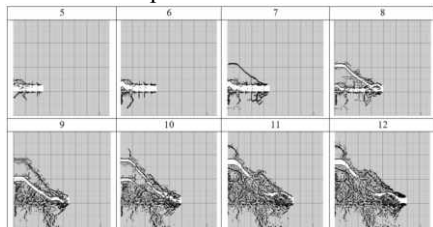


Рисунок 1 – Результаты расчета состояния и обрушения кровли при пошаговом подвигании выработки

Анализ предельных данных расчетов для различных прочностных характеристик породы позволил выявить зависимость значений критического долевого изменения состояния от протяженности выработанного пространства (рис. 2).

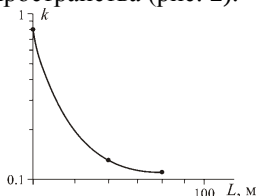


Рисунок 2 - Критический уровень состояния кровли в зависимости от протяженности выработки

Наблюдается согласованность картин образования магистральных трещин, определяющих процесс посадки кровли. Таким образом, выбранный модель расчета напряженно-деформированного состояния показал свою работоспособность для моделирования эволюции НДС горного массива вблизи выработки.

Заключение

Динамическая модель разрушения, использованная в данном исследовании, наглядно описывает процесс зарождения и развития трещин в горной породе, приводящих к её разрушению из-за ослабления взаимосвязи между частицами породы и образования новых свободных поверхностей в массиве. При превышении предела прочности породы происходит образование новых разрывов сплошности и массив разгружается. Связанные с фрагментацией сдвиговые и растягивающие напряжения приводят к снижению прочностных характеристик напряженно-деформированного состояния и накоплению дефектов внутри породы. Очевидно, что размер разрушаемого участка, помимо прочностных характеристик, также зависит от размера осваиваемого пространства. Другими словами, в данном случае ведения горных работ смещение локального блока в начальный период с увеличением длины рабочего пространства остается небольшим, то есть в пределах диапазона упругой деформации, а при достижении максимального диапазона устойчивости кровли нарушается. Рассчитанный уровень нарушенности может быть использован как фактическая посадочная величина конкретной шахты. Метод расчета, предложенный в данной работе, может быть использован для обоснования предложений по обеспечению безопасности разработки пласта.

Список литературы

1. Трофимов В.А., Филиппов Ю.А. Особенности формирования массопереноса метана в породах междупластья // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. - 2021. - Т. 3(123). - С. 71–78.

2. Захаров В.Н., Малинникова О.Н., Трофимов В.А., Филиппов Ю.А. Зависимость проницаемости угольного пласта от газосодержания и действующих напряжений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2016. - №2. - С. 16–25.

3. Захаров В.Н., Шляпин А.В., Трофимов В.А., Филиппов Ю.А. Геомеханика, разрушение горных пород Изменение напряженно-деформированного состояния углепородного массива при отработке угольного пласта // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2020. - №9. - С. 5–24.

4. Шиповский И.Е. Расчет хрупкого разрушения горной породы с использованием бессеточного метода // Науч. Вестник НГУ. - 2015 - Т. 1(145). - С. 76–82.

5. Малинникова О.Н, Трофимов В.А., Шиповский И.Е. Метод сглаженных частей в моделировании разрушения и обрушения кровли выработки // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2018. - Т. С49. - С. 464–475.

УДК 622.8

ОСОБЕННОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУХА В УГОЛЬНОМ ВЕЩЕСТВЕ

Трофимов В.А., Филиппов Ю.А., Докучаева А.И.

ИПКОН РАН, г. Москва

Самовозгорание угля в пластах — критический фактор риска для горной промышленности, ведущий к спонтанным пожарам и экологическим катастрофам. Рост глубины добычи усугубляет проблему, требуя точных методов прогнозирования [1]. Данное исследование направлено на разработку численной модели, интегрирующей термодинамические, фильтрационные и химические процессы для оценки условий самовозгорания.

Моделирование производилось в программе ANSYS Fluent, которая позволяет учитывать теплопроводность, конвекцию, диффузию кислорода, изменение пористости угля. Объектом моделирования был 3D фрагмент разрушенного угольного пласта, размеры которого: 10 метров в ширину, 5 метров в глубину и 1 метр в толщину.

Граничные и начальные условия для заданной области:

- температура окружающей среды 300 К,
- установившееся давление воздуха на границе Inlet 1.1 атм,
- давление нарастает от 1 атм до 1.1 атм за 0.5 с,
- давление воздуха и продуктов горения на границе Outlet 1.0 атм,
- доли компонентов входящего воздуха O_2 -23%, N_2 -77%,
- проницаемость угольного вещества – $1 \div 2D$.

Параметры угля:

- плотность: 1300–1500 кг/м³, пористость: 0.1–0.3;

- теплопроводность: 0.2–0.5 Вт/(м·К), теплоемкость: 1000–1500 Дж/(кг·К).

Для химических реакций окисления справедливо уравнение Аррениуса, определяющего скорость и интенсивность протекания реакций [2]:

$$k = A \cdot \exp^{-E_a / RT} \cdot [O_2]^n$$

где k – константа скорости реакции при температуре T ; A – предэкспоненциальный коэффициент (коэффициент Аррениуса); e – основание натурального логарифма; E_a – энергия активации реакции, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,31$ Дж/(моль·К).

$$A = 10^{13} - 10^{15} \text{ с}^{-1}, E_a = 10 - 100 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}, n \approx 0,5 - 1$$

Моделирование идет в режиме transient, что предполагает построение зависимостей изменения расчетных параметров во времени. В связи с этим решение состоит из ряда временных шагов, для чего задается число этих шагов и величина шага, что в конечном итоге определяет временной интервал построения решения.

Первые очаги возгорания возникают через 10–20 секунд в зоне контакта угля с кислородом (Inlet). Максимальная температура в зоне возгорания и горения: 2600 К (рис. 1).

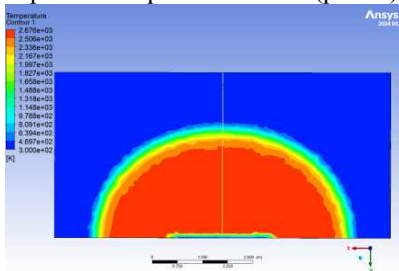


Рисунок 1 – Распределение температуры через 90000 с
красная зона — разогрев угля (2600 К),
синяя — исходная температура (300 К)

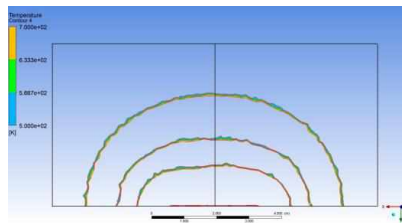


Рисунок 2 – Продвижение границы зоны высоких температур на разных временных этапах

Глубина распространения температурного фронта в угольный массив за счет теплопроводности за 25 часов (90 000 с) составляет ~ 4м от Inlet (рис. 2). В то же время, кислород полностью расходуется вблизи Inlet в реакции окисления углерода, ограничивая горение локальной

областью. При этом азот (N_2) к рассматриваемому моменту времени примерно равномерно распределяется по пласту, тогда как O_2 концентрируется у Inlet (рис. 3).

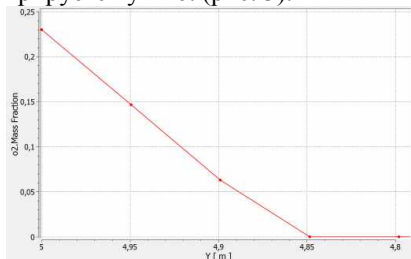


Рисунок 3 – Профиль массовой доли O_2 вдоль линии симметрии пласта

Возможность и скорость самовозгорания определяется доступом O_2 в угольное вещество, т.е. его проницаемостью и параметрами реакции окисления (A , E_a). Вариация этих параметров позволяет описать качественно различные процессы, протекающие в угле при взаимодействии его с кислородом воздуха. Теплопроводность угля способствует распространению нагрева в глубину пласта даже без горения.

Полученные результаты позволяют более детально, количественно проанализировать фильтрационные и термодинамические процессы при возникновении самовозгорания угля. В конечном итоге, сформулировать условия перехода нагревания угля в самовозгорание.

Список литературы

1. Докучаева А.И., Филиппов Ю.А. Численное моделирование процесса нагрева угля в тигле // Геохимия и петрография угля, горючих сланцев и битуминозных пород: мат. Рос. науч. конф., Сыктывкар, 02–05 октября 2023. – С. 36-37.
2. Xia T., Zhou F. et. al. Simulation of coal self-heating processes in underground methane-rich coal seams // International Journal of Coal Geology. – 2015. – № 141-142. – Р. 1-12.

УДК 622.8

ОСОБЕННОСТИ ДЕСОРБЦИИ МЕТАНА ИЗ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

**Ульянова Е.В., Малинникова О.Н.,
Пашичев Б.Н., Горшенков И.Н.**

ИПКОН РАН, г. Москва

Цель представленной работы состоит в определении зависимости скорости десорбции метана из шахтных пластов от микроструктурных

особенностей строения метанонасыщенных углей. Исследования были проведены на углях шахты им. С.М. Кирова, пласт Болдыревский Кузнецкого бассейна.

Количество метана определялось в призабойной области пласта по методике, разработанной в ИПКОН РАН [1]. Пробы угля отбирались со свежееобнаженной поверхности забоя. При определении газоносности в три герметичных контейнера примерно через 20 минут после обнажения поверхности пласта в забое подготовительной или очистной выработки отбираются куски угля размером 5 – 6 см. Контейнеры герметично закрываются. Первый объем метана Q_1 , выделившийся из угля в контейнер фиксируется через несколько минут после отбора пробы; второй – Q_2 через 4 – 8 часов в зависимости от времени доставки контейнера в лабораторию; третий – Q_3 , после размалывания в мельнице кусков угля до крупности 0,05 мм, при котором выделяется весь оставшийся в исследуемом образце метан. В таблице приведены средние значения по трем замерам, проведенные в разное время по мере отработки пласта Болдыревский.

Место отбора пробы	№ пробы	Дата отбора	Wa, %	A _Г , %	Q_1 , м ³ /т	Q_2 , м ³ /т	Q_3 , м ³ /т	Q_{Σ} , м ³ /т
Лава 24-63, 198 ПК ВШ	256	08.04.21	0,48	3,5	0,37	0,2	8,9	9,4
Конв. печь 24-64 мт 1530+100м	261	24.06.21	0,51	2,7	0,37	0,3	9,4	10,3
Лава 24-63, КШ 24-63, ПК 111+7м	268	28.10.21	0,45	3,7	0,30	0,05	8,3	8,65

Как видно из таблицы, результаты показали значительный относительный разброс величин Q_2 , тогда как для величин Q_1 и Q_3 относительный разброс значений объемов вышедшего метана небольшой для всех трех проб. В процессе исследований фиксируется преимущественно десорбирующийся метан, поскольку из-за естественной дегазации в первые минуты после обнажения из угля уходит свободный метан до отбора пробы. Поэтому величина Q_1 отражает преимущественно физически связанный (адсорбированный) метан, находящийся на поверхности макропор и трещин. Величина Q_1 зависит от фильтрационных свойств угольных образцов – от количества и размеров пор и трещин. Сюда также дает вклад метан, находящийся вблизи стенок пор. Поскольку значение Q_1 мало отличаются друг от друга, можно предположить, что фильтрационные свойства угольного пласта Болдинский мало отличаются в пласте по мере его разработки. Значения Q_2 для образцов, отобранные в разное время по мере разработки пласта, различаются

между собой в несколько раз. Количество метана в Q_2 зависит от суперпозиции двух механизмов фильтрации и диффузии, но в этом случае скорость газовыделения зависит от процесса диффузии метана в угле [2].

Из этого следует, что основная информация о различиях в структуре угольного вещества несет количество метана, определенное как Q_2 , отвечающее за процесс газовыделения, обусловленный диффузией в угле.

Основное содержание метана, до 96% в третьей пробе, приходится на Q_3 , то есть преобладает связанный метан, встроенный в структуру угля.

Список литературы

1. Руководство по безопасности «Рекомендации по определению газонасыщенности угольных пластов». – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2017. – Сер. 5 – Вып. 48. – 44с. 2. Xia T., Zhou F. et. al. Simulation of coal self-heating processes in underground methane-rich coal seams // International Journal of Coal Geology. – 2015. – No. 141-142. – P. 1-12.

2. Алексеев А.Д., Василенко Т.А., Гуменник К.В., Калугина Н.А., Фельдман Э.П. Диффузионно-фильтрационная модель выхода метана из угольного пласта // Журнал технической физики. – 2007. – № 4. – С. 65-74.

УДК 622.453

ОЦЕНКА ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ БЛОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Панов А.В., Мирошниченко Н.А.

ИГД СО РАН, г. Новосибирск

Введение. Течение флюидов в пористой среде зависит от множества параметров: пористость, проницаемость, градиент давления, эффективное напряжение. Проницаемость является ключевым параметром, и ее зависимость от различных факторов активно изучается [1, 2]. Месторождения углеводородов, как правило, имеют трещиноватую структуру, где проницаемость межпластовых трещин может значительно превышать проницаемость слоев. Цель исследования - установить зависимость проницаемости трещины в образце регулярно-блочной структуры от порового давления и приложенного сжимающего напряжения. В основе лежат экспериментальные данные о фильтрации через образец, состоящий из набора искусственно созданных блоков (смесь песка с криогелем) [3].

Модель эксперимента. Рассмотрим образец с блочной структурой, который имитирует трещиноватую горную породу (рис. 1.).

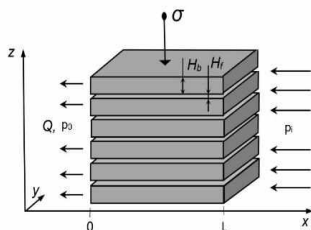


Рисунок 1 - Геометрия области и граничные условия

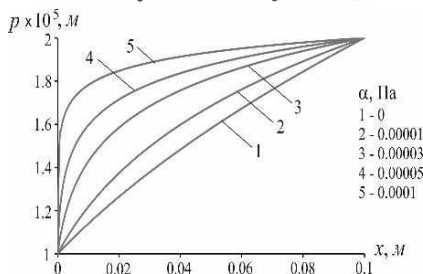


Рисунок 2 – Распределение давления в образце при различных значениях коэффициента α

Для описания фильтрационных свойств используется двухкомпонентная модель, учитывающая фильтрацию через блоки и межблочные промежутки (трещины). Проницаемость блоков k_b определялась экспериментально, а проницаемость трещин описывается модифицированной зависимостью [4]:

$$k_f = k_f^0 e^{-\alpha(\sigma - p)}, \quad (1)$$

где k_f^0 – начальная проницаемость трещины, α – коэффициент чувствительности к эффективному напряжению, σ – внешнее сжимающее напряжение, p – поровое давление, $(\sigma - p)$ – эффективное напряжение.

Математическая модель фильтрации включает: уравнение неразрывности

$$\partial(\phi\rho) / \partial t + \partial\rho V_x / \partial x = 0; \quad (2)$$

закон Дарси

$$V_x = -k / \mu \cdot \partial p / \partial x; \quad (3)$$

уравнение состояния для сжимаемого флюида

$$\rho = \rho_0 p / p_0, \quad (4)$$

где p – давление, V_x – скорость фильтрации, ρ и μ – плотность и вязкость флюида, ϕ и k – пористость и проницаемость среды, ρ_0 плотность флюида при p_0 . Граничные условия запишем в виде:

$$p(L) = p_i, p(0) = p_0. \quad (5)$$

В случае стационарного течения $\frac{\partial(\varphi\rho)}{\partial t} = 0$ система уравнений (2)-(4) с учётом (1) и (5) позволяет в неявном виде получить зависимость распределения давления флюида в образце $p(x, \alpha)$ (см. рис. 2.):

$$\left(\frac{p}{\alpha} - \frac{1}{\alpha^2}\right)e^{ap} = \left(\frac{p_0}{\alpha} - \frac{1}{\alpha^2}\right)e^{ap_0} + \left(\left(\frac{p_i}{\alpha} - \frac{1}{\alpha^2}\right)e^{ap_i} - \left(\frac{p_0}{\alpha} - \frac{1}{\alpha^2}\right)e^{ap_0}\right)\frac{x}{L} \quad (6)$$

Постановка и решение обратной задачи. Воспользуемся выражением (1) для проницаемости трещины и определим параметры k_f^0, α .

В лабораторных испытаниях [3] фильтруемый образец помещался в герметичную камеру и подвергался ступенчатому сжатию σ , регистрировались укорочения образца, определялась упругая деформация блоков, задавалось входное давление p_i и измерялся расход Q при постоянном выходном давлении $p_0=0,11$ МПа. Всего было проведено $N=40$ испытаний. Параметры для расчетов: $m=6$, $E_b=370$ МПа, $L=0,1$ м, $\mu=10^{-5}$ Па·с, ширина образца $Y=0,07$ м, $k_b=8,4$ Д. Суммарный расход флюида складывается из расхода через трещины и через блоки. После подстановок получаем окончательный вид выражения для расхода:

$$Q = YH_f \frac{1}{\mu} k_f^0 e^{-\alpha\sigma} \frac{\left(\frac{p_i}{\alpha} - \frac{1}{\alpha^2}\right)e^{ap_i} - \left(\frac{p_0}{\alpha} - \frac{1}{\alpha^2}\right)e^{ap_0}}{Lp_0} (m-1) + YH_b^0 \left(1 - \frac{\sigma}{E_b}\right) \frac{k_b}{\mu} \frac{p_i^2 - p_0^2}{2Lp_0} m,$$

где m – количество блоков в образце, $(m-1)$ – количество трещин.

Для поиска параметров k_f^0, α зададим целевую функцию F , как разницу между расходом через трещины полученным из экспериментов и рассчитанным теоретически:

$$F = \sum_N \frac{1}{2} \left[Q_f^{\text{эксперимент}} - Q_f^{\text{расчет}}(k_f^0, \alpha, \sigma, p_i) \right]^2 \rightarrow \min$$

Результаты. На рис. 3 представлены изолинии целевой функции F с единственным минимумом в точке $\alpha=3.5 \cdot 10^{-6}$ Па⁻¹, $k_f^0=12.5 \cdot 10^{-11}$ м². Пунктиром показаны траектории минимизации целевой функции градиентным методом Левенберга – Марквардта.

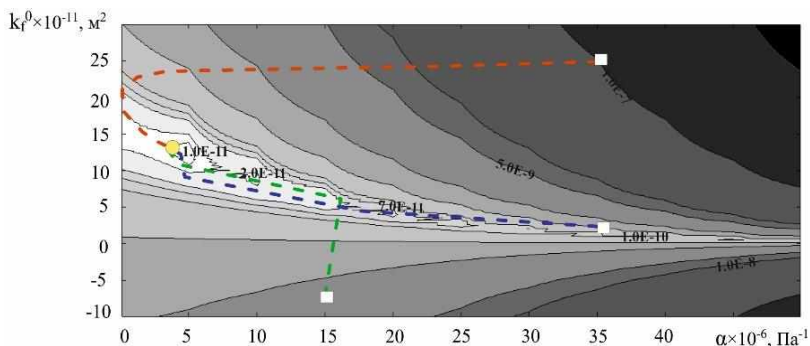


Рисунок 3 - Изолинии целевой функции F

Выводы. На основе лабораторных испытаний определены значения фильтрационных параметров трещин k_f^0, α , проницаемость которых задана выражением $k_f = k_f^0 e^{-\alpha(\sigma-p)}$. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования газопроницаемости трещиноватых коллекторов.

Работа выполнена в рамках проекта НИР (номер государственной регистрации 124020700085-5).

Список литературы

1. Ding K. et al. Experimental study on relative permeability characteristics for CO₂ in sandstone under high temperature and overburden pressure //Minerals. – 2021. – Т. 11. – №. 9. – С. 956.
2. Wu W., Zoback M.D., Kohli A.H. The impacts of effective stress and CO₂ sorption on the matrix permeability of shale reservoir rocks //Fuel. – 2017. – Т. 203. – С. 179-186.
3. Назаров, Голиков, Скулкин, Назарова. Метод экспериментального определения деформационных и фильтрационных характеристик горных пород регулярно-блочной структуры. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2023. №11. С. 70-81.
4. Seidle J.P., Jeanson M.W., Erickson D.J. Application of matchstick geometry to stress dependent permeability in coals //SPE Rocky Mountain Petroleum Technology Conference/Low-Permeability Reservoirs Symposium. – SPE, 1992. – С. SPE-24361-MS.

ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧНОСТИ КОРОБКОВСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ, ИНИЦИИРОВАННОЙ МАССОВЫМИ ВЗРЫВАМИ

Морозова К.Г., Остапчук А.А., Беседина А.Н., Павлов Д.В.

ИДГ РАН, г. Москва

Интенсификация горных работ всё чаще приводит к появлению крупных природнотехногенных землетрясений и горно-тектонических ударов в ранее слабосейсмичных и асейсмичных областях. Иницирование крупных сейсмических событий связано с проскальзыванием по существующим тектоническим разломам и крупным трещинам, структура которых существенно изменяется вдоль их простирания. В настоящей работе проводится анализ параметров шахтной сейсмичности на Коробковском железорудном месторождении, в пределах которого локализован крупный Северо-Восточный разлом. Анализ проводится с целью оценки вероятности иницирования крупных сейсмических событий на участках разлома с различной структурой осевой зоны. На месторождении применяется технология короткозамедленного взрывания и этажно-камерная система разработки, что вызывает иницирование слабой сейсмичности в пределах шахтного поля. При массовых взрывах во вмещающем массиве сейсмические события локализуются в пределах разрабатываемой камеры. Статистика магнитуд сейсмических событий описывается степенным законом, а значение скейлингового параметра b -value, как правило, меньше 2. При взрывах в окрестности разлома сейсмические события локализуются вдоль его простирания, а скейлинговый параметр b -value имеет значение больше 2. Для Коробковского железорудного месторождения главной особенностью индуцированных событий является их низкая приведенная энергия $8,9 \times 10^{-9} - 4,9 \times 10^{-7}$, Дж/(Н м) соответствующая классу медленных землетрясений. Ядро Северо-Восточного разлома сложено преимущественно породами со свойством скоростного упрочнения, что, также, обуславливает иницирование именно медленных событий. Совместный анализ данных сейсмического мониторинга и сведений о структурных и реологических свойствах пород, слагающих ядро разлома, позволяет предполагать, что в окрестности Северо-Восточного разлома в пределах шахтного поля накопленные деформации могут реализовываться преимущественно посредством медленных и асейсмичных подвижек.

ОБОСНОВАНИЕ И РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЦЕЛИКОВ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ МЕСТОРОЖДЕНИЯ «КУМРОЧ»

Козлова К.А., Косырева М.А., Еременко В.А.

Горный институт НИТУ МИСИС, г. Москва

В научно-исследовательском центре «Прикладная геомеханика и конвергентные горные технологии» Горного института НИТУ МИСИС выполнялись численные расчеты и определялись оптимальные безопасные параметры целиков различного назначения для горно-геологических и горнотехнических условий подземной разработки запасов золоторудного месторождения «Кумроч» расположенного на Камчатке. Строящийся рудник неглубокого залегания 100-200 м от земной поверхности, исходное поле напряжений гравитационное. Горизонтальное давление в массиве представлено боковым распором горных пород.

Для численных расчетов и анализа использовался программный комплекс Midas GTS NX. Критериями для оценки оптимальных параметров целиков применялись: максимальное действующее напряжение $\sigma_{\max}$ (избыточное напряжение $\Delta\sigma$), коэффициент запаса прочности целиков (КЗП) и деформация массива ε [1].

Избыточное напряжение $\Delta\sigma$ – это критерий, который показывает наличие напряжения в целиках, которое по своей величине больше прочностных свойств и характеристик пород в рассматриваемых условиях. Если значение избыточного напряжения $\Delta\sigma < 0$, то оно меньше прочности целиков и они прогнозируемо находятся в устойчивом состоянии. Если $\Delta\sigma > 0$, то напряжение превышает предел прочности массива горных пород и на контуре камер возможны шелушение, интенсивное заколообразование и другие негативные факторы проявления горного давления.

Для оценки НДС массива горных пород в результате действия избыточного напряжения (т.е. напряжения, превышающего предельное) при упругом анализе использовался критерий прочности Хука-Брауна, который является функцией максимального и минимального значений главных напряжений, а также прочностных свойств массива горных пород. Этот критерий особенно хорошо подходит для оценки устойчивости скального нарушенного массива, которым представлены рассматриваемые условия.

Критерием для оценки нарушенности целиков применяется коэффициент запаса прочности КЗП (Safety Factor – английская версия аббревиатуры КЗП, программная).

Проектирование параметров горнотехнической системы подземного рудника проводилось по результатам численного моделирования с высокой степенью достоверности входных параметров в численную модель при условии, что $K3П \geq 1$.

При проведении научно-исследовательской работы разработано более 100 численных моделей включающих выработки и целики различного назначения: междуэтажные, междуканнерные, под подготовительные выработки и др.

Для примера в статье представлены результаты численного моделирования с определением действующих вертикального и горизонтального напряжений, растягивающей деформации и КЗП целика между выработками в Модели №1 (рис. 1.1-1.5).

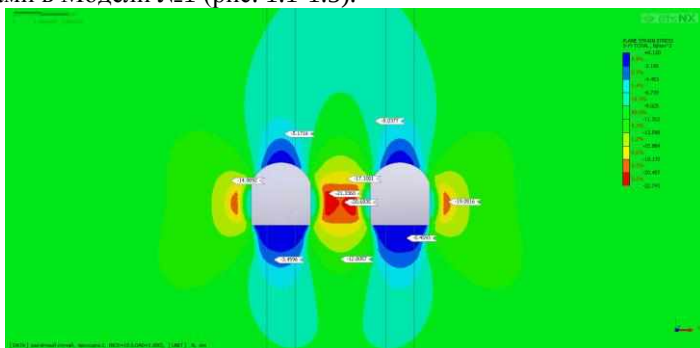


Рисунок 1.1 - S-YY – вертикальное напряжения по оси Y

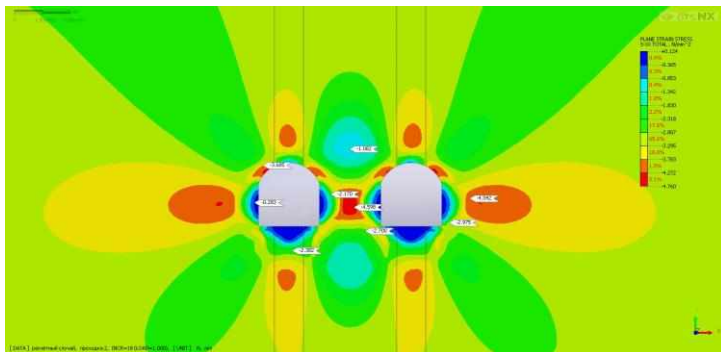


Рисунок 1.2 - S-XX – горизонтальное напряжение по оси X

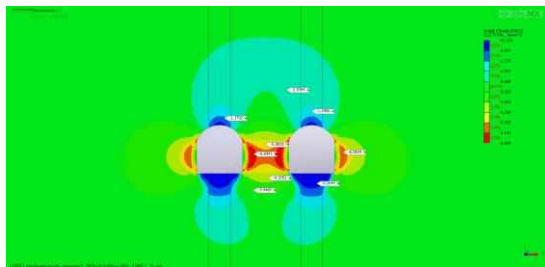


Рисунок 1.3 - S-ZZ – горизонтальное напряжение по оси Z

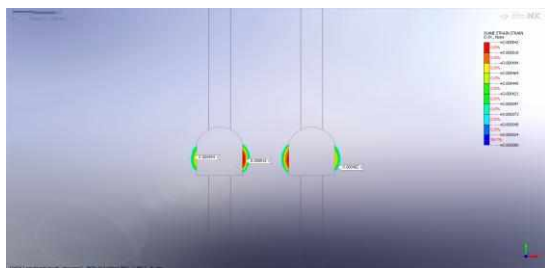


Рисунок 1.4 - E-XX – деформация по оси X



**Рисунок 1.5 - Safety Factor-коэффициент запаса прочности
целика и вмещающего массива**

При проведении численных расчетов и интерпретации результатов исследований установлено:

- при проходке выработок в целике между ними и на границе с вмещающим массивом регистрируются вертикальные и горизонтальные сжимающие напряжения по значениям в 3 раза меньше чем пределы прочности руды и породы на сжатие, что определяет значительный запас их прочности (рис. 1.1-1.3);
- проходка выработок приводит к формированию в целике между выработками зоны растягивающих деформаций со значениями

$\varepsilon=0,000350-0,00054$ на глубину до 1 м; в этих зонах развивается наведенная трещиноватость от гравитационного горного давления, но целостность целика нарушается только на 10-15% от его объема и он продолжает сохранять устойчивость (рис. 1.4);

- КЗП целика между выработками имеет значение меньше 1 (до 0,83) (рис. 1.5), что определяет начальную стадию его неустойчивого состояния, так массив целика нарушен трещинами (геологический индекс прочности $GSI=45-55$ приповерхностного массива в сейсмоактивном регионе действия вулканов на Камчатке); необходимо на стадии проектирования горных работ предусмотреть варианты крепления целика расположенного между подготовительными и очистными выработками при условии их длительного поддержания до 1-2 лет [2, 3].

Список литературы

1. Чуприн К.Э., Бабкин Е.А., Еременко В.А., Косырева М.А. Каркасные и традиционные схемы подземной разработки месторождения Джеруй штокового типа в условиях применения камерной системы с закладкой // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – №8. – С. 45–59.

2. Косырева М.А., Еременко В.А., Горбунова Н.Н., Терешин А.А. Расчет параметров крепи выработок с использованием программы Unwedge на рудниках ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — М.: Издательство «Горная книга». - №8. – 2019. – С. 57-64.

3. Еременко В.А., Айнбиндер И.И., Марысюк В.П., Наговицин Ю.Н. Разработка инструкции по выбору типа и параметров крепи выработок рудников Талнаха на основе количественной оценки состояния массива // Горный журнал. — №12 — 2018. — С. 101-106.

УДК 622.2

О ВЛИЯНИИ МОЩНОСТИ ОСТАВЛЯЕМЫХ ЗАЩИТНЫХ ПАЧЕК В ПОЧВЕ И ГЛУБИНЫ ЗАЛОЖЕНИЯ ВЫРАБОТОК НА ВЕЛИЧИНУ ПУЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ СОЛЯНЫХ ПЛАСТОВ

Миронов Н.А.

*Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург*

Абсолютное большинство недавно запущенных в эксплуатацию и перспективных рудников характеризуется глубинами залегания продуктивных пластов около 1 км и более. Характер деформирования подготовительных выработок имеет свою специфику в зависимости от конкретного

месторождения. Объектом настоящего исследования является рудник Гремячинского ГОКа, где глубина ведения горных работ составляет 1030-1100 м [1]. Подготовительные выработки рудника проводятся в пределах продуктивного пласта, залегание которого осложнено достаточно интенсивной складчатостью и отличительной особенностью - наличием в его непосредственной почве хрупких карналлитовых или карналлит-галитовых пород прочностью менее 6–13 МПа [2, 3]. Вследствие чего существует, высокая вероятность деформирования почвы в конвейерных и транспортно-вентиляционных выработках, которое может привести как к необходимости подрубки почвы для ремонта. Все вышесказанное может приводить к высокому уровню издержек, и дополнительными затратами.

Одним из способов охраны выработок, является оставление в почве защитной пачки силвинита с мощностью, достаточной для обеспечения эксплуатационного состояния выработки [4].

В работе решалась задача по оценке величины пучения почвы, породы описывались идеальной упругопластической средой, методом конечных элементов. Исходное поле напряжений ненарушенного массива для одиночной выработки принималось гидростатическим: $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \gamma H = 25 \text{ МПа}$. На рис. 1 представлена расчетная схема и сетка элементов.

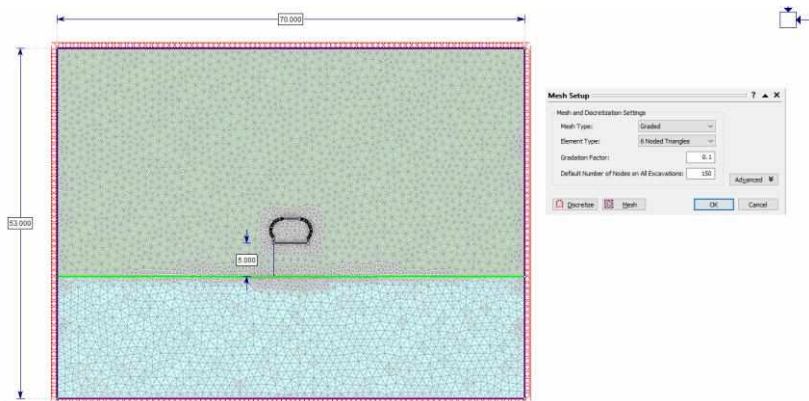


Рисунок 1 - Расчетная схема и параметры сетки

Было построено несколько моделей с различной мощностью пачки, отделяющей выработку заложенную в пласте (m), от карналлитовых пород (1 м, 2 м, 3 м, 4 м и 5 м). По результатам моделирования установлено, что для рассмотренных горно-геологических, горнотехнических условий Гремячинского месторождения можно представить зависимость

величины пучения пород почвы от глубины (H). Аналитический вид функции можно принять как линейный (рис. 2).

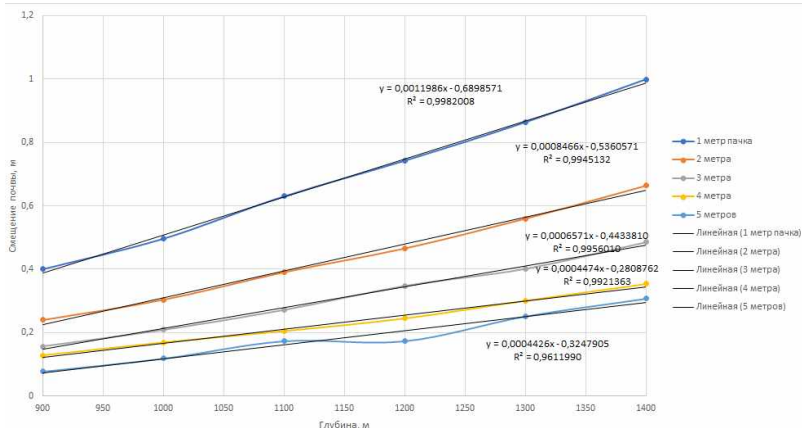


Рисунок 2 - Зависимость величины пучения почвы (м) от глубины при различных значениях мощности защитной пачки (м)

Полученную зависимость величины пучения для мощности пачки в 1 м (1) возможно преобразовать в (2), используя коэффициенты k и b (рис. 3 и 4) линейного уравнение $y=kx+b$ подобранного путем аппроксимации ($R=0,99$) значений смещения почвы при разных значениях мощности.

$$y=0,0011986x-0,6898571 \quad (1)$$

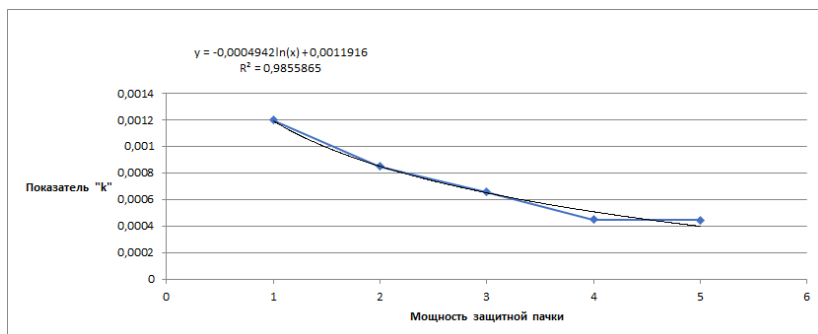
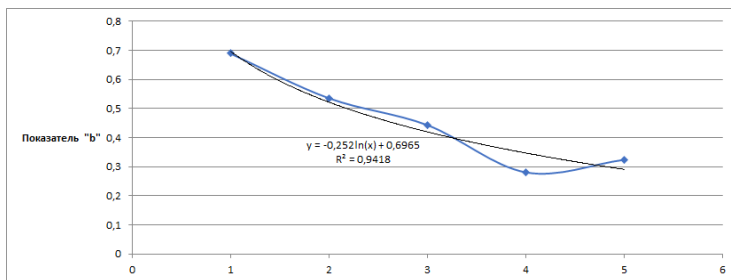


Рисунок 3 - Зависимость коэффициентов «k» от мощности пачки почве (м)



**Рисунок 4 - Зависимость коэффициентов «b»
от мощности пачки в почве (м)**

Полученная зависимость (2) дает возможность получать прогноз о величине смещений почвы в заданном интервале мощности защитной пачки сильвинита ($0 < m \leq 7$ м) и глубине ($H \geq 900$ м) при постоянных физико-механических свойствах пласта и подстилающих пород.

$$y = (-0,0004942 \times \ln(m) + 0,0011916) \cdot H + 0,252 \cdot \ln(m) - 0,6965 \quad (2)$$

Список литературы

1. Петров Д.Н., Абашин В.И., Карасев М.А., Селихов А.А. Исследование возможности применения методов неразрушающего контроля для оценки прочностных свойств горных пород в условиях подземного рудника Гремячинского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 12-1. – С. 227–244. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_121_0_227.
2. Морозов, И.А. Оценка состояния приконтурных пород в условиях глубоких горизонтов калийных рудников / И.А. Морозов // Горное эхо. – 2020. – № 2(79). – С. 30-34. – DOI: 10.7242/echo.2020.2.6. – EDN AJLLIU.
3. Токсаров В.Н., Морозов И.А., Бельтюков Н.Л., Ударцев А.А. Исследование деформирования подземных горных выработок в условиях Гремячинского месторождения калийных солей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 7. – С. 113–124. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-113-124.
4. Технологический регламент по охране и креплению горных выработок на рудниках ПАО «Уралкалий» / Отв. составители-разработчики: Чернопазов Д.С., Соловьев В.А., Секунцов А.И. – Пермь-Березники, 2015 – 159 с.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЭМИССИИ МЕТАНА В ПРОТЯЖЕННУЮ СКВАЖИНУ

Трофимов В.А., Шляпин А.В., Филиппов Ю.А., Белоусов Ф.С.

ИПКОН РАН, г. Москва

Исследование посвящено анализу закономерностей притока метана в горизонтальную дегазационную скважину, пробуренную в угольном

массиве. Газовый поток инициируется перепадом давления газа между массивом и дегазационной системой. В отличие от традиционных подходов, где анализ основан на задании некоторого контура питания, как правило, связанным с природными неоднородностями (что позволяет использовать стационарную постановку), в данной работе рассматривается фильтрация метана к несовершенной скважине в однородном угольном пласте, где обоснованное выделение контура питания представляет сложность. Для оценки дебита газа и срока эксплуатации скважины разработан численный алгоритм в рамках ANSYS, интегрирующий решения задач фильтрации в пористой среде и свободного течения в стволе скважины.

На практике возможны различные варианты взаимного расположения очистного пространства и дегазационных скважин.

Вмещающие породы, особенно пористые, могут содержать значительные объемы метана, способного мигрировать между пластом и породой. Перспективным направлением является дегазация с помощью скважин, размещенных в породах кровли параллельно пласту, наряду с традиционными скважинами в самом угле. Хотя эти исследования находятся в развитии, скважины в породах представляют потенциал для более эффективной дегазации выработанного пространства.

По мере продвижения очистного забоя вдоль дегазационных скважин со стороны забоев их эксплуатация может продолжаться без перерыва вплоть до полной отработки участка. Однако скважины, пройденные параллельно очистному забою, функционируют до момента сближения сдвигающимся забоем, после чего выводятся из работы.

Вариация геометрии выработанного пространства в результате добычных работ изменяет напряженно-деформированное состояние массива, что, в свою очередь, модифицирует пористость и проницаемость. Эти параметры контролируют массоперенос и выход газа в скважины. Подвигание лавы разрушает структуру массива, интенсифицируя десорбцию метана и отток свободного газа из пор и трещин. В то же время, в зонах опорного давления сжимающие напряжения снижают проницаемость, затрудняя фильтрацию флюидов.

Дегазационные скважины не работают в стационарном режиме. Проходка протяженных скважин занимает время, что приводит к неравномерному по длине скважины началу газовыделения: участки у устья активизируются раньше, чем у забоя. По мере истощения ближних зон давление падает, и в отбор вовлекаются более удаленные области пласта. Следовательно, общий дебит скважины изменяется во времени, постепенно снижаясь, что критически важно для оценки общего объема извлекаемого газа и продолжительности эффективной работы.

Настоящая работа фокусируется на теоретической оценке притока метана к дегазационной скважине — аспекте, часто недостаточно

учитываемом в современных подходах. Такую оценку можно выполнить, решая нестационарную задачу о движении флюида в проницаемой среде, характеризующуюся высоким начальным притоком с последующим спадом. Для упрощения анализа рассматривается совершенная скважина, что позволяет свести задачу к плоской радиальной фильтрации.

Для случая притока метана из пласта с постоянной проницаемостью и газонасыщенностью к совершенной скважине задача имеет аналитическое решение. С учетом малых скоростей фильтрации и на основе линейного закона Дарси, массовый расход газа (дебит) для скважины длиной (h) описывается известным выражением:

$$Q = \frac{\pi K h (p_{\text{пл}}^2 - p_{\text{заб}}^2)}{\mu \beta \ln \frac{R_k}{r_c}}$$

где: Q – массовый расход газа; K – проницаемость фильтрующей среды; $P_{\text{пл}}$ – давление газа в пласте; $P_{\text{заб}}$ – давление газа в скважине; μ – вязкость газа; r_c – радиус скважины; R_k – радиус контура питания; β – константа, зависящая от природы газа.

Данное соотношение позволяет оценить приток в зависимости от давлений в массиве и радиуса контура питания. Однако последний является неопределенным параметром, который, как и забойное давление, непрерывно изменяется во времени в зависимости от режима работы системы. В полной мере задача решается в работе в численной постановке, когда по всему объему задано распределение давления газа (в частном случае – постоянное).

Для дальнейшего анализа выделена независимая задача о движении газа вдоль ствола скважины с учетом сужения на устье (диафрагмы), без моделирования окружающего массива.

Моделирование течения газа в скважине с устьевым сужением (Рисунок 1) для базового сценария притока демонстрирует распределение скорости по ее оси. Наблюдается, что высокий приток приводит к скоростям потока в десятки метров в секунду, величина которых существенно варьируется при изменении диаметра диафрагмы.

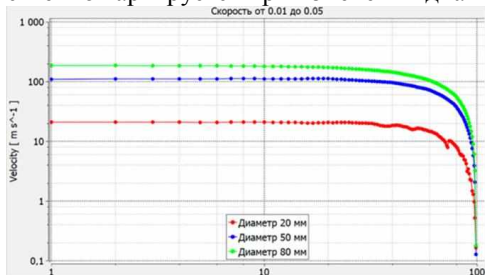


Рисунок 1 – Распределение скорости газа по оси скважины для базового сценария притока

В работе также проанализированы сценарии с притоком, сниженным на порядок, и получены распределения давления для различных диаметров сужений.

Таким образом, в исследовании проанализирован процесс миграции метана из угольного пласта в дегазационную скважину. Для углубленного понимания динамики зоны дренирования («контура питания») и влияния времени строительства скважины на ее производительность необходимо решение сопряженной задачи о фильтрации газа из пласта к скважине, что является ключом к оптимизации дегазации.

Список литературы

1. Трофимов В.А., Филиппов Ю.А. Особенности формирования массопереноса метана в породах междупластья // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2021. – №3. – С. 71–78. [https://doi.org/10.33285/1999-6934-2021-3\(123\)-71-78](https://doi.org/10.33285/1999-6934-2021-3(123)-71-78).
2. Белоусов Ф.С. Изучение состояния пород переходных зон в условиях их естественного залегания методами шахтной сейсморазведки при комбинированной разработке кимберлитовых трубок// Инженерная физика. 2021. № 1. С. 49–56. DOI: 10.25791/infizik.1.2021.1187.
3. Забурдяев В.С., Федоров Е.В., Белоусов Ф.С. Дегазация разрабатываемых пластов угля направленной трассы скважинами // Безопасность труда в промышленности. 2023. № 9. С. 59–64. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-9-59-64.
4. Инструкция по дегазации угольных шахт. Серия 05. Вып. 22. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2020. – 240 с.

УДК 622.273

МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ И КОНТРОЛЬ СТАНОВЛЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ВЫРАБОТОК В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Лин Лу^{1,2}

¹*Китайский университет горного дела и технологий, г. Пекин, Китай,*
²*НИТУ МИСИС, г. Москва*

В условиях неглубокого залегания угольные пласты подвержены самовозгоранию вследствие выветривания. При длительном воздействии высоких температур структура и состав вмещающих пород в зоне самовозгорания угольного пласта изменяются, что приводит к формированию оплавленных (термически изменённых) пород [1-2]. Как особый тип горных пород, оплавленные породы характеризуются высокой трещиноватостью и значительной пористостью, что ставит под серьёзную угрозу устойчивость вмещающих пород выработок в зоне горения [3].

Исследуемый район представлен возвратной выработкой 3202-го очистного забоя шахты Ванцайхуопань, где вследствие исторического горения угля сформировались локальные участки оплавленных пород. На начальном этапе проходки кровля, длительное время подвергавшаяся воздействию высоких температур, значительно ослабла по прочности, что проявлялось интенсивной деформацией пород и обширным отслоением кровли (рис. 1). В результате устойчивость выработки была низкой, что серьёзно осложняло продвижение горных работ.

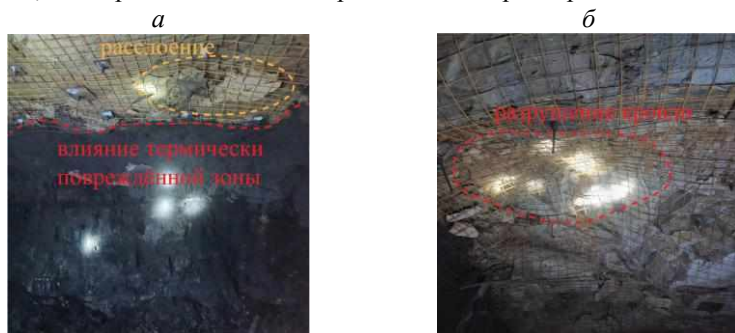
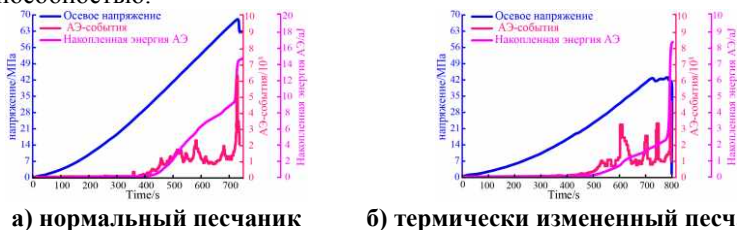


Рисунок 1 - Разрушение выработки в шахте

Для оценки механических свойств были испытаны образцы нормального песчаника и оплавленных пород. Одноосные испытания на сжатие и растяжение показали более чем 35-процентное снижение прочности оплавленных пород по сравнению с нормальными (табл. 1). Регистрация акустической эмиссии позволила уточнить механизм разрушения (рис. 2): у нормального песчаника максимальная энергия достигала $1,5 \times 10^6$ аJ, что отражает сосредоточенный выброс при критическом разрушении, тогда как у оплавленных пород этот показатель составил лишь $8,5 \times 10^5$ аJ. При этом трещины формировались раньше, а энергия выделялась более рассеянно. Таким образом, оплавленные породы отличаются развитой трещиноватостью, рыхлой структурой и повышенной хрупкостью, что прямо связано с их пониженной несущей способностью.



а) нормальный песчаник

б) термически измененный песчаник

Рисунок 2 - Данные акустической эмиссии

Таблица 1

Прочность горных пород при сжатии и растяжении

Тип породы	Прочность на сжатие (МПа)	Прочность на растяжение (МПа)
Песчаник	68.89	2.71
Оплавленные породы	42.31	1.23

С учётом деградации механических свойств пород и натурных наблюдений предложена комбинированная схема крепления: «инъекционное закрепление + анкеры (канатные) + металлическая рамная крепь». В кровле и со стороны, противоположной очистному фронту, установлены анкеры из резьбовой стали $\phi 20 \text{ mm} \times 2400 \text{ mm}$; со стороны очистного фронта применяются смолозаполненные анкеры $\phi 22 \text{ mm} \times 2500 \text{ mm}$ с шагом $1000 \times 1000 \text{ mm}$. В центральной части кровли размещаются два канатных анкера $\phi 17.8 \text{ mm} \times 8500 \text{ mm}$ с шагом $2500 \times 2000 \text{ mm}$. В качестве металлической крепи используется швеллер №11, устанавливаемый с шагом 800 mm.

Распределение девиаторных напряжений в массиве выработки представлено на рис. 3. Расчёты показали, что без крепления пик напряжений находится на глубине до 2,59 м; при базовой схеме он смещается на 1,44 м, что указывает на частичную работу пород в приповерхностной зоне; при оптимизированной схеме максимум сосредоточен на глубине 0,83 м при уровне около 3,7 МПа, при этом глубинная пластическая зона заметно сокращается.

Развитие трещин в кровле при различных схемах крепления показано на рис. 4. Без крепи наблюдаются интенсивное растрескивание и отслоение; базовая схема лишь частично ограничивает процесс, оставляя потенциальные разрывы за пределами анкерной зоны; оптимизированная схема существенно снижает масштабы трещинообразования, практически устраняет отслоения и значительно повышает устойчивость выработки.

В участке вентиляционного штрека, расположенного в зоне влияния оплавленных пород, после применения оптимизированной схемы крепления величина относительного сближения кровли и боковых пород составила менее 50 мм. В течение 40 суток после проведения выработки деформации стабилизировались, повторного выраженного отслаивания и разрушений не наблюдалось (рис. 5). Общие деформации выработки оставались в пределах допустимых норм, установленных инженерными стандартами, что свидетельствует о надёжном контроле устойчивости и высокой эффективности применённой схемы крепления.

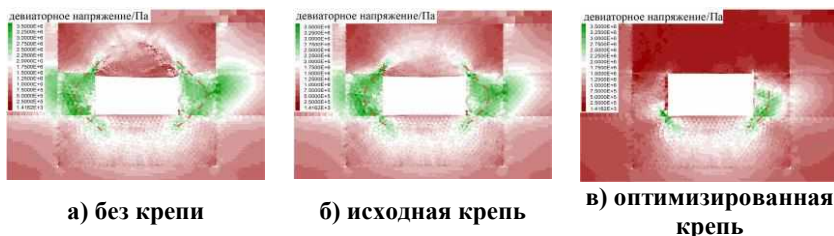


Рисунок 3 - Распределение девиаторного напряжения

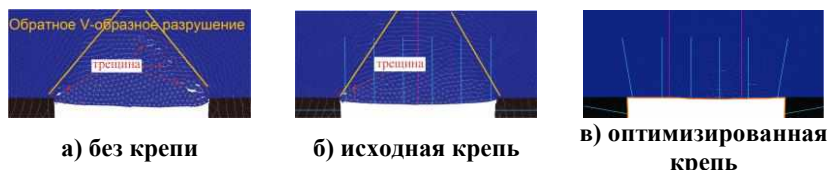
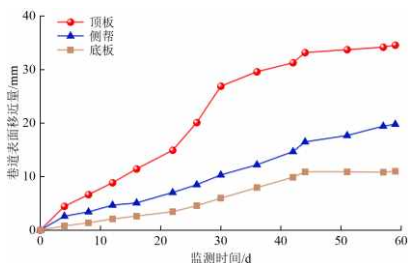


Рисунок 4 - Характер развития трещин в кровле выработки



а) полевые данные



б) контрольный эффект

Рисунок 5 - Результаты оптимизированного крепления

Список литературы

1. Rexit, Y. et al. Characteristics and transformations of mineral phases in burnt rocks. Coal Geology & Exploration 52, 14 (2024).
2. Jia, Z.-Z., Li, H.-J., Li, W., Yan, J. & Wang, X.-H. Study on blasting fragmentation mechanism of burnt rock in open-pit coal mine. Sci. Rep. 14, 5034 (2024).
3. Yuan, Y., Liu, Z., Zhu, C., Yuan, C. & Wang, S. The effect of burnt rock on inclined shaft in shallow coal seam and its control technology. Energy Science & Engineering 7, 1882–1895 (2019).

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.235; 550.834

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКРАНИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОТРЕЗНОЙ ЩЕЛИ

Ковальчук И.О., Кондрашов А.В., Добрынин А.А.

ИПКОН РАН, г. Москва

При ведении буровзрывных работ (БВР), с увеличением глубины карьера, вопросы устойчивости бортов и снижения разрушающего воздействия взрыва в законтурный массив становятся все более актуальными.

В данной статье представлен метод определения коэффициента экранирования отрезной щели [1], путем измерения сейсмического воздействия от взрыва в ближней зоне с помощью внутрискважинных геофонов. Применение внутрискважинных геофонов позволяет исключить влияние поверхностных сейсмических волн на результат измерений. Главным условием является установка внутрискважинного геофона в ненарушенную часть массива, т.е. ниже разрушенного от перебуров подошвенного слоя горных пород, например, в середину уступа, и его бетонирование в скважине для исключения собственных колебаний (рис. 1). Во время экспериментов в качестве внутрискважинного геофона применялся сейсмодатчик чилийского производства, характеристики которого представлены в табл. 1. Геологическая характеристика взрывае-мого массива представлена в табл. 2.



**Рисунок 1 – Установка
внутрискважинного
геофона в скважину**

Таблица 1

Технические характеристики внутрискважинного геофона

Наименование характеристики	Параметр, описание
Модель	Трехкомпонентный геофон для измерения ближней зоны взрыва, подключается к сейсморегистратору InstanTel Minimate Pro через специальную соединительную коробку.
PPVmax	2543 мм/с
АЧХ	28 Гц
Сопротивление	162,1±8% Ом/м
Чувствительность	0,0012674 В/мм/с
Длина кабеля	15 м
Дата производства	25.11.2024

Таблица 2

Геологическая характеристика массива горных пород

Параметр	Значение	Средние значения
Статический предел прочности на одноосное сжатие, МПа	69,2-112	90,6
Статический предел прочности на одноосное растяжение, МПа	10	10
Коэффициент Пуассона	0,11-0,22	0,165
Модуль Юнга, ГПа	26,9-45,4	36,15
Скорость продольной волны (V_p) в массиве, м/с	2040-3445	2648
Плотность пород, кг/м ³	2650-2700	2675
Расстояние между трещинами по 1 системе (наименьшее), м	0,08-0,2	0,14

Сценарий взрывания блока включал в себя следующие этапы: (1) взрывание отдельных скважин №47-0 мс, №46 – 400 мс, № 45 – 800 мс, №44 – 1200 мс; (2) взрывание заоткоски – 1600 мс; (3) взрывание отдельных скважин №67 – 2000 мс, №66 – 2400 мс, №65 – 2800 мс, №64 – 3200 мс; (4) взрывание остальных технологических скважин блока начиная с 4030 мс. Внутрискважинный геофон зафиксировал скорости смещения пород от отдельно взрывааемых скважин до и после взрыва зарядов заоткоски.

Полнота и качество работы ВВ подтверждается измерением скорости детонации скважинного заряда. В эксперименте, в отдельно взрывааемые скважины устанавливался коаксиальный кабель и подключался к двум приборам для записи скорости детонации SHOTTRACK VOD 305 [2].

Одним из методов обработки сейсмоданных, полученных в ближней зоне взрыва является модель Холмберга-Пирсона [3]. Этот метод позволяет учесть массу, геометрию и диаметр заряда, а также расстояние до сейсмодатчика, т.е. расстояние до законтурного массива.

$$PPV = K \left[\left(\frac{P}{R_0} \right) \left(\arctan \left(\frac{H+X_s-X_0}{R_0} \right) + \arctan \left(\frac{X_0-X_s}{R_0} \right) \right) \right]^\alpha = K[H \& P]^\alpha,$$

где

K - коэффициент сейсмичности, зависящий от свойств пород в точке исследования, а также от свойств и типа ВВ;

α - показатель степени затухания колебаний;

P - вместимость ВВ в 1 м скважины, кг;

R_0 - расстояние по горизонтали от источника колебаний до исследуемой точки, м;

H - длина заряда ВВ, м;

X_s - длина недозаряда (забойки), м;

X_0 - глубина расположения исследуемой точки, м.

С помощью регрессионного анализа и построения графиков были получены коэффициенты сейсмичности, по которым и был определен коэффициент экранирования отрезной щели, который в данном случае составил $(287,6-180)/287,6 = 0,37$, т.е. экранирующая способность щели оценивается в 37%, что является неудовлетворительным показателем и, в свою очередь, индикатором пересмотра условий ведения БВР в приобортовых участках карьера. Следует отметить, что массив сейсмоданных после взрыва зарядов заоткоски, которой был принят в обработку, состоял из двух значений. Два значения не позволяют построить степенную регрессию, поэтому степенная регрессия была построена по параллельной проекции точек, полученных до взрыва заоткоски, и пересекающих верхнюю границу двух точек, полученных после взрыва зарядов заоткоски.

Список литературы

1. Ruilin Yang, Lee Pratt, Gaichang Zhao. A Case Study on Trim Blast Fragmentation Optimization Using the MBF Model and the MSW Blast Vibration Model at an Open Pit Mine in Canada // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2023. – С. 3641-3658. DOI: 10.1007/s00603-023-03237-y.

2. Ковальчук И.О. Обоснование эффективности применения воздушно-го промежутка между зарядом и забойкой // Сборник «Взрывное дело» №145-102 2024 г. С.83-100.

3. Holmberg R., Persson P-A. The Swedish approach to contour blasting / *Proceedings of the 4th Conference on Explosives and Blasting Technique*, Society of Explosives Engineers, New Orleans, Louisiana, 10—15 February, 1978, pp. 113—127.

МЕТОД ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ ДРОБИМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД С ПОМОЩЬЮ СКЛЕРОМЕТРА

Авдеев А.Н.¹, Бочкарев Н.Н.², Коптяков Д.А.¹,
Масальский Н.А.¹, Харисов Т.Ф.¹

¹ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург

²ПАО «Уральский асбестовый горно-обогатительный
комбинат», г. Асбест

Исследованы технологические и механические свойства габбро, диоритов, передотитов, серпентинитов и тальк-карбонатных пород Баженовского месторождения хризотил-асбеста. Выполнены измерения склерометром по поверхности отобранных в виде штуфов проб. Проведены лабораторные испытания образцов, подготовленных из штуфов. В воздушно-сухом состоянии вычислены пределы прочности при сжатии и растяжении. Выявлены связи между механическими свойствами исследуемых пород и показаниями склерометра. По эмпирической зависимости определены классы дробимости. Установлена корреляция между показаниями склерометра и дробимостью горных пород месторождения. Сделан вывод о том, что сложившиеся представления об общих закономерностях связи прочности и дробимости горных пород справедливы как при использовании традиционных способов, так и при оценке экспресс-методом.

Один из основных показателей качества ведения буровзрывных работ при открытой разработке месторождений — достижение требуемого гранулометрического состава горной массы и минимальная доля негабаритных кусков. Увеличение количества негабарита отрицательно влияет на скорость ведения горных работ и приводит к повышению себестоимости конечной продукции [1, 2].

Соответствие паспорта буровзрывных работ фактическим горно-геологическим и горнотехническим условиям в изменяющейся в процессе ведения горных работ среде (массив) является важной составляющей, от которой зависит качество взрыва.

Физико-механические свойства одного литологического типа даже в пределах рудного тела изменчивы, что отражается на их технологических свойствах [3–6]. Это требует оперативного уточнения физико-механических и технологических свойств пород, взаимосвязь которых представлена в [7]. Определить в лабораторных условиях физико-механические свойства горных пород участка карьерного поля месторождения, где будут проводиться взрывные работы, невозможно, так как это трудоемкий и длительный процесс [8–10]. Поэтому актуальны

методы экспресс-оценки данных свойств пород с применением склерометра [11, 12]. Методика заключается в измерении косвенной характеристики прибора (отскок бояка, ударный импульс и т.д.) с последующим расчетом прочностной и деформационной характеристики исследуемых пород по установленным математическим зависимостям.

Дробимость тесно связана с прочностью горных пород, с учетом их текстурных и структурных особенностей [13]. Логично предположить, что косвенная оценка свойств пород помогает сделать вывод не только об их механических, но и технологических характеристиках.

Такой подход позволяет оперативно собирать необходимые данные для оптимизации параметров буровзрывных работ. Получить универсальную функцию для всех литологических типов, которая бы точно описывала связь прочности и косвенной характеристики, затруднительно. Это обусловлено особенностью генезиса пород, их текстурой, структурой и т.д., поэтому каждый исследуемый массив, каждое месторождение должны рассматриваться отдельно.

- **Актуальность экспресс-метода:** Разработан и исследован метод экспресс-оценки дробимости горных пород с помощью склерометра, что актуально для оперативного уточнения физико-механических и технологических свойств пород в условиях изменяющейся горно-геологической среды, когда традиционные лабораторные методы трудоемки и длительны.

- **Исследуемые породы и объект:** Исследованы технологические и механические свойства габбро, диоритов, перидотитов, серпентинитов и тальк-карбонатных пород Баженовского месторождения хризотил-асбеста.

- **Методика исследования:** Измерения проводились склерометром по поверхности штуфов, а также выполнялись лабораторные испытания образцов на пределы прочности при сжатии и растяжении.

- **Выявленные закономерности:** Установлены связи между механическими свойствами пород (пределы прочности) и показаниями склерометра. Выявлено, что зависимость предела прочности на сжатие от показаний склерометра имеет больший коэффициент детерминации, чем зависимость предела прочности на растяжение.

- **Определение дробимости:** По эмпирическим зависимостям, связывающим прочность и показания склерометра, определены классы дробимости пород. Установлена корреляция между показаниями склерометра и фактической дробимостью пород месторождения.

- **Подтверждение применимости метода:** Сделан вывод о справедливости общих закономерностей связи прочности и дробимости горных пород как при традиционных, так и при экспресс-методах оценки.

Детализированные тезисы:

- **Влияние шероховатости поверхности:** Использование склерометра по поверхности штупа показало, что габбро и диориты с менее шероховатой и более гладкой поверхностью дают меньший разброс значений и меньший коэффициент вариации показаний.

- **Изменчивость механических свойств:** Тальк-карбонатные и серпентинизированные породы характеризуются широким варьированием механических свойств, обусловленным текстурными особенностями их строения, что отражается в более высоком коэффициенте вариации.

- **Корреляция прочности и склерометра:** С установленными экспоненциальными зависимостями между прочностными свойствами пород и показаниями склерометра, а также формулами, связывающими прочность, крепость и дробимость, получена возможность косвенной оценки дробимости.

- **Соответствие классов дробимости:** Классы дробимости, рассчитанные по фактическим прочностям при одноосном сжатии, соответствуют классам, найденным по установленному корреляционному соотношению между показаниями склерометра и прочностью на сжатие.

- **Оптимизация буровзрывных работ:** Полученные данные позволяют оперативно собирать информацию для оптимизации параметров буровзрывных работ, что напрямую влияет на гранулометрический состав горной массы и долю негабарита.

- **Условие универсальности:** Подчеркивается, что получение универсальной функции, описывающей связь прочности и косвенной характеристики для всех литологических типов, затруднительно. Каждый исследуемый массив или месторождение требует отдельного рассмотрения и установления специфической корреляции.

ВЫВОДЫ

При выполнении лабораторных исследований литологических типов, составляющих массив Баженовского месторождения, получены прочностные характеристики пород, а также установлены значения отскока бойка склерометра от поверхности штупов.

Использование склерометра показало, что породы габбро и диориты с поверхностью менее шероховатой и более гладкой дают меньший разброс значений. Тальк-карбонатные и серпентинизированные породы характеризуются широким варьированием механических свойств, обусловленные текстурными особенностями их строения. Коэффициент вариации по показаниям склерометра для всех исследуемых литологических типов не превышает 25,00%.

Статистическая обработка результатов испытаний образцов пород при одноосном сжатии показала, что пределы прочности пород имеют изменчивость от 15,10% до 32,51%.

На основании полученных результатов испытаний образцов исследуемых пород установлена зависимость отскока бойка склерометра от их предела прочности на одноосное сжатие, растяжение и дробимость. Обоснована применимость метода экспресс-оценки прочностных характеристик с использованием склерометра на основании установленных зависимостей.

Список литературы

1. Bilim N., Çelik A., and Kekeç B. A study in cost analysis of aggregate production as depending on drilling and blasting design, *J. Afr. Earth Sci.*, 2017, Vol. 134. — P. 564–572.
2. Nikkhah A., Vakyabad A.B., Hassanzadeh A., Niedoba T., and Surowiak A. An evaluation on the impact of ore fragmented by blasting on mining performance, *Minerals*, 2022, Vol. 12, №2. — 258.
3. Бабкин А.И. Оперативный прогноз изменчивости физико-механических свойств продуктивных пластов по данным шахтных сейсмоакустических исследований // *Горн. эхо.* — 2019. — №4(77). — С. 67-72.
4. Калужный А.С., Кузнецов Н.Н. Информационная база данных физических свойств горных пород Ковдорского массива; правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «КНЦ РАН», рег. № 2024624717 от 30.10.2024, заявка №2024624239 от 09.10.2024, бюл. №11.
5. Heidarzadeh S., Saeidi A., Lavoie C., and Rouleau A. Geomechanical characterization of a heterogenous rock mass using geological and laboratory test results: a case study of the Niobec Mine, Quebec, Canada, *SN Appl. Sci.*, 2021, Vol. 3. — 640.
6. Коптяков Д.А., Харисов Т.Ф. Исследование закономерностей прочностных характеристик серпентинитов Житикаринского месторождения // *Проблемы недропользования.* — 2020. — №2(25). — С. 127–133.
7. Барон Л.И. Горнотехнологическое породоведение. Предмет и способы исследований. — М.: МГГУ, 2004. — 249 с.
8. Коптяков Д.А., Харисов Т.Ф. Исследование зависимостей физико-механических свойств серпентинитов Джетыгаринского месторождения // *Горн. журн.* — 2020. — № 5. — С. 29–37.
9. Харисов Т.Ф., Авдеев А.Н., Коптяков Д.А. Анализ результатов определения упругих характеристик горных пород в лабораторных условиях // *Проблемы недропользования.* — 2024. — №3(42). — С. 41–50.
10. Teymen A. and Mengüç E. A Comparative evaluation of different statistical tools for the prediction of uniaxial compressive strength of rocks, *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 2020, Vol. 30, №6. — P. 785–797.
11. Wei-Qiang X., Xiao-Li L., Xiao-Ping Zhang, et al. A review of test methods for uniaxial compressive strength of rocks: Theory, apparatus and data processing, *JRMGE*, 2024.

12. Min Wang and Wen Wan. A new empirical formula for evaluating uniaxial compressive strength using the Schmidt hammer test, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2019, Vol. 123. — 104094.

13. Comakli R. and Cayirli S. A correlative study on textural properties and crushability of rocks, *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2019, Vol. 78. — P. 3541–3557.

14. ГОСТ 21153.0-75. Породы горные. Отбор проб и общие требования к методам физических испытаний. — М.: Изд-во стандартов, 1982. — 5 с.

15. Харисов Т.Ф., Коптяков Д.А. Прогнозные модели оценки физико-механических свойств серпентинитов // *Изв. ТГУ. Науки о Земле*. — 2021. — №3. — С. 230–243.

16. Алексеев А.Ф. Инженерная петрология гипербазитов Баженовского и Джетыгаринского месторождений хризотил-асбеста: автореф. ... дис. канд. геол.-минер. наук. — Екатеринбург, 2005. — 24 с.

17. Котяшев А.А., Корнилов М.В., Русских А.П. Изучение и оценка структурных изменений при взрывном разрушении скальных массивов в динамике развития асбестовых карьеров // *Горн. журн.* — 2017. — №6. — С. 17–24.

18. Кантемиров В.Д., Титов Р.С., Яковлев А.М., Козлова М.В. Исследование горных пород карьера ОАО «Ураласбест» на соответствие требованиям для производства из них строительных материалов // *Маркшейдерия и недропользование*. — 2019. — №3(101). — С. 42–46.

19. ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001. — 15 с.

20. ГОСТ 21153.3-85. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 1986. — 15 с.

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

УДК 622.235; 662.76

ЗАМЕРЫ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ ЭМУЛЬСИОННОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА ПРИ ИНИЦИИРОВАНИИ РАЗЛИЧНЫМИ БОЕВИКАМИ

Бредихин А.Ю., Добрынин А.А.

ИПКОН РАН, г. Москва

Скорость детонации эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ) зависит от многих факторов, в т.ч. от составляющих ЭВВ компонентов, плотности и диаметра заряда. На скорость детонации заряда ЭВВ влияет масса, размеры и форма промежуточного детонатора (боевика), применяемого для инициирования заряда [1].

В рассматриваемой работе представлен анализ результатов эксперимента, в котором были получены параметры скорости детонации

скважинных зарядов ЭВВ «Нитронит», инициированных боевиками, сформированными из ВВ разных видов. Первый боевик формировали из двух пентолитовых шашек ПТ-П-500. В качестве второго боевика применили ЭВВ в патроне массой 1 кг. ЭВВ было получено путём газогенерации эмульсионной матрицы. В настоящее время на многих горных предприятиях делаются попытки перейти от дорогих заводских изделий (шашек-детонаторов) на патроны ЭВВ, которые можно изготавливать вблизи мест их применения, т.е. на объектах взрывных работ.

Измерения скорости детонации проводили в условиях железорудного карьера. Крепость дробимой железной руды составляет 14-16 по шкале Протодяконова. При этом взрывааемый блок был сильно обводнен (около 6 метров скважин были заполнены водой). Длина скважин составляла от 17 до 19 метров, диаметр скважин 240 мм. Замер скорости детонации осуществляли приборами ShotTrack VoD 305.

Замеры показали следующие результаты. При применении боевика из шашек ПТ-П-500, расположенных на уровне подошвы уступа, заряд ЭВВ сдетонировал практически полностью, за исключением примерно 1-2 м в верхней части заряда ЭВВ (рис. 1).

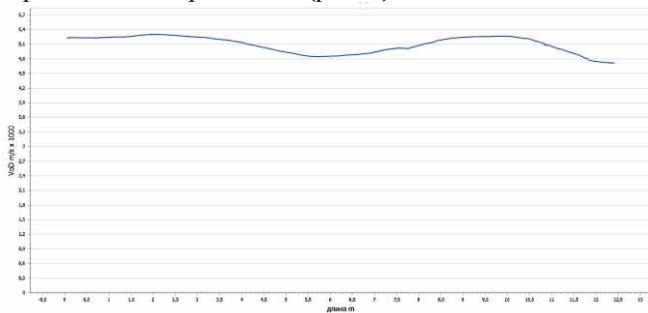


Рисунок 1А - График изменения VoD от длины заряда ЭВВ

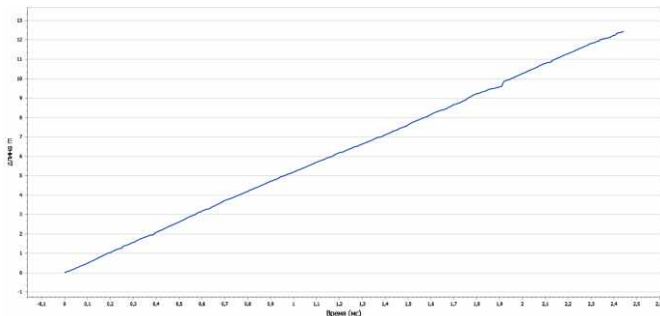


Рисунок 1Б - График изменения длины кабеля от времени

В результате инициирования скважинного заряда ЭВВ боевиком, сформированным из патронированного ЭВВ, результат получился значительно хуже. Импульса патрона ЭВВ оказалось недостаточно, что спровоцировало неполноценную детонацию «волнового» типа (рис. 2).

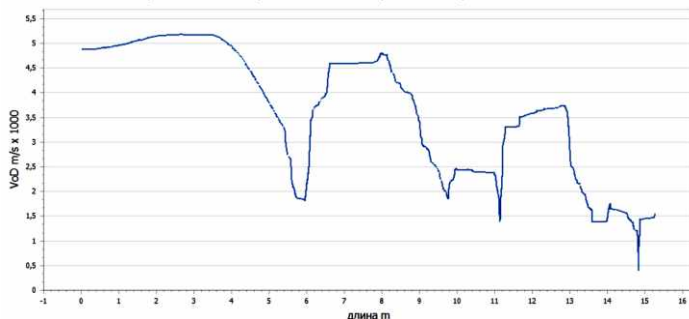


Рисунок 2А - График изменения VoD от длины заряда

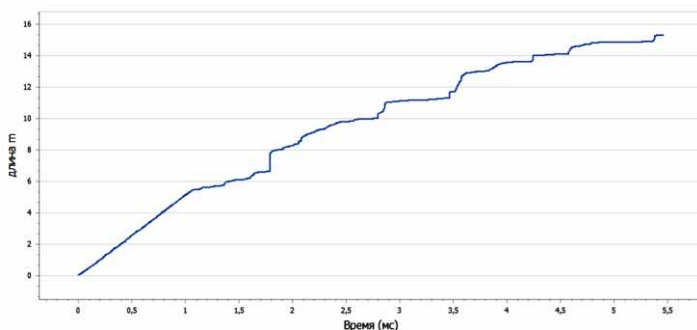


Рисунок 2Б - График изменения длины кабеля от времени

Анализ полученных результатов подтвердил тенденцию, которая уже была замечена исследователями ранее [2-4]. Однако, возвращаясь к результатам работы [1], считаем, что следует изучить влияние на скорость детонации боевиков, сформированных из ЭВВ, значительно большей массы.

Выводы:

Выбор патронированного ЭВВ в качестве боевика обусловлен его дешевизной относительно сопоставимых по массе заводских шашек-детонаторов из индивидуальных ВВ. Однако, как показал эксперимент мощности ограниченного по массе патронированного ЭВВ может оказаться недостаточно для получения качественного детонационного процесса в скважинном заряде ЭВВ, что приводит к плохому дроблению руды.

Для более эффективной работоспособности заряда ЭВВ при применении в качестве боевиков эмульсионных патронов необходимо оптимизировать их массу (не заменять ими шашки-детонаторы один к одному) или менять конструкцию скважинного заряда, например, увеличивать количество боевиков.

Список литературы

1. Добрынин, Иван Александрович. Обоснование параметров промежуточных детонаторов в скважинных зарядах для повышения эффективности дробления горных пород: диссертация ... кандидата технических наук : 25.00.20 / Добрынин Иван Александрович; [Место защиты: Институт проблем комплексного освоения недр РАН]. - Москва, 2010. - 141 с.
2. Фокин В.А. Обоснование геометрических параметров удлиненной шашки-детонатора для обратного инициирования скважинных зарядов газифицированных эмульсионных взрывчатых веществ // Изв. ВУЗов. Горный журнал, 2008, №3, с.49-54.
3. Кутузов Б.Н., Горинов С.А. Иницирование эмульсионных ВВ и гранэмитов промежуточными детонаторами // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2011, №7.- Препринт, С.5-19.
4. Галимьянов Ал.А., Рудницкий К.А., Гильденбрант К.В., Корнеева С.И., Казарина Е.Н., Мишнев В.И. Влияние параметров промежуточного детонатора на скорость детонации смесевых взрывчатых веществ. Горная промышленность. 2023;(3):130–133.

УДК 622.276.53:550.832.2+553.495.2

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФИЛЬТРОВ И ПРИФИЛЬТРОВЫХ ЗОН НА УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

Заиров Ш.Ш.¹, Халимов И.У.², Мехмонов М.Р.²

*¹Алмалыкский филиал НИТУ «МИСИС», г. Алмалык,
Республика Узбекистан*

*²Навоийский государственный горно-технологический университет,
г. Навои, Республика Узбекистан*

Аннотация. В статье рассматривается применение метода газовой детонации для восстановления проницаемости фильтров и прифильтровых зон скважин, используемых при подземном выщелачивании урана. Метод основан на воздействии импульсной ударной волны, возникающей при контролируемом подрыве газовоздушной смеси, что способствует удалению колматирующих отложений и раскрытию поровой структуры вблизи фильтра. Проведён анализ теоретических основ

процесса, рассчитаны основные параметры детонационного воздействия, а также рассмотрены возможные геомеханические последствия для породы и эксплуатационной колонны. Результаты моделирования и экспериментальных испытаний подтверждают эффективность метода для повышения фильтрационных свойств и восстановления производительности скважин на урановых месторождениях.

Введение. Для восстановления производительности скважин применяются различные методы – от химической обработки до гидродинамического воздействия. Однако они имеют ограничения по глубине проникновения и эффективности в сложных геологических условиях. В данной работе рассматривается альтернативный физический способ – метод газовой детонации, основанный на формировании высокоэнергетической волны давления, способной разрушать отложения и восстанавливать проницаемость пород. Исследование направлено на оценку применимости и эффективности этого метода в условиях урановых месторождений с насыщенной водой проницаемой породой.

Метод газовой детонации основан на использовании энергии, выделяемой при взрывном горении горючих и окислительных газов. Процесс сопровождается образованием ударной волны и расширением продуктов сгорания, которые воздействуют на фильтровую поверхность и прифильтровую зону, разрушая кольматирующие отложения и восстанавливая фильтрационные характеристики. Метод применим в условиях рыхлых, водонасыщенных песков с неустойчивыми отложениями, характерных для урановых продуктивных горизонтов [1–3].

Технические характеристики метода газовой детонации приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики метода газовой детонации

Показатель	Значение
Тип газовой смеси	ацетилено-воздушная
Давление перед детонацией	0,1–0,5 МПа
Скорость фронта детонации	до 3000 м/с
Давление в волне	до 30–50 МПа
Продолжительность воздействия	2–10 мс
Эффективный радиус воздействия	до 0,5 м
Интервал между взрывами	0,8–1,0 м по длине фильтра

Пример применения метода газовой детонации приведены в таблице 2 (месторождение Кокпатас, НГМК) [4].

Таблица 2

Параметры применения метода газовой детонации в месторождение Кокпатас, НГМК

Параметр	Значение
Глубина скважин	100–110 м
Тип фильтра	Каркасно-дисковой фильтр, Ø 125 мм
Тип кольматации	Химическая (отложения карбонатов кальция/магния, железооксидов, глинозёма, кремнезёма)
Состав газовой смеси	Ацетилен + воздух (65:35)
Давление	0,4 МПа
Количество циклов	6
Дебит до обработки	0, 576 м ³ /ч
Дебит после обработки	1,1 м ³ /ч
Радиус очистки	~0,5 м

Преимущества метода

- Простота и доступность: используется дешёвое и широко распространённое оборудование;
- Безопасность: нет твёрдых ВВ, ниже требования к промышленной безопасности;
- Локализованное воздействие: снижается риск повреждения фильтра;
- Мягкий характер взрывной волны позволяет использовать в слабых фильтрах [2, 4].

Ограничения метода

- Необходимость перезарядки аппарата после каждого цикла;
- Ограниченный энергетический потенциал по сравнению с ВВ;
- Меньшая глубина проникновения в плотные и цементированные породы [3, 4].

Метод газовой детонации зарекомендовал себя как эффективное и безопасное средство восстановления фильтрационных характеристик технологических скважин, эксплуатируемых в рыхлых водонасыщенных породах урановых месторождений. Энергия, высвобождаемая при взрывном окислении ацетилен-воздушной смеси, формирует ударную волну с давлением до 30–50 МПа и мягким динамическим воздействием на кольматационные отложения. Это обеспечивает разрушение химических

осадков, образующихся в фильтрах и прифильтровых зонах технологических скважин, при сохранности фильтрового элемента, включая полиэтиленовые конструкции, что подтверждено в опытно-промышленных условиях (месторождение Кокпатас, НГМК) [4].

Обсуждение результатов

Полученные данные свидетельствуют о следующих результатах: Дебит скважин увеличился в 1,9 раза (с 0, 576 до 1,1 м³/ч); Радиус восстановления составлял ~0,5 м, что соответствует расчётным значениям [2]; Снижение остаточного напора и устойчивый приток наблюдались на протяжении 6–8 месяцев после обработки [3].

Таким образом, метод газовой детонации может быть рекомендован как малоинерционный, энергоэффективный и адаптируемый к различным геофильтрационным условиям, особенно в случаях, когда применение твёрдых ВВ или высоковольтного оборудования затруднено. Он также может служить альтернативным решением при восстановлении скважин с ограниченным техническим доступом, минимизируя промышленный риск и снижая эксплуатационные затраты.

Заключение

Метод газовой детонации, основанный на воспламенении ацетилено-воздушных смесей, обеспечивает формирование мягкой ударной волны (до 30–50 МПа), позволяющей эффективно разрушать кольматирующие отложения при сохранности фильтра. Он применим в зонах с низкой прочностью фильтра и отсутствием условий для применения ВВ. Радиус восстановления достигает 0,5 м, а экономичность и простота оборудования делают его перспективным в условиях ограниченного доступа к энергетической инфраструктуре.

Список литературы

1. Морозов В.П., Смирнов И.А. Подрывное дело и водонасыщение. – Екатеринбург: УрФУ, 2016. – 200 с.
2. Кучеренко В.В., Казаков Н.Г. Импульсные методы интенсификации ПВ-скважин // Вестник гидрогеологии. – 2021. – №3. – С. 45–52.
3. Tikhonov A., Rudenko S. Shock-wave impact on uranium-bearing aquifers // Journal of Applied Geophysics. – 2022. – Vol. 197. – Article 104579. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2022.104579>
4. Отчёт ОАО «Навоийский горно-металлургический комбинат». Испытания газодетонационного метода восстановления скважин. — ЦНИЛ, 2022. – 17 с.

СНИЖЕНИЕ ТОКСИЧНОСТИ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ ХИМИЧЕСКОЙ СЕНСИБИЛИЗАЦИИ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Маслов И.Ю., Конюхов К.Р., Бредихин А.Ю.

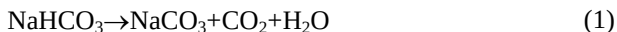
*Автономная некоммерческая научная организация
«Научно-исследовательский институт технологии
и безопасности взрывных работ», г. Москва*

Известно множество химических реакций, которые можно применить для создания газовых микропузырьков в объеме эмульсионного ВВ с целью взрывчатой сенсibilизации последнего (придания восприимчивости к детонационному импульсу и обеспечению устойчивости распространения детонации по всему заряду) [3,4,11,12].

Химическая газогенерация для эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ) предполагает введение газообразующих реагентов, которые при реакции создают газовые пузырьки равномерно распределенные в объеме ЭВВ [5,6,7]. Вот несколько основных способов химической газогенерации ЭВВ:

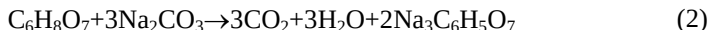
1. Использование реакций разложения:

- Некоторые соединения разлагаются с выделением газа. Например, гидрокарбонаты разлагаются при нагревании с выделением углекислого газа (CO_2).



2. Реакции нейтрализации:

- Кислоты и соли слабых кислот могут реагировать с образованием газа. Пример: реакция между лимонной кислотой и карбонатом натрия, которая образует CO_2 .



3. Реакции с выделением кислорода и других газов:

- Пероксиды и надкислоты могут разлагаться с выделением кислорода (O_2).

- Нитриты могут разлагаться с выделением оксида азота (NO) или азота (N_2).

4. Введение газогенераторов:

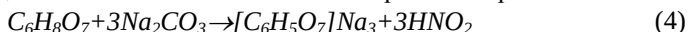
- Специальные химические вещества, которые разлагаются с образованием газа, могут быть добавлены в состав ЭВВ. Примеры включают азид натрия (NaN_3), который разлагается на азот.



На практике, для химической газификации ЭВВ, наиболее широкое распространение получило применение химической реакции между кислотой (в составе эмульсионной матрицы) и водным раствором нитрита натрия. Для примера, рассмотрим химическую реакцию между лимонной кислотой и нитритом натрия в водной среде:

Химическая реакция между лимонной кислотой ($C_6H_8O_7$) и нитритом натрия ($NaNO_2$) может быть представлена как взаимодействие кислоты с нитритом, при котором образуется азотистая кислота (HNO_2), которая затем разлагается на оксид азота (II) (NO), диоксид азота (NO_2) и воду. Вот общее уравнение этой реакции:

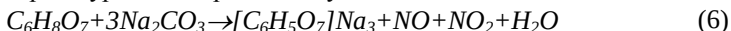
Взаимодействие лимонной кислоты с нитритом натрия:



Последующее разложение азотистой кислоты:



Суммарное уравнение реакции будет иметь вид :



В результате реакции лимонной кислоты с нитритом натрия образуются тринатриевая соль лимонной кислоты ($C_6H_5Na_3O_7$), оксид азота (II) (NO), диоксид азота (NO_2) и вода [1].

Таким образом, в результате химической реакции образуются весьма токсичные оксид азота (II) (NO), диоксид азота (NO_2) – которые будут ухудшать санитарные условия работы взрывперсонала, особенно в условиях замкнутого пространства подземных выработок. В этой связи, необходимо разработать способ химической сенсibilизации, при котором не образуются токсичные газообразные продукты. Предлагается рассмотреть применение тиоцианата натрия в процессе химической сенсibilизации ЭВВ [8,10].

Тиоцианат натрия, в водной среде, может вступать в химические реакции (7, 9) как с оксидом азота (II) (NO), так и с диоксидом азота (NO_2):



В результате реакции (8) образуются две молекулы нитрита натрия ($NaNO_2$), одна молекула сероуглерода (CS_2) и одна молекула газообразного азота (N_2).

В результате реакции (7) образуется неустойчивое комплексное соединение нитрозилтиоцианат натрия. Возможное уравнение разложения нитрозилтиоцианата может быть следующим:

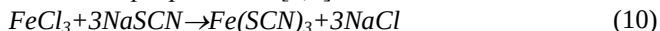


Таким образом, при разложении нитрозилтиоцианата может выделяться газообразный азот (N_2), сероуглерод (CS_2) и диоксид серы (SO_2). Это один из возможных механизмов разложения, а фактические продукты могут зависеть от внешних условий, таких как температура и давление.

Анализ представленных реакций (7), (8) и (9) показывает, что действительно может выделяться не токсичный газообразный азот.

Таким образом, применение в составе газогенирующих добавок тиоцианата натрия, позволит избежать выделения в рудничную атмосферу токсичных оксидов азота (II) и (IV), что улучшит санитарные условия работы подземного персонала рудников.

Кроме того, применение в технологии изготовления ЭВВ тиоцианата натрия имеет дополнительный технический эффект: ионы трехвалентного железа $Fe(3+)$ разрушают аммиачную селитру в составе ЭВВ. Ионы тиоцианата имеют свойство лишать подвижности ионы трехвалентного железа: образующийся при реакции замещения (10) тиоцианат железа (III) выпадает в осадок, разложение селитры под действием трехвалентного железа – прекращается [2,9].



В результате, в осадок выпадает комплексное соединение тиоцианат железа (III) ($[Fe(SCN)_3]$), имеющее характерный красный цвет; эта химическая реакция используется в аналитической химии для качественного определения ионов железа (III).

Выводы:

- Применение тиоцианата натрия в химическом способе газогенерации ЭВВ, позволяет избежать выделения токсичных оксидов азота на стадии заряжания ЭВВ в шпуры и скважины, тем самым улучшая санитарные условия работы взрывперсонала, особенно в стесненных условиях подземных рудников.
- Тиоцианат натрия также предотвращает разложение аммиачной селитры за счет связывания ионов трехвалентного железа (образование нерастворимых соединений).

Описанные химические реакции и механизмы взаимодействия, приведены для понимания способов снижения токсичности газообразных продуктов при сенсibilизации ЭВВ.

Список литературы

1. Колганов Е.В. Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества. - 1-ая книга (Составы и свойства) / Е.В. Колганов, В.А. Соснин - Дзержинск Нижегородской обл.: Изд-во ГосНИИ «Кристалл». - 2009. – 592 с.
2. Кук М.А., 1980. Наука о промышленных взрывчатых веществах / М.А. Кук. - М.: Недра. – 1980. – 453 с.

3. Эмульсионное взрывчатое вещество «Аргунит РХ». Патент на изобретение RU 2622305. Авт.: Савченко Н.В. и др.

4. Эмульсионный взрывчатый состав. Патент на изобретение RU 2810967. Авт.: Оверченко М.Н. и др.

5. Фокин В.А. Распределение плотности эмульсионных взрывчатых веществ по высоте колонки скважинного заряда // Известия вузов. Горный журнал. 2007. № 3. С. 89–95.

6. Иляхин С.В., Маслов И.Ю. Плотность эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ) с химической газогенерацией, содержащих сухую фазу, и ЭВВ, сенсibilизированных пенополистиролом, по высоте скважинного заряда. – М.: Горная книга, 2012. – 12 с.

7. Горинов С.А., Маслов И.Ю. Плотность эмульсионного взрывчатого вещества, сенсibilизированного газовыми порами, по длине восстающего скважинного заряда. – М.: Горная книга, 2013. – 12 с.

8. Ван Суйгуан. Эмульсионные взрывчатые вещества / Пер. под ред. Старшинова А.В.- Красноярск: Metallurg Industry Press. China, 2012. – 380 с. стр. 130-131.

9. Справочник по неорганической химии. Константы неорганических веществ / Р.А. Лидин, Л.Л. Андреева, В.А. Молочко. – М.: Химия. – 1987. – 320 с.

10. Wang Xuguang. Emulsion Explosives. – Beijing : Metallurgical Industry Press, 1994. – 380 p.

11. Тананаев Н.А. «Капельный метод. Качественный анализ неорганических соединений капельным методом». ГНТИ химической литературы. 1954 г., 271 с.

12. Физико-химические и огнеопасные свойства органических химических соединений. Книга 1: Справочник / Г.Т. Земский. – М.: ВНИИПО МЧС России. – 2009. – 502 с.

УДК 622.235

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ГАЗОГЕНЕРИРУЮЩИХ СОСТАВОВ

Сергиенко Н.Н.¹, Васильев Т.В.², Песьяков А.В.²

*¹ Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург*

² ООО «Промстройвзрыв»

Карьеры блочного камня являются источником строительного и строительно-декоративного сырья как для массовых изделий – бордюры, плиты, блоки, так и для единичных, уникальных – памятники архитектуры, скульптуры, статуи.

Важной задачей на таких карьерах является максимальная сохранность сырья [1,2], что обеспечивается полнотой горно-геологической информации о месторождении, особенно касаемо преобладающих систем трещин и учёта этих данных при добыче блоков, например, путём использования подстилающих трещин скольжения, а также использованием таких методов добычи, при которых воздействие на тело блока минимально.

Несмотря на то, что оборудование для механического способа добычи блоков [3,4,5] постоянно совершенствуется, обеспечивая, как правило, лучшую сохранность камня за счёт точечного и растянутого во времени воздействия непосредственно на поверхность реза, что можно сказать и о способе добычи с использованием невзрывчатых разрушающих смесей [6], при котором давление в шпуре нарастает продолжительное время, буровзрывной метод добычи не теряет своей актуальности ввиду обеспечения большей производительности.

При буровзрывном способе добычи блоков большой проблемой является выделение большого количества энергии за малый промежуток времени внутри шпура, что создаёт ударные волны во всех направлениях, что является причиной образования взрывонаведённых трещин [7], которые, в конечном итоге, влияют на выход монолитов, а значит и на экономические показатели предприятия.

На текущий момент при буровзрывном способе добыче блоков всё активнее применяют газогенераторы, режим срабатывания которых отличается от детонационного, что обуславливает более мягкое нагружение массива и отсутствие пагубно влияющих на качество блоков сильных ударных волн.

Один из многих зарядов для отбойки блочного камня – элемент универсальный газогенерирующий (ЭУГ), изготавливающийся по ТУ 20.51.11-001-27287946-2018 [8], представляющий собой полимерный цилиндрический корпус диаметром 25 мм, содержащий в себе окислитель – хлорат натрия. Окислитель, пропитанный дизельным топливом, является простейшей топливо-окислительной смесью, генерирующей при срабатывании газы в количестве 420 л/кг. Для инициирования заряда используется одна нитка ДШЭ-6, пропущенная вдоль корпусов газогенераторов в шпуре. Наиболее значимыми выявленными недостатками ЭУГ являются требование предварительной подготовки (проливка окислителя дизельным топливом) и, согласно инструкции по применению, нижний температурный диапазон применения -35 градусов против -50 у большинства промышленных ВВ.

Непростым вопросом при применении газогенераторов является расчёт параметров БВР, так как часто свойства таких зарядов плохо исследованы. Зачастую не хватает и исследований прочностных свойств

горных пород на месторождении, и часто используются только горно-геологические сведения месторождения в целом, в которых пределы прочности на сжатие и растяжение представлены при квазистатическом нагружении, в то время как при отбойке блоков массив испытывает динамическую нагрузку, что чаще всего учитывается с помощью введения коэффициентов динамичности [9].

Для осуществления качественного откола нужно, чтобы давление в шпуре превысило динамический предел прочности горной породы на растяжение, но не превысило предела прочности на сжатие. Давление в шпуре можно определить расчётным путём по методу Авакяна¹, однако, он применим для бризантных взрывчатых веществ и может давать некорректные значения для газогенерирующих смесей, из-за чего параметры БВР при применении газогенераторов часто подбираются опытным путём.

Измерить давление в шпуре можно путём непосредственного помещения туда датчика с непрерывной регистрацией сигнала, однако, кроме технической сложности и дороговизны осуществления такого эксперимента, велик риск утраты, повреждения или уничтожения последнего.

Другим способом измерения давления непосредственно внутри шпура является метод, который применяют в стрелковом и ствольном вооружении – крешерный метод [10]. Недостатком является измерение только пикового давления в шпуре без динамики его развития во времени, а также сложности математического аппарата для определения давления по величине остаточной деформации крешера, однако, несмотря на эти недостатки, такой способ может быть применим для определения давления, развивающегося в шпуре, чтобы в дальнейшем использовать эту информацию для расчёта параметров БВР.

Для получения развёртки нарастания давления во времени можно использовать манометрическую бомбу Сарро и Вьелля, но нужно учитывать, что это лабораторный метод измерения, в то время как вкладной крешерный прибор пригоден для определения показателей давления в полевых условиях.

Список литературы

1. Yastrebova Karina Namidinovna, Moldovan D.V., Chernobai V. Influence of the nature of the outflow of explosion products from blast holes and boreholes on the efficiency of rock destruction E3S Web of Conferences. 2020. №174. pp. 1-6.

¹ Г.А. Авакян. Расчёт энергетических и взрывчатых характеристик ВВ. Военная инженерная орденов Ленина и Суворова академия имени Ф.Э. Дзержинского. Учебное пособие. 106 с.

2. Jalalian M.H., Bagherpour R., Khoshouei M. Wastes production in dimension stones industry: resources, factors, and solutions to reduce them. *Environmental Earth Sciences*. 2021, vol. 80, no. 560. DOI: 10.1007/s12665-021-09890-2.

3. Усубалиев Ж., Эликбаев К.Т., Райымбабаев Т.О. Обзор технологий отделения блока природного камня от массива с помощью камнерезных машин и гидравлических раскалывателей. *Машиноведение*. 2018. № 2 (8). С. 71-82.

4. Валиев Н.Г., Гармс А.Я., Бычков Г.В. Повышение эффективности баровых и алмазно-канатных камнерезных машин для добычи природного камня открытым способом. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2010. № 8. С. 13-17.

5. Будник П.В., Баклагин В.Н., Галактионов О.Н., Семенов Д.С. Технические решения для распиловки блоков природного камня: анализ патентов. *Наукофера*. 2023. № 5-1. С. 181-186.

6. Сахно И.Г., Касьян Н.Н. Направленное разрушение горных пород невязрывчатыми разрушающими смесями. *Горный вестник*. 2013. № 96. С. 16-20.

7. Zhang Z. X., Chi L. Y., Qiao Y. Fracture initiation, gas ejection, and strain waves measured on specimen surfaces in model rock blasting // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2021, vol. 54, pp. 647—663. DOI: 10.1007/s00603-020-02300-2.

8. Султыгов А.С., Ишейский В.А., Ковалевский В. Н. Улучшение производительности карьера блочного камня за счёт использования новой конструкции шпурового заряда. *Международный научно-исследовательский журнал*, 2020 №9, с. 70-79. DOI: 10.23670/IRJ.2020.99.9.013.

9. Шибаев И.А., Белов О.Д., Сас И.Е. Определение динамических и статических модулей упругости образцов гранитов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. - 2021. - № 4-1. - С. 5-15. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_5.

10. Э.К. Ларман. Курс артиллерии. Том 1. Основания устройства артиллерийских орудий. Москва, 1956. 539 с, с. 70-78.

УДК 622.235

КОНТРОЛЬНЫЕ И ПРИЕМОЧНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ ИНИЦИИРОВАНИЯ «iDet®»

Кондрашов А.В.¹, Добрынин И.А.¹, Добрынин А.А.²

¹Группа ЭВОБЛАСТ, ²ИПКОН РАН г. Москва

26 июня 2025 г. получено Разрешение Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору на применение электронных детонаторов «iDet®» электронной системы инициирования «iDet®», чему предшествовала многолетняя научно-исследовательская

работа (НИР) Группы ЭВОБЛАСТ с Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институтом проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН) в соответствии с заключённым между названными организациями меморандумом о взаимопонимании, научно-техническом сотрудничестве.

Электронные детонаторы «iDet®» электронной системы инициирования «iDet®» (ЭД ЭСИ «iDet®») могут применяться для инициирования зарядов взрывчатых веществ (ВВ) при производстве взрывных работ на земной поверхности и в забоях подземных выработок, не опасных по газу и/или угольной (сланцевой) пыли, при соблюдении требований промышленной безопасности и технической документации. При этом в ЭД в качестве инициирующего (первичного) взрывчатого вещества (ВВ) используется диазодинитрофенол, молекула которого состоит из атомов углерода, водорода, азота и кислорода, следовательно продукты его детонации не будут содержать токсичные соединения свинца или ртути [1].

По условиям применения ЭД ЭСИ «iDet®» относятся к классу «С» (специальный) группы 2 (по классификации приложения № 1 ТР ТС 028/2012). По степени опасности ЭД ЭСИ «iDet®» при транспортировании и хранении относятся к классу 1, подклассу 1.1, группе совместимости «В» по классификации Технического регламента таможенного союза ТР ТС 028/2012 «О безопасности взрывчатых веществ и изделий на их основе» (ТР ТС 028/2012) и ГОСТ 19433-88 «Грузы опасные. Классификация и маркировка», ООН 0511.

Контрольные испытания, проведённые в 2023 г., подтвердили заявленные технические характеристики ЭСИ «iDet®» и представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные технические характеристики ЭД ЭСИ «iDet®»

Технические характеристики, показатели	ЭД ЭСИ «iDet®»
1	2
Длина капсюль-детонатора	85±0,5 мм
Диаметр капсюль-детонатора	6,86±0,04 мм
Материал гильзы	Сталь с антикоррозионным покрытием
Тип инициирующего (первичное) ВВ в капсюль-детонаторе	Диазодинитрофенол (DDNP)
Тип основного ВВ в капсюль-детонаторе	Гексоген (RDX)
Диаметр концевой проволоки ЭД ЭСИ «iDet®»	3±0,1 мм

продолжение таблицы 1

1	2
Цвет концевого провода*	красный
Время срабатывания	от 0 мс до 16000 мс
Точность срабатывания	от 0 мс до 200 мс ± 2 мс; от 200 до 1000 мс ± 1 %; от 1000 мс до 16000 мс $\pm 0,5$ %
Шаг программирования	1 мс
Водостойкость при давлении 3,0 МПа, час	24
Прочность концевого провода на разрыв, Н	98
Температура хранения	от -20°C до +50°C
Температура эксплуатации	от -45°C до +85°C
Срок хранения**	2 года
Примечания: * Цвет концевого провода может меняться в зависимости от заявки потребителя. ** С правом продления срока хранения на 1 год по результатам испытаний на безотказность срабатывания.	

После успешного проведения контрольных испытаний, согласно требованиям ТР ТС 028/2012 в 2025 г. были проведены приёмочные испытания на объектах российских горных предприятий как на земной поверхности (карьеры «Кузнечное-1» и «Ровное», Ленинградская область), так и в подземных условиях (подземный рудник, месторождение «Муртыкты», Учалинский район Республика Башкортостан).

Главной целью приёмочных испытаний, которые были организованы на гранитных карьерах Ленинградской области и в руднике Урала, было определение безопасности использования ЭД ЭСИ «iDet®» при ведении взрывных работ в забоях подземных выработок, не опасных по газу и (или) угольной (сланцевой) пыли, при этом попутно велись НИР в следующих направлениях: отработка технологии при работе в сухих и обводнённых скважинах и шпурах, как на открытых, так и в подземных горных работах; оценка возможности применения ЭД ЭСИ «iDet®» в составе патронов-боевиков, которые изготовлены из патронированных капсуле-чувствительных ВВ, допущенных к постоянному применению на территории стран - членов Таможенного союза; отработка надёжности инициирования выбранных схем инициирования.

ВЫВОД

В результате выполненных НИР, контрольных и приемочных испытаний, проведённых совместно Группой ЭВОБЛАСТ и ИПКОН РАН, допущены к постоянному применению в горной и других отраслях промышленности, а также в строительстве Электронные детонаторы «iDet®» электронной системы инициирования «iDet®», в результате

применения которых, кроме известных преимуществ электронных систем, не образуются соединения свинца и ртути, что способствует улучшению экологической обстановки в местах ведения взрывных работ.

Список литературы

1. Добрынин А.А. Прогресс средств и систем иницирования: вектор роботизации взрывных работ в горной промышленности / Рациональное освоение недр № 6, 2023, с. 60-76.

УДК 622.235

РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ ЭМУЛЬСИОННОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА «ЭВОФОР®»

Кондрашов А.В.¹, Добрынин И.А.¹, Добрынин А.А.²

¹Группа ЭВОБЛАСТ, ²ИПКОН РАН, г. Москва

С уходом в 2022 г. из России зарубежных компаний, специализирующихся на изготовлении эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ), а также на поставках различных компонентов необходимых для изготовления ЭВВ, ассортимент предлагаемых горным предприятиям ЭВВ хорошего качества значительно сократился. В связи с такой ситуацией некоторые российские предприятия и организации пытаются разработать новые ЭВВ, не уступающие по качеству продуктам лучших зарубежных компаний. Начиная с 2022 г. решением импортозамещения технологий в области изготовления ЭВВ и их эффективного применения на объектах горных предприятий занимаются совместно специалисты Группы ЭВОБЛАСТ и ИПКОН РАН.

В результате уже проведённых теоретических и экспериментальных научно-исследовательских работ (НИР) были разработаны: Технические условия ВЗРЫВЧАТОЕ ВЕЩЕСТВО ПРОМЫШЛЕННОЕ «ЭВОФОР®» ТУ 20.51.11-003-79394574-2023, Руководство (инструкция) по его применению, Регламент технологического процесса производства ЭВВ «ЭВОФОР®» и другие документы в т.ч. по изготовлению эмульсионной матрицы (ЭМ) и газогенерирующей добавки (ГГД), необходимые для изготовления ЭВВ «ЭВОФОР®», например, в смесительно-зарядных машинах (СЗМ).

ЭВВ «ЭВОФОР®» - промышленное ЭВВ I класса (по условиям применения), которое изготавливается на местах применения в СЗМ и предназначено формирования зарядов в сухих и обводнённых скважинах для взрывания горных пород с коэффициентом крепости по шкале профессора М.М. Протоdjяконова до 20 на земной поверхности при температуре окружающей среды от минус 50°C до плюс 50°C.

Гарантийное время нахождения ЭВВ «ЭВОФОР®» в скважине до взрыва – 21 сутки.

В зависимости от соотношения эмульсионной матрицы «ЭВОФОР®» по ТУ 20.15.33-002-79394574-2023 (ЭМ «ЭВОФОР®») к сухой фазе разработано семь марок ЭВВ «ЭВОФОР®».

Марки ЭВВ «ЭВОФОР®» и массовые доли компонентов в ЭВВ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Массовые доли компонентов ЭВВ

Марка ЭВВ	Массовая доля компонентов, %			
	ЭМ «ЭВОФОР®»	АС	ГГД *	ДТ
ЭВОФОР® 10	10 ±2	84 ±2	0	6 ±2
ЭВОФОР® 20	20 ±2	75 ±2	0	5 ±2
ЭВОФОР® 30	30 ±2	66 ±2	0	4 ±2
ЭВОФОР® 70	70 ±3	30 ±3	0,1÷1,0	0
ЭВОФОР® 80	80 ±3	20 ±3	0,1÷1,0	0
ЭВОФОР® 90	90 ±3	10 ±3	0,1÷1,0	0
ЭВОФОР® 100	100	0	0,1÷1,0	0
Примечание: * ГГД вводится в состав ЭВВ сверх 100% к ЭМ «ЭВОФОР®» или ее смеси с сухой фазой в количестве необходимом для достижения заданной плотности продукта.				

Основные физико-химические характеристики ЭВВ «ЭВОФОР®» приведены ниже.

Кислородный баланс для разных марок ЭВВ «ЭВОФОР®» различный и находится в пределах от плюс 2,9% до минус 9,19%. Теплота взрыва – 2820–3690 кДж/кг. Объем газообразных продуктов взрыва 973 – 1036 л/кг, при этом объем ядовитых газов в пересчете на СО, не более 12,4 л/кг.

Полученные в экспериментах значения экспериментальных характеристик для разных марок ЭВВ «ЭВОФОР®» составили: критический диаметр для открытого заряда 89 мм; критическая плотность от 0,95 до 1,26 и более, г/см³; скорость детонации открытого заряда диаметром 105 мм от 2700 до 5600 м/с; чувствительность к удару (частота взрывов, %) по ГОСТ 4545-88 равна нулю; чувствительность к нагреву (метод ДГА) – отсутствие экзотермического разложения до $t \leq 170^{\circ}\text{C}$; удельное объемное электрическое сопротивление не более 10^6 Ом м.

ЭВВ «ЭВОФОР®» не чувствителен к детонирующему шнуру и капсюлю-детонатору неэлектрической или электронной системы инициирования. Иницируется от промежуточного детонатора массой не менее 400 г.

ЭВВ марок ЭВОФОР® 10, ЭВОФОР® 20 и ЭВОФОР® 30 является неводоустойчивым. Остальные марки ЭВВ «ЭВОФОР®» являются водоустойчивыми.

ЭМ ЭВВ «ЭВОФОР®» совместима с конструкционными материалами, изготовленными с применением алюминия и его сплавов, сталью с присадками (легированием) хрома и никеля, которые применяются для изготовления СЗМ.

Приёмочные испытания проведены в 2024 г. на карьерах «Кировогорский» и «Центральный» в Мурманской области.

Учитывая положительные результаты промышленных испытаний, Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору 24 декабря 2024 г. выдала Разрешение на постоянное применение ЭВВ «ЭВОФОР®» марок: ЭВОФОР® 10, ЭВОФОР® 20, ЭВОФОР® 30, ЭВОФОР® 70, ЭВОФОР® 80, ЭВОФОР® 90, ЭВОФОР® 100.

ВЫВОД

В результате проведённых НИР разработано, испытано и допущено для применения в горной промышленности ЭВВ «ЭВОФОР®», предназначенное для дробления горных пород с коэффициентом крепости по шкале профессора М.М. Протоdjeяконова до 20 на земной поверхности при температуре окружающей среды от минус 50°C до плюс 50°C при возможности формирования зарядов в сухих и обводнённых скважинах с применением смесительно-зарядных машин.

УДК: 622.235

О ВЗАИМОСВЯЗИ ВЯЗКОСТИ ГОРЮЧЕГО КОМПОНЕНТА И ГРАФЕНОВОГО ПОРОШКА В СОСТАВАХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Мингазов Р.Я., Франтов А.Е., Закалинский В.М., Курьянов М.В.

ИПКОН РАН, г. Москва

Аннотация. В статье рассмотрен новый методический подход при исследовании вопроса применения графенового порошка для модификации свойств жидких углеводородов. Предложено решение по изменению свойств компонентов суспензионных составов гранулитов с учетом эффектов смачивания.

Введение. В последние годы наблюдаются значительные изменения в развитии взрывчатых веществ для горной промышленности, которые также нашли свое отражение в публикуемом списке наиболее рекомендуемых промышленных ВВ для различных условий применения. С этой

целью появилась необходимость в исследовании модернизации взрывчатых составов в особых условиях аспектов разработки месторождений полезных ископаемых [1, 2, 3].

Методика оценки технологических характеристик компонентов простейших составов. Методика состоит из описания выполнения натурального эксперимента по замеру краевого угла смачивания [8, 9] в грубодисперсных системах с твердой дисперсной фазой и жидкой средой для оценки технологических характеристик компонентов ВВ. Натурный эксперимент состоит из двух этапов: подготовка суспензии и замер краевого угла смачивания на приборе DSA25.

Экспериментальная часть. Объект испытания. Определяется краевой угол смачивания суспензии жидких углеводородов с твердым углеродным материалом. В качестве жидких углеводородов используется биодизель промышленного и лабораторного изготовления. В качестве углеродного материала используется графеновый порошок марок RG-S и RG-T. Некоторые приборы и инструменты представлены на рисунках 1-6.

Цель и задача испытаний. Задача испытаний заключалась в определении характеристик суспензии жидких углеводородов с твердым углеродным материалом с целью улучшения технологических свойств при использовании простейших составов. Исследования проводятся в соответствии с Руководством по эксплуатации прибора DSA25 и Руководством по применению прибора DSA25 [4, 5]. Определение краевого угла смачивания суспензии в зависимости от содержания твердого углеродного материала. Суспензия представляет собой смесь жидкого углеводорода (биодизель) с углеродосодержащим материалом (графен). Исследованы параметры суспензии с соотношением: Т/Ж (твердое/жидкое) от 1/10 до 1/5.

Экспериментальное исследование - особенности, результаты и эффекты.



а)



б)

Рисунок 1 - Прибор для измерения краевого угла DSA25 (а) и весы аналитические лабораторные Ньютон (МЛ 6-II В1ЖА) (б)

Весы предназначены для горючего компонента и различных твердых частиц графена с точностью до 0,001 г.

В использовании DSA25 – простой и надежный анализатор формы капли, предназначенный для определения смачиваемости твердых частиц с помощью угла смачивания, а также для поверхностного натяжения жидкостей [4-7].

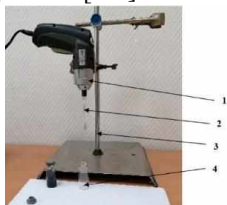


Рисунок 2 – Инструменты для проведения исследования суспензии: 1 - электрическая мешалка; 2 - стеклянная палочка; 3 - стойка; 4 - колба стеклянная

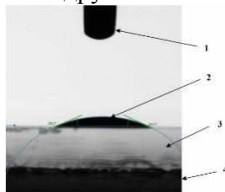


Рисунок 3 – Взвешивании компонентов гранулитов (титановая лопатка, графен и др.)

Следует отметить, что использованная конструкция титановой лопатки и некоторые её другие части были выполнены впервые.



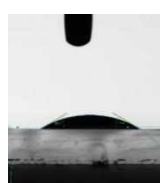
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4 - Замеры краевых углов горючего компонента: а) шприц с иглой 0,51; б) арктического мазута (23.2°, 24.1°); в) биодизель опытный 8.9°; г) биокрауд 30.4°; где 1 - игла шприца; 2 - капля; 3 - стекло; 4 - стойка DSA25 на которой размещается стекло

Заключение

Рассмотрен методический подход в исследовании применения графенового порошка для модификации свойств жидких углеводородов. Предложено решение по изменению свойств компонентов суспензионных составов гранулитов с учетом эффектов смачивания. Показано решение задачи по определению краевого угла смачивания для суспензии с соотношением Т/Ж от 1/10 до 1/5.

Благодарность

Авторы статьи выражают благодарность руководству лаборатории №4.1. «Теории разделения минеральных компонентов»: к.т.н. Каркешкиной А.Ю., к.т.н. Гетман В.В. и аспиранту Ветюгову Д.А. за рабочую атмосферу при проведении исследования на приборе DSA25.

Список литературы

1. Дубнов Л.В. Современное состояние и перспективы развития взрывчатых веществ для горной промышленности. Взрывное дело. – № 49/6. – 1962. – С. 5-17.
2. Викторов С.Д., Франтов А.Е., Лапиков И.Н. Моделирование свойств многокомпонентных простейших взрывчатых веществ. Взрывное дело. – №140/97. – 2023. – с. 19-35. DOI:10.18698/0372-7009-2023-9.
3. Латышев О.Г., Петрушин А.Г., Азанов М.А. Промышленные взрывчатые материалы. Учеб. пос. Екатеринбург. – Изд. УГГУ. – 2009. – 221 с.
4. Руководство по эксплуатации. Программа для приборов DSA. Версия 1.15-02 2014-2022.
5. Прибор для измерения краевого угла DSA 25. Руководство по применению. Версия 3-04.
6. <https://www.atascientific.com.au/products/dsa25-drop-shape-analyser>.
7. <https://granat-e.ru/dsa25.html>.
8. https://ru.wikipedia.org/wiki/Краевой_угол_смачивания.
9. А. Шварц, Дж Перри. Поверхностно активные вещества. — М.: Иностранной литературы, 1953. — С. 250. — 550 с.

УДК 539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПРИРОДНОГО ИЗВЕСТНЯКА ПРИ ВЗРЫВНЫХ НАГРУЗКАХ

Фазылов Т.В., Орлов М.Ю., Глазырин В.П.

*Национальный исследовательский
Томский государственный университет, г. Томск*

Аннотация

В работе представлены результаты полномасштабных экспериментов по исследованию разрушения природного известняка при взрывных нагрузках. Объектом исследования являлся природный известняк, его состояние после подрыва гражданской взрывчатки являлось предметом исследования. Исследовательская площадка была выбрана на одном из карьеров СФО. После подрыва 42 кг взрывной смеси был сформирован взрывной кратер диаметром 450 см и глубиной 250 см.

Введение

В настоящее время актуальным является изучение поведения геологических материалов при взрывных нагрузках. Для увеличения добычи природных ископаемых на Крайнем Севере все еще активно используют взрывные работы. Нередко, доступ к ископаемым может быть осложнен наличием слоев карбоната, гранита и других природных ископаемых.

Горные породы, в том числе карбонатный коллектор являются анизотропной средой, а в определенных условиях их вертикальная трещиностойкость может быть трудно прогнозируемой в условиях взрыва. Образование так называемых системных и несистемных трещин может привести к сложной морфологии разрушения.

В Томском государственном университете уже длительное время ведутся поисковые научные исследования объектами изучения которых являются природные материалы, в том числе лед и природный известняк. Одной из последних инноваций можно считать организацию мобильной лаборатории «Исследование разрушения природных материалов при взрыве» партнерами которой являются МЧС РФ по ТО и ООО «КузбасСпецВзрыв». Вначале экспериментальные результаты основывались на макроскопических наблюдениях, состоящих в установленных формах и размерах взрывных кратеров и майн в природном известняке и ледовых покровах. В дальнейшем, при помощи высокоскоростной съемки удалось воспроизвести процесс разрушения льда и града.

В настоящей работе приведены результаты полномасштабных исследований по подрыву известняка взрывной смесью.

На рис. 1 приведена взрывчатка, состоящая из трех компонентов; гранулита, Эмуласта и селитры аммиачной. Диаметр лунки был равен 10 м, а глубина скважины – 600 см. Масса взрывчатки – 42 кг. Правое фото – взрывной кратер, полученный сразу после взрыва.



Рисунок 1 – Результаты полномасштабных экспериментов: компоненты взрывной смеси (до взрыва) и кратер (после взрыва)

Обсуждение результатов

Установлено, что в результате подрыва в известняковом массиве сформировался взрывной кратер диаметром 450 см и глубиной 250 см. Касательно морфологии разрушения можно заключить, что осколки имели различные размеры, в том числе крупные (до 100 см).

Заключение

Таким образом полученные результаты расширяют исследовательские возможности коллектива и в некоторых случаях могут

использоваться в качестве качественных тестов при апробации алгоритмов расчета задач взрывного нагружения природных материалов.

Благодарности. *Исследование выполнено за счет грант РНФ № 24-29-00187, <https://rscf.ru/project/24-29-00187/>*

Список литературы

1. Орлов, М.Ю. Исследование поведения твердых тел при ударных и взрывных нагрузках. Полномасштабные натурные эксперименты. Лабораторные эксперименты. Численное моделирование / М.Ю. Орлов, В.П. Глазырин, Ю.Н. Орлов // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики - 2017, Томск, 27–29 ноября 2017 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2018. – С. 26-35. – EDN XYVVML.

ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА ВСТАВОК И РАЗМЕЩЕНИЯ ИХ ВНУТРИ ЗАРЯДНОЙ КАМЕРЫ С НЕВЗРЫВНЫМИ РАЗРУШАЮЩИМИ СМЕСЯМИ НА ДЕЗИНТЕГРАЦИИ МАССИВА КАРБОНАТНЫХ ПОРОД

Емельянов Р.В., Гуриева Е.В.

ФГБОУ ВО «СКГМИ (ГТУ)», г. Владикавказ

Аннотация: В статье рассматривается актуальная проблема повышения эффективности разрушения карбонатных пород с использованием невзрывных разрушающих смесей (НРС). Исследуется влияние количества и пространственного расположения жестких вставок внутри зарядной камеры на развиваемое НРС давление и, как следствие, на процесс дезинтеграции горного массива.

Введение

Разработка месторождений полезных ископаемых, в частности карбонатных пород, сопряжена с необходимостью проведения работ по отделению пород от массива. Традиционные методы, основанные на применении взрывчатых веществ, обладают рядом недостатков, таких как значительное сейсмическое воздействие, образование пыли и газов, необходимость эвакуации персонала и техники, а также ограничения по применению вблизи охраняемых объектов или в условиях городской застройки. В связи с этим, поиск и совершенствование альтернативных, более безопасных и экологических методов разрушения горных пород является актуальной научно-технической задачей. Одним из таких методов является использование невзрывных разрушающих смесей (НРС), основанных на принципе медленного расширения материала при его гидратации в замкнутом объеме шпура или скважины.

Целью статьи является экспериментальное исследование влияния количества жестких вставок и их пространственного расположения внутри зарядной камеры, заполненной НРС, на величину развиваемого давления, что напрямую связано с эффективностью дезинтеграции массива карбонатных пород.

Материалы и методы исследования

Экспериментальное исследование по изучению влияния количества и размещения вставок внутри зарядной камеры на развиваемое НРС давление проводилось на специализированной установке, предназначенной для определения рабочих характеристик невзрывных разрушающих смесей.

Сборка рабочей камеры осуществлялась с одновременной установкой в ней необходимого количества жестких металлических вставок. Длина всех используемых вставок составляла 100 мм. Для изучения влияния количества вставок при сохранении постоянного общего относительного их сечения ($S_{\text{вст}}/S_{\text{заб}} \approx 16\%$, где $S_{\text{вст}}$ – суммарная площадь поперечного сечения вставок, $S_{\text{заб}}$ – площадь поперечного сечения зарядной камеры без вставок) был изготовлен специальный набор:

Для изучения влияния расположения вставки внутри зарядной камеры на развиваемое усилие, использовалась одна металлическая вставка, относительная площадь сечения которой составляла 4% от площади сечения зарядной камеры ($S_{\text{вст}}/S_{\text{заб}} = 4\%$). Данная вставка последовательно располагалась по центру шпура (зарядной камеры), у стенки шпура, в промежуточных положениях между центром и стенкой.

Результаты исследований и их обсуждение

В ходе экспериментов по изучению влияния количества вставок, рассредоточенных внутри зарядной камеры, на развиваемое НРС давление, получены данные, позволившие построить соответствующую графическую зависимость. Важно отметить, что во всех этих экспериментах поддерживалось практически постоянное суммарное относительное поперечное сечение вставок, равное приблизительно 16% от площади сечения зарядной камеры. Измерения давления производились через 12 часов после заливки НРС в рабочие камеры.

Результаты данных экспериментов представлены в табл. 1, который иллюстрирует зависимость развиваемого давления от количества использованных вставок. Для наглядности и дальнейшего анализа, данные также сведены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние количества вставок на развиваемое НРС давление через 12 часов после заливки (при общем $S_{вст}/S_{заб} \approx 16\%$)

Количество вставок в зарядной камере, шт.	Диаметр каждой вставки, мм	Суммарная относительная площадь сечения вставок ($S_{вст}/S_{заб}$), %	Развиваемое давление, МПа
1	16	16	≈ 7.8
2	12	16 ($2 \times 8\%$)	≈ 7.4
3	9	≈ 15.9 ($3 \times 5.3\%$)	≈ 7.1
4	8	16 ($4 \times 4\%$)	≈ 7.0

Анализируя данные, представленные в табл. 1, можно констатировать, что с увеличением количества вставок в зарядной камере с НРС (при сохранении их суммарной относительной площади поперечного сечения) наблюдается тенденция к снижению развиваемого смесью давления. Так, при использовании одной вставки (диаметром 16 мм) развиваемое давление через 12 часов составило примерно 7,8 МПа. При увеличении количества вставок до двух (диаметром по 12 мм каждая) давление снизилось до ориентировочно 7,4 МПа. Дальнейшее увеличение числа вставок до трех (диаметром по 9 мм) и четырех (диаметром по 8 мм) привело к снижению давления до $\approx 7,1$ МПа и $\approx 7,0$ МПа соответственно.

Таким образом, переход от одной вставки к четырем вставкам, при сохранении их общего объема (или площади поперечного сечения), приводит к снижению максимального регистрируемого давления примерно на 10,25% (с 7,8 МПа до 7,0 МПа) и согласуется с выводом, о снижении напряжения на 10%.

Вторая серия экспериментов направлена на изучение влияния эксцентриситета расположения единичной жесткой вставки внутри зарядной камеры на величину развиваемого НРС давления. В опытах использовалась одна вставка с относительной площадью поперечного сечения 4% от площади сечения зарядной камеры.

Результаты экспериментов показали, что в условиях проведенных испытаний изменение положения вставки указанного размера внутри зарядной камеры не привело к обнаружению статистически значимой разницы в величине развиваемого НРС давления через 12 часов после заливки.

Таблица 2

Влияние расположения единичной вставки ($S_{\text{вст}}/S_{\text{заб}}=4\%$) на развиваемое НРС давление

Размещение вставки внутри зарядной камеры	Развиваемое давление НРС, МПа (через 12 часов)
По центру шпура	Статистически не отличается
У стенки шпура	Статистически не отличается
Промежуточное положение 1	Статистически не отличается
Промежуточное положение 2 (если предусмотрено схемой)	Статистически не отличается

Отсутствие выраженного влияния расположения такой относительно небольшой вставки (4% по площади сечения) на итоговое давление объясняется тем, что НРС, являясь по сути высоковязкой жидкостью на начальном этапе и твердеющим телом с равномерным расширением в дальнейшем, достаточно эффективно перераспределяет давление по всему объему замкнутой зарядной камеры. Локальные изменения геометрии, вносимые одной небольшой вставкой, могут создавать локальные неоднородности напряжений на самой вставке или в непосредственной близости от нее, но интегральное давление, регистрируемое динамометром как реакция всей системы, усредняется и оказывается малочувствительным к таким изменениям положения. Возможно, при использовании вставок значительно большего относительного размера или иной, более сложной формы, влияние их эксцентриситета могло бы проявиться более заметно

Заключение

На основании проведенных экспериментальных исследований влияния количества и размещения жестких вставок внутри зарядной камеры с НРС на развиваемое давление можно сделать следующие выводы:

1. Увеличение количества металлических вставок в зарядной камере (шпуре), при сохранении их суммарной относительной площади поперечного сечения на уровне около 16%, приводит к снижению максимального развиваемого НРС давления. В условиях проведенного эксперимента, увеличение числа вставок с одной до четырех вызвало снижение развиваемого давления приблизительно на 10% (с $\sim 7,8$ МПа до $\sim 7,0$ МПа через 12 часов после заливки). Полученный результат свидетельствует о том, что рассредоточение общего объема вставок по большему числу элементов оказывает некоторое ингибирующее влияние на процесс набора давления НРС.

2. Изменение пространственного расположения единичной жесткой вставки (с относительной площадью поперечного сечения 4%) внутри

зарядной камеры по центру, у стенки или в промежуточных положениях, в рамках проведенных экспериментов не оказало статистически значимого влияния на величину развиваемого НРС усилия. Для вставок относительно небольшого размера давление, развиваемое НРС, достаточно равномерно распределяется по объему камеры, и точное позиционирование таких вставок не является критичным фактором для величины итогового давления.

Полученные результаты вносят вклад в понимание механизмов работы НРС в присутствии инородных включений в зарядной камере и могут быть использованы для дальнейшей оптимизации параметров буровзрывных работ с применением невзрывных разрушающих смесей при разработке массивов карбонатных пород.

Список литературы

1. Пустобриков В.Н. Разработка способа и обоснование параметров разрушения горных пород с использованием невзрывчатых разрушающих составов при низких температурах: автореферат дис. ... доктора технических наук: 25.00.22, 25.00.20 / Сев.-Кавказ. гор.-металлург. ин-т. — Владикавказ. - 2005. - 49 с.

2. Христоробов, В.Д. Невзрывные способы разрушения горных пород Учеб. пособие по дисциплинам «Мех. разрушение горн. пород», «Процессы и техн. средства мех. разрушения горн. пород» для студентов спец. 0901, 0905, 0906 / В.Д. Христоробов, Л.М. Скоробогатова; Моск. горн. ин-т. - Москва: МГИ. - 1991. - 118 с.

3. Емельянов Р.В., Гуриева Е.В., Агузарова К.К. Дезинтеграции массива карбонатных пород невзрывчатым разрушающим составом шпурами большого диаметра // Научно-практический электронный журнал Оригинальные исследования (ОРИС). - 2024. - № 6. - С. 155-160.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ ОСВОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК:622.6

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ПРИРОДОПОДОБИЯ

Иов И.А.¹, Зырянов И.В.², Кузнецов Н.К.¹

¹ ФГБОУ ВО «ИРНИТУ», г. Иркутск,

² ИПКОН РАН, г. Москва

Создание надежных и высокопроизводительных карьерных экскаваторов с автоматическими системами управления рабочими процессами является приоритетной задачей для отечественного машиностроения и подтверждается программой развития угольной промышленности России 2035 г [1]. Решение этой глобальной задачи требует применения принципиально новых подходов при выборе и обосновании конструктивных параметров машин с рабочим оборудованием прямой механической лопаты, которые позволят улучшить их динамические характеристики и эксплуатационные показатели.

Общая методология проектирования рабочего оборудования экскаваторов-мехлопат сформулирована в фундаментальных трудах Н.Г. Домбровского [2], которой пользуются при выборе рабочих параметров и линейных размеров машин по настоящее время [3,4]. С момента создания первых машин, рассматривались и испытывались различные конструктивные схемы рабочего оборудования, из которых, в процессе эксплуатации и накопления опытных данных, были оставлены наиболее эффективные технические решения. Необходимо отметить, что за последние 40 лет, кинематические схемы рабочего оборудования существенно не изменились и проблемы надежности механизмов приводов и металлоконструкций далеки от окончательного решения [5]. Причиной такого положения дел являются внешние условия эксплуатации машин, изменяющиеся в широком диапазоне даже в пределах одного месторождения. Переменность физико-механических свойств извлекаемой горной массы при углублении карьеров, изменение гранулометрического состава при проведении взрывных работ и качество управления главными механизмами существенно влияют на ресурс машин. Очевидное

решение проблемы надежности рабочего оборудования путем увеличения сечений металлоконструкций приводит к возрастанию массы машины и её стоимости, увеличивает энергопотребление приводов, поэтому в процессе разработки всегда рассматривается некоторое компромиссное решение, удовлетворяющее многим противоречивым требованиям.

В исследованиях последних лет, как отечественных, так и зарубежных, рассматриваются, преимущественно, вопросы надежности и производительности экскаваторов при различных внешних условиях и управлениях, для конкретной кинематической схемы рабочего оборудования. Такое положение дел естественным образом формулирует два вопроса: предел совершенствования механизмов рабочего оборудования карьерных экскаваторов-мехлопат достигнут? И если нет, то в каком направлении следует двигаться?

Ответ на эти вопросы следует искать в методологии проектирования машин, которая формировалась, главным образом, на основе опытной оценки разработанной конструкции. Выбор линейных размеров рабочего оборудования экскаваторов определяется технологией ведения горных работ на предприятии при условии максимального объема вынимаемой горной массы с места стоянки. Каждая экскаваторостроительная фирма имеет свои теоретические подходы для обоснования основных линейных размеров и силовых параметров. Анализ параметров рабочего оборудования карьерных экскаваторов, проведенный на Уралмашзаводе [3], показал, что их сопоставление дает достаточно близкие результаты. В результате, независимо друг от друга, ведущие производители машин приходят к практически идентичным результатам, что указывает на существование некоторых общих закономерностей и взаимосвязей между линейными и силовыми параметрами, которые реализуются при создании рабочего оборудования. Какие это могут быть закономерности?

Поиск ответа на данный вопрос необходимо начинать с рассмотрения рабочего оборудования экскаватора с более общих позиций, а именно, представить его кинематической схемой в виде трехзвенной манипуляционной системы, наделенной соответствующим функционалом. Анализ этих систем в робототехнике показал, что длины звеньев механизма не могут выбираться произвольно, и получение оптимального (компромиссного) решения, удовлетворяющего многим критериям эффективности, обеспечивается при соблюдении определенных соотношений, близких к параметрам биомеханических систем [6] и выражающихся через аффинные (простые) отношения, близкие к золотой пропорции. Исследования пропорций рабочего оборудования гидравлических экскаваторов [7] показало наличие связи их геометрических размеров с биомеханическими системами, в частности, с рукой человека.

Данный результат указывает на существование глубоких связей между объектами живой природы и техническими системами, создаваемыми человеком, и, в частности, рабочим оборудованием карьерных экскаваторов. Согласованность пропорций линейных размеров машин с пропорциями биомеханических манипуляционных систем, которые в свою очередь, имеют тесную связь с золотой пропорцией и числами Фибоначчи, указывает на возможный путь дальнейшего совершенствования машин. Проекция характеристик биомеханических систем на рабочее оборудование экскаваторов позволит установить рациональные соотношения кинематических, силовых и динамических характеристик машин, и повысить функциональный уровень карьерных экскаваторов.

Список литературы

1. Программа развития угольной промышленности России на период до 2035 года.
2. Домбровский, П.Г. Землеройные машины / П.Г. Домбровский, С.А. Панкратов. - М.: Госстройиздат, 1961.
3. Горное оборудование Уралмашзавода / Коллектив авторов. Ответст. ред. состав. Г.Х. Бойко. Екатеринбург: Уральский рабочий. 2003 г. 240 с.
4. Открытые горные работы – XXI век. Справочник. Том 1. Под ред. Анистратова К.Ю.: М.: ООО «Система максимум», 2019. 640 с.
5. Иванов С. Л. Изменение наработки современных отечественных экскаваторов ЭКГ от условий их функционирования // Записки Горного института. – 2016. – Т.221. – С. 692-700.
6. Кобринский А.А., Кобринский А.Е. Манипуляционные системы роботов: основы устройства, элементы теории. – М.: Наука. Главн. ред. физмат. литерат., 1985. 344 с.
7. Побегайло П.А. Исследование пропорций рабочего оборудования одноковшовых гидравлических экскаваторов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № 5. – С. 107-114.

УДК 622.232

ПРИМЕНИМОСТЬ БИОПРОТОТИПОВ В ПРОЕКТИРОВАНИИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧИ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Комаров Д.П.

ИПКОН РАН, г. Москва

Аннотация.

В статье представлены результаты систематизации современных биоинспирированных роботизированных систем, предназначенных

для работы в подземных условиях соответствующих отраслей промышленности, в том числе, горнодобывающей. Актуальность темы связана с необходимостью повышения безопасности и эффективности добычи полезных ископаемых, а также с ограничениями традиционной горной техники в сложных и опасных средах. Рассматриваются основные классы биоинспирированных роботов, включая змееобразные, насекомоподобные, млекопитающие и др. Приведены примеры существующих разработок и проектов, исследовательских прототипов для разведки шахт и инспекции тоннелей. Проведен анализ их преимуществ, ограничений и перспектив внедрения в промышленность.

Введение

Горнодобывающая промышленность является одной из наиболее опасных отраслей, особенно при ведении подземных работ. Основные угрозы:

- обрушение горных пород,
- наличие взрывоопасных и токсичных газов,
- низкая видимость и сложность ориентации,
- повышенная влажность и запылённость,
- высокая вероятность аварийных ситуаций.

По данным Международной организации труда (ILO), более 8% всех несчастных случаев в мире приходится на горнодобывающий сектор, при этом большинство из них связаны с подземной добычей.

Роботизация подземных процессов является одним из ключевых направлений повышения безопасности и производительности. Однако традиционная горная техника — погрузчики, буровые установки и транспортные машины — имеет ограничения при работе в узких выработках и аварийных зонах.

В этих условиях актуальными становятся биоинспирированные роботы, то есть конструкции, созданные по принципам, заимствованным у живых организмов.

Цель данной статьи — провести анализ существующих биоинспирированных решений для подземных работ, выделить основные классы конструкций, рассмотреть их реализованные примеры и определить перспективы внедрения в горнодобывающую отрасль.

Ниже приведены конкретные разработки, уже реализованные или находящиеся на этапе прототипирования, классифицированные по их ключевым функциональным задачам в подземной среде.

Таблица 1

Классификация реализованных биоинспирированных решений по функциональным задачам в подземной среде

№	Название и прототип	Результаты	Перспективы
Локомоция и передвижение в замкнутых и сыпучих средах			
1	RoboClam, морской моллюск [1]	Снижение энергии на зарывание до 40% по сравнению с традиционными методами, работает на глубинах до нескольких метров в рыхлых песках.	Подходит для инспекций, ремонтных работ в сыпучих грунтах, прокладки коммуникаций и бурения в песчаных месторождениях.
Бурение и внедрение в грунт			
2	Mole bot, европейский крот [2]	Скорость бурения — до 1.46 м/ч, масса ≈ 26 кг, диаметр ≈ 25 см — компактная и менее громоздкая, чем традиционные буровые установки.	Геологоразведка, спасательные операции в плотных завалах, планетарное бурение — автономные миссии на Луне/Марсе.
Навигация и ориентация в темноте			
3	Based Tactile Underground Robot, усы грызунов [3]	Эффективное обнаружение микротрещин и аномалий в реальном времени, доступные уведомления о рискованных зонах до обрушений.	Использование в спасательных роботах для оценки состояния завалов и предупреждения клина породы.
Самоадаптация, устойчивость и самовосстановление			
4	Smart Self-Nourishing and Self-Healing Artificial Skin, древесные растения [4]	Быстрое восстановление механических и электрических свойств, до 90% свойств возвращается в течение 10–60 минут, а сенсор сохраняет функцию детекции даже после повреждений.	Оболочка для подземных роботов. Саморегенерация поможет защитить внутренние сенсоры/цепи без полной замены.
Кооперация и коллективное поведение			
5	TERMES, термиты [5]	Построены структуры различного вида — стены, башни, лабиринты, показали устойчивость к выходу из строя отдельных членов.	Масштабируемость с сотнями миллионов дешёвых кооперирующихся машин.

RoboClam разработан в MIT и представляет собой устройство, которое с помощью колебательных движений и подачи воздуха создает локальные потоки, «разжижая» грунт перед собой, что значительно снижает усилия для зарывания и перемещения в песчаном субстрате.

Mole bot разработан в KAIST для автономного бурения в плотных породах. Его дизайн включает ударно-ротационный наконечник (имитирующий зубы крота) и систему копательных лап, позволяющую направлять и удалять грунт без использования бурового раствора.

RM3 — автономный подземный робот, оснащённый Biomimetic Whisker Sensors (BMWS). Усы служат для раннего выявления трещиноватых структур, изменений в грунте и вибраций, что позволяет своевременно реагировать на опасные условия, вроде обрушений.

Обсуждение результатов

Анализ существующих разработок показывает, что живые организмы — от растений и кротов до термитов и моллюсков — обладают механизмами, способными эффективно функционировать в условиях ограниченного пространства, высокой влажности, давления, плохой освещенности и нестабильной структуры среды. Перенос этих решений в инженерные конструкции позволяет создавать роботов с улучшенными характеристиками — такими как локомоционная эффективность, адаптивность, устойчивость к повреждениям, способность к коллективному поведению и навигации без внешних ориентиров.

Заключение

Реализованные проекты демонстрируют реальную применимость био-прототипов в робототехнических системах. Эти разработки не только доказывают жизнеспособность подхода, но и формируют новое направление в горной технике, направленное на создание автономных, чувствительных и высокоадаптивных роботов.

Список литературы

1. K.N. Nordstrom, D.S. Dorsch, W. Losert, A.G. Winter. A Microstructural View of Burrowing with RoboClam, Institute for Physical Science and Technology, and Department of Physics, University of Maryland, USA Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, USA and Current affiliation: Department of Physics, Mount Holyoke College, USA (Dated: September 9, 2021).
2. Lee, J., Tirtawardhana, C., Myung, H. Development and analysis of digging and soil removing mechanisms for mole-bot: Bio-inspired mole-like drilling robot. In 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2020 (pp. 7792-7799). Article 9341230 (IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems). Institute of Electrical and Electronics Engineers.
3. Gomez, Virgilio & Remmas, Walid & Hernando, Miguel & Risto-lainen, Asko & Rossi, Claudio. (2024). Bioinspired Whisker Sensor for 3D Map-ping of Underground Mining Environments. Biomimetics. 9. 83. 10.3390/biomimetics9020083.

4. Gao, X.; Su, J.-F.; Wang, S.; Yang, P. Smart Self-Nourishing and Self-Healing Artificial Skin Composite Using Bionic Microvascular Containing Liquid Agent. *Polymers* 2022, 14, 3941.

5. Justin Werfel et al, Designing Collective Behavior in a Termite-Inspired Robot Construction Team. *Science* 343, 754-758 (2014).

УДК 552.574.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБРАБОТКИ КЕРНОВ УГЛЯ ЖИДКИМ АЗОТОМ НА ИХ ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТЬ

Рыбалкин Л.А., Сердюков С.В., Сердюк И.М.

ИГД СО РАН, г. Новосибирск

Аннотация. В данной работе представлены результаты лабораторных исследований изменения газопроницаемости проб угля после обработки их жидким азотом. Результаты исследования могут быть полезны при разработки новых технологий и подходов разупрочнения углепородного массива методами криогенной обработки для интенсификации дегазации.

Введение

В настоящее время вопрос обеспечения безопасности работы горного предприятия по добыче угля шахтным способом стоит особенно остро. Виной тому постоянное увеличение газоносности угольных пластов с ростом глубин отработки перспективных участков и темпов выемочных работ. Осуществление очистных операций, в особенности заблаговременной дегазации неразгруженных пластов, осложняется постоянно ухудшающимися с глубиной горно-геологических условий, в особенности газопроницаемости углепородного массива. Повышение отдачи пластового газа осуществляют за счет искусственного расклинивания существующих и созданием новых трещин в угле. Традиционным является метод гидроразрыва пласта, однако в шахтных условиях необходимо модернизировать традиционный подход. Одним из перспективных направлений является обработка угольного материала жидким азотом [1] – [4]. За счет резкого снижения температуры окружающей среды, вода находящаяся в порах угля, начинает замерзать, тем самым расширяясь в объеме и создавая новые фильтрационные каналы. Исследования в области обработки угля жидким азотом помогут лучше понять механизм расклинивания трещин, а также оптимизировать подходы и параметры технической стороны реализации метода криогенной обработки угольных пластов для интенсификации дегазации.

Обсуждение результатов

В качестве материала для экспериментального исследования использовался слоистый мелкопористый уголь марки ДГ из Моховского угольного разреза (Кузбасс). Из крупногабаритных кусков были выбурены цилиндрические образцы (керны) диаметром 30 мм, высотой 55-60 мм. Бурение производили в нескольких направлениях: вдоль напластования (пр) и перпендикулярно (пп) слоистости угля. Часть кернов высушивали в течение 2 суток при температуре 60°C [5], другую часть насыщали дистиллированной водой при вакуумировании на протяжении 3 суток.

Воздействие выполняли в один или несколько циклов (до 5) «замораживание-размораживание», в каждом из которых уголь погружали на 30 мин в жидкий азот до прекращения кипения и промерзания до температуры минус 196°C, а затем размораживали при комнатной температуре в течение нескольких часов.

До и после LN2 воздействия исследовали проницаемость сухого угля на специальной лабораторной установке, ее зависимость от гидростатического сжатия и градиента давления фильтрации. Так же дополнительно изучали изменение структуры порового пространства методами сравнения масс сухих и водонасыщенных образцов [16], ядерного магнитного резонанса (ЯМР), оптической микроскопии.

Таблица

образец	начальная проницаемость k_0 и ее изменение под влиянием воздействия k_i/k_0									
	$\sigma=1$ МПа		$\sigma=2$ МПа		$\sigma=3$ МПа		$\sigma=4$ МПа		$\sigma=5$ МПа	
	k_0 , мД	k_i/k_0	k_0 , мД	k_i/k_0	k_0 , мД	k_i/k_0	k_0 , мД	k_i/k_0	k_0 , мД	k_i/k_0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1пр	3.74	3.3	1.43	4.9	0.68	5.8	0.31	6.5	0.19	7.2
2пр	0.98	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3пр	0.37	4.7	0.12	3.7	0.056	5	0.034	4.7	0.027	3.6
4пр	2.85	5.5	1.21	5.1	0.50	6.2	0.3	5.2	0.16	6.2
5пр	1.17	11.5	0.89	9.2	0.36	12.4	0.24	9.9	0.15	9.7
6пр	0.14	14.4	0.045	11.4	0.014	17	0.006	18	0.003	13
7пр	2.92	6.4	1.74	5.5	0.71	6.9	0.31	7.7	0.17	10
8пр	2.57	5.8	1.22	3.0	0.29	5.6	0.18	4.8	0.083	9.9
9пр	0.1	18.6	0.014	65.2	0.016	20.5	0.008	34	0.002	95

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
10пр	0.01	256	0.011	183	0.027	34.7	0.010	57	0.005	65
1пп	6.74	66	2.26	54	0.58	92	0.20	139	0.04	333
2пп	4.83	66	-	-	-	-	-	-	-	-
3пп	1.11	1728	1.44	443	0.41	772	0.04	3351	0.03	2825
4пп	4.17	336	1.60	300	0.30	841	0.18	668	0.08	881
5пп	4.59	440	0.77	707	0.27	952	0.06	1934	0.04	1630

Приведенные в таблице данные показывают, что начальная проницаемость у тестируемых образцов сильно различается. Для образцов, выбуренных поперек слоистости угля (ПП1-ПП5), значения k_0 относительно близки друг другу и при минимальном $\sigma=1$ МПа лежат в пределах от 1.11 до 6.74 мкД, отличаясь в 6.5 раз.

Для образцов, выбуренных вдоль слоистости, ситуация иная. Среди них выделяются группы с проницаемостью при $\sigma=1$ МПа более 2-3 мД (1ПР, 4ПР, 7ПР, 8ПР), около 1 мД (2ПР, 5ПР), десятые доли мД (3ПР, 6ПР, 9ПР). Максимальное и минимальное значения проницаемости кернов типа ПР при $\sigma=1$ МПа отличаются в 38 раз. Отчасти это связано, как уже отмечалось, с макронеоднородностью тестируемого угля, отчасти – с разной ориентацией образцов относительно основных систем кливажа.

Увеличение гидростатического сжатия с 1 до 5 МПа снижает проницаемость образцов ПР (за исключением 10ПР) в 8–46 раз, в среднем в 26 раз, образцов ПП – в 41–173 раза, в среднем в 94 раза. То есть анизотропия фильтрационных свойств тестируемого угля увеличивается с ростом горного давления. Аномально низкая проницаемость образца 10ПР и ее слабая зависимость от гидростатического сжатия более характерны для пород с преимущественно поровой проводимостью.

Заключение

Полученные результаты подтверждают выводы других исследователей (см. пункт 4.5). Наблюдается заметное увеличение трещиноватости. Установлено, что криогенное LN2-воздействие увеличило проницаемость плотного угля в 25–500 раз. Причем зависимость проницаемости от горного давления под влиянием воздействия снижается. Так, до воздействия повышение гидростатического сжатия угля с 1 до 5 МПа уменьшало проницаемость образцов в 100 раз, после воздействия – лишь в 4 раза.

Благодарности. Исследования проведены в рамках научного проекта РНФ №25-27-00060

Список литературы

1. Ruiyue Yang, Chunyang Hong, Zhongwei Huang, Xianzhi Song, Shikun Zhang, Haitao Wen / Yang Ruiyue / Coal breakage using abrasive liquid nitrogen jet and its implications for coalbed methane recovery. *Applied Energy*. 2019. Vol. 253. P. 113485
2. Zhongwei Huang, Shikun Zhang, Ruiyue Yang, Xiaoguang Wu, Ran Li, Hongyuan Zhang, Pengpeng Hung / Huang Zhongwei / A review of liquid nitrogen fracturing technology. *Fuel*. 2020. Vol. 266. P. 117040,
3. Longinos S., Lei Wang, Loskutova A., Dichuan Zhang, Hazlett R. / S. Longinos / Cyclic LN2 Treatment of Coal Samples from Coal Basin in Kazakhstan. SPE-209697-MS. 2020. DOI: 10.2118/209697-MS
4. Шкуратник В.Л., Николенко П.В., Ануфренкова П.С., Эпштейн С.А. / В.Л. Шкуратник / Закономерности криотермического разрушения углей по данным спектрального анализа результатов ультразвукового прозвучивания // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2021. – № 1. – С. 3-12.
5. ГОСТ Р 59248–2020. Угли бурые, каменные, антрацит, горючие сланцы и угольные брикеты. Методы отбора и подготовки проб для лабораторных испытаний. - М., Стандартиформ, 2021. – 23с.

УДК 622.27.326

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОТРАБОТКИ ПОЛОГИХ ЗАЛЕЖЕЙ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

Никитин И.В.

ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург

Обеспечение устойчивого развития горных предприятий в условиях рыночной экономики связано с решением комплекса задач по достижению максимального эффекта от использования имеющихся в их распоряжении минерально-сырьевых ресурсов. Особое значение эта взаимосвязь имеет при освоении месторождений с низким содержанием полезных компонентов. К таким следует отнести месторождение сульфидных медно-никелевых руд «Норильск-1», представленное преимущественно вкрапленными рудами. Особенности эксплуатации данного месторождения являются: пологое падение (до 15°) и переменная мощность (от 5 до 45 м) рудных тел, наличие трещиноватых и слабоустойчивых подстилающих пород, и вместе с тем крепких и устойчивых налегающих пород, обуславливающих необходимость принудительной посадки кровли.

Традиционные технологии подземной добычи, применяемые для выемки пологих залежей малой и средней мощности, – камерно-столбовая система разработки с оставлением ленточных целиков, система этажного

обрушения с торцовым выпуском руды – характеризуются высокими потерями руды (до 20-50%) и не менее высоким разубоживанием (до 25-30%), а также большими затратами на подготовку и очистную выемку [1].

Совершенствование традиционных технологий добычи в направлении устранения основных их недостатков путем сочетания систем разработки разных классов с целью улучшения показателей извлечения и снижения затрат является актуальной научно-технической задачей.

В результате выполненных исследований, включающих изыскание, конструирование, оптимизацию параметров и технико-экономическое сравнение вариантов систем разработки [2, 3], установлено, что повышение полноты и качества извлечения запасов и снижение затрат на подготовку и очистную выемку, возможно путем применения комбинированной системы разработки (КСР), сочетающей этажно-камерную систему с сухой закладкой (или заполнением принудительно обрушенными налегающими породами) и систему этажного обрушения с торцевым выпуском руды.

Для отработки залежей мощностью 5-10 м предложен вариант КСР, предусматривающий отработку камер с последующей их закладкой пустой породой и выемкой междукamerных целиков (МКЦ) технологией этажного обрушения совместно с отбойкой налегающих пород (рис. 1). Параметры блока: длина – 100 м, ширина – 16-24 м, высота – 5-10 м.

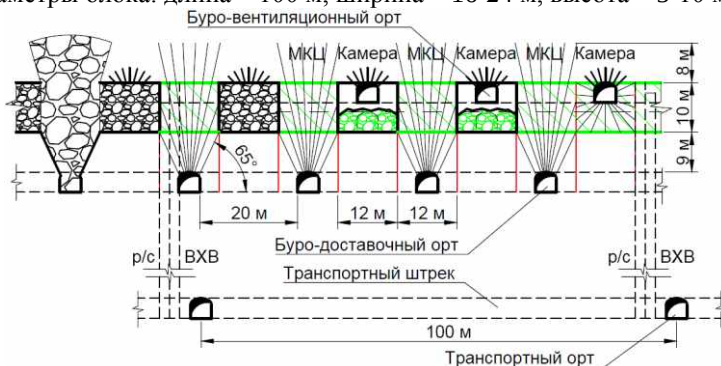


Рисунок 1 - КСР для выемки пологих залежей малой мощности

Вывемка камерных запасов ведется путем секционной (2-3 слоя) отбойки нисходящих веером скважин, разбуренных из буровентиляционного орта, располагаемого в кровле камеры, с последующим выпуском и доставкой отбитой руды из очистного пространства камеры до рудоспуска с помощью погрузо-доставочной машины (ПДМ) с дистанционным управлением (ДУ). Отсыпка породы в отработанной камере ведется из буровентиляционного орта в кровле камеры. Для

повышения устойчивости кровли камеры производится ее анкерное крепление до начала производства буровзрывных работ. Выемка МКЦ ведется путем послойной отбойки восходящих вееров скважин, разбуренных из буро-доставочного орта, и торцевого выпуска руды с помощью ПДМ. Одновременно с отбойкой МКЦ производится обрушение налегающих пород и формирование выпускной траншеи.

Для отработки залежей мощностью 10-20 м предложен вариант КСР, предусматривающий отработку камер с последующим принудительным обрушением налегающих пород и выемкой МКЦ технологией этажного обрушения (рис. 2). Параметры блока: длина – 100 м, ширина – 24-32 м, высота – 10-20 м.

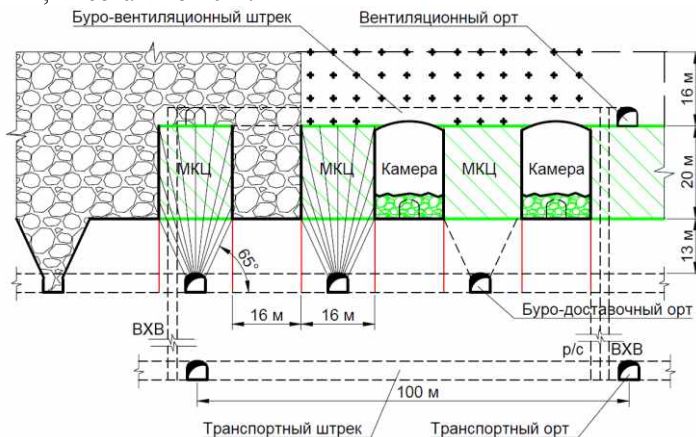


Рисунок 2 - КСР для выемки пологих залежей средней мощности

Выемка камерных запасов ведется путем секционной (2-3 слоя) отбойки восходящих вееров скважин, разбуренных из буро-доставочного орта, располагаемого на контакте рудного тела с подстилающими породами, с последующим выпуском и доставкой руды из очистного пространства камеры с помощью ПДМ с ДУ. Принудительное обрушение налегающих пород производится одномоментно по всей площади блока путем взрывания встречных вееров скважин, разбуренных из фланговых буро-вентиляционных штреков, располагаемых в налегающих породах. Выемка МКЦ производится путем послойной отбойки и торцевого выпуска руды под обрушенными породами из траншеи с помощью ПДМ.

Оба варианта предусматривают камерно-целиковый порядок отработки этажа с расположением камер и МКЦ вкрест простирания залежи.

Результаты технико-экономического сравнения вариантов систем разработки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные показатели по вариантам систем разработки

Показатель	Ед. изм.	Система разработки				
		этажного обрушения		камерно-столбовая	комбинированная	
Мощность залежи	м	10	20	10	10	20
Потери	%	25,0	20,0	50,0	12,8	13,6
Разубоживание	%	30,0	25,0	8,0	17,5	20,7
Удельный объем ПНР	м ³ /1000т	80,0	35,0	102,0	90,3	45,1
Удельные затраты на добычу руды	руб/т	3900	3000	4870	3480	2730

Таким образом, предложенные варианты КСР по сравнению с традиционными технологиями позволяют одновременно снизить потери руды в 1,5-2 раза, разубоживание в 1,2-1,7 раза и эксплуатационные затраты на добычу руды на 10-14%.

Список литературы

1. Пути повышения эффективности подземной разработки пологих месторождений бедных комплексных руд / И.В. Соколов, Ю.Г. Антипин, К.В. Барановский, А.А. Рожков, И.В. Никитин // Проблемы недропользования. 2022. № 4 (35). С. 33-43.
2. Обоснование конструкции и параметров комбинированной системы разработки пологой залежи бедных комплексных руд / И.В. Соколов, Ю.Г. Антипин, И.В. Никитин, Р.В. Криницын // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 5-1. С. 88-104.
3. Обоснование рациональной конструкции днища блока при комбинированной системе разработки пологих залежей средней мощности / И.В. Соколов, Ю.Г. Антипин, И.В. Никитин, Ю.М. Соломеин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. № 3. С. 5-12.

ПАРАМЕТРЫ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕХЛОПАТ ДЛЯ РАЗРЕЗОВ КУЗБАССА

Федотенко В.С.¹, Матвеев А.В.²

¹ИПКОН РАН, г. Москва

²ФГБОУ ВО «СибГИУ», г. Новокузнецк

На разрезах Кузбасса для выполнения вскрышных работ широко применяются экскаваторно-автомобильные комплексы с использованием механических лопат (ЭАКМЛ). При этом более 80% пород разрабатывается

с предварительным рыхлением буровзрывным способом, которые относятся к III и IV категориям по взрываемости [1-4].

Эффективность функционирования ЭАКМЛ существенно зависит от выбора параметров технологических процессов, начиная от подготовки горной массы к выемке и заканчивая укладкой породы в отвал.

Механические лопаты ЭАКМЛ характеризуется широким диапазоном вместимости ковша - от 6,3 до 55,8 м³, при этом используются автосамосвалы грузоподъемностью от 55 до 360 тонн, станки для бурения скважин диаметром от 170 до 270 мм, а прием горной массы на отвалах и выполнение вспомогательных операций обеспечивается бульдозерной техникой различных модификаций мощностью от 354 до 433 кВт.

Принимая во внимание разнообразие работающего оборудования и условий ведения горных работ, возникает объективная необходимость обоснования рациональных технологических параметров для конкретного участка горных работ или сравнения эффективности работы ЭАКМЛ в зависимости от типа оборудования всех звеньев технологической цепи.

Основным процессом исследуемой технологии является подготовка пород к выемке. Критерием оценки процесса БВР принято считать величину $d_{св}$ – средневзвешенного размера кусков взорванных пород, который, как известно, характеризует производительность экскаватора, определяет величину коэффициента экскавации, время, затрачиваемое на набор ковша, а также тип, количество оборудования ЭАКМЛ и величину суммарных удельных затрат на разработку вскрыши.

Средневзвешенный размер кусков взорванной породы служит важным критерием эффективности всей технологической цепи.

При этом величина средневзвешенного размера куска является основным фактором, позволяющим определять параметры каждого процесса принятой технологии, а сопоставляя варианты – выбрать тот, который обеспечивает минимум суммарных затрат по всем процессам в конкретных условиях работы комплекса [5-6].

Таким образом, в результате перебора различных значений $d_{св}$ может быть выбрана его величина, соответствующая минимуму совокупных удельных эксплуатационных затрат, а параметры процессов в этих условиях работы комплекса можно считать оптимальными [7].

В работе решен ряд задач: разработана единая формула для определения производительности современных мехлопат с вместимостью ковша 6,3 до 55,8 м³ в зависимости от величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород, высокая достоверность которой подтверждена при сравнении расчетных значений с хронометражными, полученных на разрезах в результате опытно-промышленной проверки;

разработаны алгоритм и методика определения оптимальных параметров ЭАКМЛ; установлены графические зависимости изменения удельных эксплуатационных затрат на разработку одного кубометра вскрыши в условиях разрезов Кузбасса от величины средневзвешенного размера кусков взорванной горной массы при применении мехлопат с вместимостью ковша $6,3 \div 55,8 \text{ м}^3$ для III и IV категории пород; разработан экс-пресс-метод – номограмма для выбора типа экскаватора или их количества при проектировании или планировании горных работ. Установлены значения минимальных издержек и сменной производительности мехлопат при разработке вскрышных пород III и IV категории ЭАКМЛ с вместимостью ковша $6,3 \div 55,8 \text{ м}^3$ для условий разрезов Кузбасса и параметры процессов, обеспечивающие оптимальные условия ведения работ.

Эти рекомендации и методический подход, позволяют техническим службам разрезов и проектировщикам оперативно на стадии принятия решения с достаточной точностью определять состав ЭАКМЛ для конкретных условий разреза в соответствии с установленными требованиями по обеспечению плановой добычи.

Список литературы

1. Ненашев А.С., Федотенко В.С., Федотенко Н.А. Развитие и состояние применяемых видов технологии ведения горных работ и систем разработки на разрезах Кузбасса. Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2023; 3: 249-268.

2. Ненашев А.С., Федотенко В.С. Организационные условия высокопроизводительной работы мощных экскаваторно-автотранспортных комплексов на разрезах. Маркшейдерия и недропользование. 2019; 6 (104): 49-52.

3. Чаплыгин В.В., Садыков А.А., Матвеев А.В. К вопросу оптимизации параметров технологии разработки полускальных вскрышных пород на разрезах Кузбасса. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023; 9: 84-98.

4. Сермин Д.С., Матвеев А.В., Лобанова О.О. Анализ качества взорванных горных пород на основе интегрального распределения энергии. Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: сб. трудов конф. Новокузнецк, 2020: 210-212.

5. Кононенко Е.А., Исаченков А.Б. Влияния кусковатости взорванных пород на производительность экскаватора Висугус 495HD. Маркшейдерия и недропользование. 2014; 6: 17-19.

6. Федотенко В.С., Чаплыгин В.В., Матвеев А.В. Оптимизация параметров технологии разработки полускальных вскрышных пород экскаваторно-автомобильными комплексами с применением мехлопат. Маркшейдерия и недропользование. 2024; 1: 17-31.

7. Матвеев А.В. Параметры технологии разработки полускальных вскрышных пород экскаваторно-автомобильными комплексами в условиях

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕКЛАССИФИЦИРОВАННЫХ ПОРОД ОТ ПРОХОДКИ ВЫРАБОТОК ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ЦЕМЕНТО-ПОРОДНОЙ ЗАКЛАДКИ

Гавриленко В.В.¹, Пацкевич Д.П.²

¹*ИПКОН РАН,*

²*РГГРУ имени Серго Орджоникидзе, г. Москва*

Применение систем разработки с закладкой выработанного пространства при подземной разработке руд с высокой ценностью позволяет значительно повысить извлечение полезного ископаемого из недр и улучшить геомеханические условия ведения горных работ. Наиболее эффективным является применение твердеющих закладочных смесей.

Одним из видов твердеющей закладки является цементно-породная закладка (CRF) широко применяемая за рубежом и относительно редко в России. На зарубежных предприятиях чаще всего используют классифицированные вскрышные породы и породы от проходки горных выработок.

В данной работе было выполнено обоснование возможности применения неклассифицированных по крупности пород с целью снижения стоимости закладочных работ.

Лабораторные исследования включали следующие виды работ:

- разработка состава закладочной смеси, состоящей из пустой породы и цемента;
- изучение физико-механических, рентгеновских, химических свойств и морфологического состава закладочной смеси;
- изучение изменения физико-механических свойств образцов закладочных массивов в нормативные периоды времени.

1. В ходе анализа горно-геологических условий установлено: негативного влияния гидрогеологических условий на формирование закладочных массивов не ожидается; руды и породы месторождения относятся к неагрессивным по отношению к бетону и не содержат компонентов, мешающих твердению; температурные условия для гидратации и набора прочности являются удовлетворительными; вмещающие породы месторождения пригодны для использования в составе бутобетонной закладки за исключением группы малопрочных пород с пределом прочности менее 15 МПа; количество глинистых и пылеватых частиц не превышало 8%.

Сопоставление фактических и эталонных кривых Фуллера на ряде месторождений показывает, что неклассифицированные породы наиболее близки к эталонной кривой при $n=0,5$. Что позволяет сделать вывод о том, что на их основе возможно формирование высокоплотных закладочных массивов. Это также подтверждается фактическим опытом на ряде рудников России, использующих породную либо бутобетонную закладку.

На основе полученных данных можно разработаны модельные составы смесей инертного заполнителя для проведения лабораторных исследований, отличающиеся удельным содержанием крупной, средней и мелкой фракций.

Результаты лабораторных исследований позволяют сделать следующие выводы:

- определяющим для прочностных свойств закладочных массивов является наличие мелкой и средней фракций, чья доля должна составлять от 40% и выше;
- разработанные составы соответствуют по своему фракционному составу типичному фактическому фракционному составу пород, формирующихся при проходке подземных горных выработок;
- разработанные рецептуры позволяют обеспечить требуемую нормативную прочность закладочного массива 1,5 МПа в возрасте 7 суток и 4 МПа в возрасте 28 суток.

На основании проведенных лабораторных исследований рекомендованы рецептуры закладочных смесей на основе пород, цемента и воды с нормативной прочностью 1,5 МПа в возрасте 7 суток, 2,5 и 4,0 МПа в возрасте 28 суток.

УДК 001.891.578

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА В ОБЛАСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ, ПЕРЕСЕКАЮЩЕЙ ВЫСОКОПРОНИЦАЕМЫЙ СЕГМЕНТ ИЛИ РАЗРЫВ

Рыбалкин Л.А., Сердюков С.В., Сердюк И.М.

ИГД СО РАН, г. Новосибирск

Аннотация. В данной работе представлены результаты разработки крупногабаритной физической модели неоднородной среды для исследования развития трещины гидроразрыва в области цилиндрической полости секущей высокопроницаемый сегмент или разрыв. Разработка

подобных средств физического моделирования процессов трещинообразования будет полезна для исследования оптимальных параметров пространства трещин в неоднородных средах для последующего создания противифльтрационных завес в шахтном поле по результатам лабораторных исследований.

Введение

Разработка угольных месторождений шахтным способом сопряжена с постоянным обеспечением безопасных условий труда. Постоянное изменение геомеханических полей напряжений, вызванное наращиванием темпов отработки и ухудшении горногеологических условий с глубиной, требует повышенного внимания к проведению подготовительных операций на глубокозалегающих перспективных горизонтах. Основными факторами, сдерживающими темпы очистных работ, является наличие большого количества пластового газ метана и воды, фильтрующихся в подготовительные выработки по геологическим разрывным нарушениям, системам естественных и техногенных трещин.

Наиболее перспективным методом защиты выработанного пространства от фильтрации пластовых воды и газа является создание непроницаемых завес в угольном пласте. Данный подход реализуется за счет создания трещины гидроразрыва пласта [1], [2], например по одной из шахтных модификаций этой технологии [3], [4]. Полость трещины, созданной между горной выработкой и активной фильтрационной зоной высокопроницаемого пласта, заполняют специальным твердеющим составом.

Однако закономерности формирования будущего экрана в случае пересечения выработкой водоносного слоя трещиноватых пород, разломов – сложно предсказуемы [5], [6]. Исследования, проводимые в лабораторных условиях, позволяют получить необходимую информацию о возможных траекториях создаваемых трещин в зависимости от действующих нагрузок, темпах проведения гидроразрыва, а также геометрической компоновки моделируемых близкорасположенных горных выработок и пластовых скважин. Одним из перспективных направлений в лабораторных исследованиях является использование крупногабаритных моделей с возможностью создания областей с разрывными нарушениями или разницей в фильтрационных свойствах, что позволяет отработать в тестовом режиме комплекс операций по подготовке и созданию будущего экрана при имитации сложных геологических условий.

Обсуждение результатов

Проводимые лабораторные исследования физического моделирования развития трещин гидроразрыва традиционно используют нагружение моделей в трех ортогональных плоскостях гидравлическими домкратами. Большинство исследований проводятся на кубах с ребром 200 мм из различных материалов: оргстекло, бетон, куски пород и др. Однако,

это значительно ограничивает модель в возможности имитации выработанного пространства или же сетки скважин гидроразрыва. Возможность применения крупногабаритных моделей значительно упрощают проведение эксперимента с множественным гидроразрывом в области неоднородности среды, например имитации выработанного пространства, каверн, пустот и естественных разрывов.

Для исследования развития трещины гидроразрыва в области цилиндрической полости секущей высокопроницаемый сегмент или разрыв была разработана лабораторная установка [7]. Отличительной особенностью разработанных моделей неоднородных сред является линейные размеры ребра куба – 420 мм. Создание моделей производится методом заливки раствора пескобетонной смеси марки М300 в специальную разборную форму. Имитация скважин гидроразрыва осуществляется за счет использования трубок из нержавеющей стали, которые размещают на специальной крышке-матрице отверстий в процессе заливки модели. Призабойный интервал разрыва формируется за счет установки прутка в полость трубки с вылетом на требуемое расстояние. Для предотвращения обхода трещины по поверхности контакта модели и трубки на ее торце устанавливается резиновое кольцо диаметром большего внешнего диаметра. Цилиндрическая полость, имитирующая горную выработку, может быть организована двумя способами: размещение трубки требуемого диаметра в форме до процесса заливки с последующим ее извлечением после застывания смеси, выбуривание полости специальной коронкой после набора смеси достаточной прочности. Первый способ позволяет размещать трубку относительно системы скважин в требуемой плоскости, однако достаточно трудоемкий на этапе демонтажа и может приводить к повреждению грани модели. Второй способ ограничен диаметром коронки для имитации выработанного пространства и так же трудоемок при сечении полости модели под углом к медиальной плоскости, однако позволяет добиться ровной поверхности как на стенках полости, так и граней модели. Значительное увеличение ребра модели позволяет использовать высокоточную измерительную аппаратуру для анализа изменения диаметра полости в процессе пред-нагружения модели и последующем проведении гидроразрыва. Знания полученные о перераспределении деформации контура полости далее используются в математическом моделировании при имитации процессов роста трещин вблизи полости, а также при анализе повторного раскрытия трещины гидроразрыва для установления характера пересечения неоднородностей модели.

Заключение

Разработка и создание моделей неоднородной среды, содержащей цилиндрическую полость, пересекающую высокопроницаемый сегмент или разрыв, позволит увеличить качество получаемых данных в ходе

проведения лабораторных исследований закономерностей гидроразрыва при различном характере нагружения модели, а также позволит более точно определять условия прохождения разрыва через слой и экранирования от него полости.

Благодарности. Исследования проведены в рамках научного проекта РНФ №25-17-00145

Список литературы

1. Сердюков С.В., Курленя М.В., Рыбалкин Л.А., Шилова Т.В. / С.В. Сердюков / Влияние гидроразрыва угля на фильтрационное сопротивление зоны дренирования дегазационной скважины // ФТПРПИ. – 2019. – №2. – С. 3–13.
2. Сердюков С.В., Патутин А.В., Шилова Т.В., Азаров А.В., Рыбалкин Л.А. / С.В. Сердюков / Технологии повышения эффективности разработки твердых полезных ископаемых с использованием гидроразрыва горных пород // ФТПРПИ. 2019. № 4. С. 90–97.
3. Shilova T.V., Rybalkin L.A. / S.V. Shilova / Study of polymer compositions for formation of impermeable inclusions in rock mass. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 991. N 012008.
4. Kim M., Kemeny J. / M. Kim / Effect of thermal shock and rapid unloading on mechanical rock properties. Rock Mech Rock Eng 2009;47(6):2005–19.
5. Deb P., Düber S., Guarnieri Calò Carducci C., Clauser C. / P. Dep / Laboratory-scale hydraulic fracturing dataset for benchmarking of enhanced geothermal system simulation tools. Scientific Data. 2020. Vol. 7. N 220.
6. Patutin A.V., Serdyukov S.V. / A.V. Patutin / Laboratory stands for hydraulic fracturing simulation in a nonuniform stress field.
7. Сердюков С.В., Рыбалкин Л.А., Дробчик А.Н., Патутин А.В., Шилова Т.В. / С.В. Сердюков / Лабораторный стенд для моделирования гидравлического разрыва массива трещиноватых пород // ФТПРПИ. – 2020. – № 6. – С. 193–201.

УДК 553.94; 550.835.6

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНЫХ СРЕДСТВ ИССЛЕДОВАНИЯ УГЛЯ МЕТОДОМ ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

Рыбалкин Л.А., Шилова Т.В., Азаров А.В., Сердюк И.М.

ФГБНУ «ИФГП», г. Донецк

Аннотация. Представлены результаты разработки лабораторных средств по подготовке и предварительному насыщению образцов угля газом метаном для последующего исследования методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР).

Введение

По мере разработки угольных пластов шахтным способом возрастает риск негативных явлений, связанных с каптированным в углепородном массиве газа метана. Для снижения газоносности применяют методы дегазации угольных пластов. Определение оптимальных параметров проведения дегазационных мероприятий позволяет повысить степень извлекаемого газа и снизить время на реализацию очистных работ, для этого проводят предварительные исследования по определению формы нахождения метана в области будущих дегазационных работ, выявляют зоны его скопления, проводят исследования механизмов перераспределения в газоносных угольных пластах и пр. [1]–[3]. Наибольший интерес представляют собой структуры естественных геологических дизъюнктивных нарушений в виде протяженных разломов с плотной сеткой вторичных трещин, которые выступают в качестве резервуаров скопления свободного пластового газа. Небольшие размеры, не превышающие расстояния между геологоразведочными скважинами (около 200 м), не позволяют их закартировать при разведке месторождения. Случайное вскрытие АСМ сопровождается газопроявлениями в скважине в виде выбросов флюида и длительного (от нескольких дней до нескольких месяцев) дегазирования. Неожиданное вскрытие таких образований горными выработками создает аварийную ситуацию на шахте, приводит к гибели шахтеров. Поэтому выявления АСМ до начала ведения добычи угля является актуальным вопросом.

Одними из перспективных подходов исследования каптированного в угольном веществе газа метана являются методы, основанные на явление ядерного магнитного резонанса (ЯМР). На сегодняшний день они широко применяются при разработке месторождений полезных ископаемых для определения: пористости [4], размера пор [5], трещиноватости [6], насыщенности флюидами [4] и т.д. Проведение лабораторных исследований сопряжено с необходимостью максимального приближения к натурным условиям, что затруднительно при работе на стандартизированных устройствах. Основным моментом при имитации углепородного материала в пластовых условиях является насыщение проб газом метаном. Стандартные подходы ориентированы на предварительное насыщение порций дробленного угля, в объемах многократно превышающих стандартную загрузку кюветки прибора ЯМР. Излишний вес накладывает ограничение на время насыщения и очередность подготовки проб. Разработка лабораторных средств предварительной подготовки породного материала в количестве требуемом для стандартного измерения методом ЯМР позволит повысить качество проводимых исследований

и получить более актуальные и значимые данные за счет насыщения нескольких партий материала одновременно за меньшее время.

Обсуждение результатов

Для насыщения отобранных проб угля был разработан лабораторный стенд, представленный на рисунке, в составе баллона с жатым газом метаном, линии контроля подачи сжатого газа, камеры насыщения и системы размещения образцов.

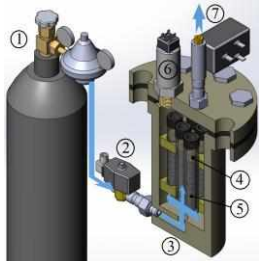


Рисунок – Схематическое изображение лабораторного стенда:
*1 - баллон с сжатым газом метаном;
2 - нижний впускной электромагнитный клапан; 3 - корпус камеры;
4 - медная сетка; 5 - образцы угля;
6 - электронный датчик давления;
7 - верхний выпускной электромагнитный клапан*

Камера состоит из корпуса, в нижней части которого установлен штуцер для подключения линии подачи сжатого газа, резиновой прокладки и крышки. Крепление последней осуществляется болтами по периметру ответной фланцевой части камеры. На крышке устанавливается датчик давления и штуцер для сброса давления. Подача сжатого газа осуществляется из баллона с редуктором, регулировка момента подачи и сброса давления в камере организованы через электромагнитные клапаны, соединенных с камерой и крышкой с помощью штуцеров. Образцы угля засыпаются в специальные пробирки из плотного пластика с последующей прокладкой медной сетки, предотвращающей высыпание угля в процессе установки пробирки в холдеры камеры и последующем извлечении. Холдеры представляет собой две пластины с отверстиями под пробирки, которые плотно размещаются в внутреннем пространстве камеры.

Работа стенда осуществляется следующим образом. Уголь засыпают в пробирки и устанавливают медную сетку. Пробирки размещают в холдерах и монтируют в камеру. Устанавливают резиновую прокладку и фиксируют крышку камеры болтами. Вход электромагнитного клапана в нижней части камеры подключают к баллону с сжатым газом метаном. Оператор, на компьютере, запускает программу контроля давления и состоянием электромагнитных клапанов, где устанавливает требуемый уровень давления газа на этапе насыщения, время насыщения и ступени подачи газа. После программа автоматически открывает нижний клапан и закрывает верхний, происходит фильтрация газа из баллона в камеру. Как только давление в камере достигнет 2 атм, верхний

клапан кратковременно открывается для вытеснения воздуха из камеры, после клапан автоматически закрывается и происходит повторный набор давления. При достижении требуемого значения давления, по показаниям датчика давления, нижний клапан закрывается. При завершении этапа насыщения программа информирует оператора и открывает верхний клапан сбрасывая давление в камере до атмосферного. Далее идет разбор камеры и извлечение пробирок с метанонасыщенным углем. Пробирки закрываются крышками, которые дополнительно герметизируются специальной лабораторной пленкой Parafilm.

Заключение

Разработанные лабораторные средства позволяют проводить предварительную подготовку проб угля различного фракционного состава и места отбора в одной экспериментальной серии, что сокращает временные затраты на подготовку отдельных проб, а также позволяет контролировать степень насыщения метаном проб с последующим сравнительным анализом.

Благодарности. Работа выполнена в рамках деятельности Молодежной лаборатории исследования электромагнитных свойств угля и горных пород ФГБНУ.

Список литературы

1. Lin B. et al. / B. Lin / Significance of gas flow in anisotropic coal seams to underground gas drainage //Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – Vol. 180. – P. 808-819.
2. Pan Z., Connell L. D. / Z. Pan/ Modelling permeability for coal reservoirs: a review of analytical models and testing data //International Journal of Coal Geology. – 2012. – Vol. 92. – P. 1-44.
3. Guo P. et al. / P. Guo / Impact of effective stress and matrix deformation on the coal fracture permeability //Transport in porous media. – 2014. – Vol. 103. – №1. – P. 99-115.
4. Макфи К., Рид Д., Зубизаретта И. / К. Макфи / Лабораторные исследования керна: гид по лучшим практикам //М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований. – 2018. – Т. 924.
5. Moss A. K., Benson T., Barrow T. / A. Moss / An Investigation into Different Correlation Methods between NMR T2 Distributions and Primary Drainage Capillary Pressure Curves Using an Extensive Sand-stone Database // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2019. – Vol. 89. – P. 02003.
6. Алексеев А.Д., Сереброва Н.Н., Синолицкий В.В. / А. Алексеев / Магнитный резонанс в горных породах и ископаемых углях под давлением // Физика и техника высоких давлений. – 1980. – №.2. – С. 87-97.

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ПРИФИЛЬТРОВОЙ ЗОНЫ ОТ ПЕСКОВАНИЯ ПРИ СООРУЖЕНИИ СКВАЖИН ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

Алифашкин А.А., Чеснова Е.С.

РГГРУ имени Серго Орджоникидзе, г. Москва

При эксплуатации технологических скважин при подземном скважинном выщелачивании имеет место пескование прифилтровой зоны. Добиться надежности и продуктивности скважины особенно сложно в тех случаях, где пластовые пески обводнены и склонны к псевдоожижению.

В статье рассматриваются различные варианты удаления песчаных пробок (желонированием, погружными центробежными насосами, эрлифтом, водоструйными аппаратами – гидроэлеваторами). Обосновано, что использование гидроэлеваторов при чистке запескованных скважин является наиболее приемлемым способом.

Использование скважинного подземного выщелачивания требует значительного внимания при бурении и оборудовании технологических скважин, а также предотвращение различных осложнений. Могут образовываться достаточно объемные песчаные пробки, которые ограничивают производительность по продуктивным растворам, для ее восстановления песчаные пробки удаляют, используя обычные желонки или осуществляют промывку через колонну сифонных труб, спускаемую внутрь подъемной колонны. Используют и другие методы [1,2]:

- снижение производительности скважины с целью уменьшения интенсивности выноса песка;

- увеличение скорости движения продуктивных растворов в трубах либо посредством использования подъемных колонн меньшего диаметра, либо использования более производительного насосного оборудования.

Ведение эксплуатационных работ с одновременным выносом песка может оказаться опасным, так как создается возможность нарушения обсадной колонны и потери скважины.

Удаление песка из прифилтровой зоны является одной из эффективных действующих мер по возникновению песчаных пробок. Возможно использование различных типов аппаратов по удалению песка: погружные центробежные насосы; эрлифты; гидроэлеваторы.

По мнению специалистов, использование первых агрегатов представляется неэффективным, как по напору, так и пропуску твердых фракций, содержащихся в объеме перекачиваемой гидросмеси [3].

Эрлифты для скважин небольшого диаметра при чистке песчаных пробок могут оказаться малоэффективными, так как их реальная производительность невелика, что в конечном итоге не позволяет создать необходимые скорости рабочего потока в плоскости всасывания песка.

Благоприятными факторами применения струйных насосов (гидроэлеваторов) являются простота конструкции, дешевизна изготовления и отсутствие движущихся и трущихся частей и деталей. Известно, что в работу гидроэлеватора положен принцип непосредственной передачи энергии от одного потока (активной рабочей насадки) к другому (всасываемому). Это обстоятельство представляет целесообразным использование гидроэлеватора для извлечения песчаной пробки из скважины. Однако, условия их работы при чистке песчаной пробки осложняется еще и тем, что величина столба жидкости в скважинах имеет различные значения и колеблется в значительных пределах. Вследствие того, что струйный аппарат при чистке песчаной пробки спускается до прифилтровой зоны, величина подпора на его приеме может быть различной, что существенно влияет на его характеристику и показатели работы установки.

При проектировании гидроэлеваторов для скважин при подземном выщелачивании требуется разработка малогабаритных насосов, способных поднимать песчаную гидросмесь из эксплуатационных скважин (диаметром до 100 мм) глубиной до 400-450 м.

Технологически при работе гидроэлеватора в скважине возможно иметь два трубопровода: один для подачи рабочей жидкости к насадке водоструйного аппарата и второй для подъема песчаной гидросмеси на поверхность. Оба трубопровода должны свободно размещены в габарите обсадной колонны скважины для удобства спускоподъемных операций. При концентричном расположении трубопроводов, по кольцевому сечению подается напорная вода, а гидросмесь транспортируется по центральной колонне эксплуатационных труб.

Вследствие наличия статического столба жидкости в эксплуатационной скважине гидроэлеватор всегда будет работать с подпором при эжектировании песчаной гидросмеси, причем при чистке песчаной пробки величина подпора может быть создана в большинстве случаев соответствующей оптимальной безкавитационной работе гидроэлеватора.

Для работы гидроэлеватора к рабочей насадке подается напорная вода поверхностным силовым насосом, установленным на устье скважины (для этих целей может быть использован буровой насос). Рабочая вода плотностью ρ_0 при расчетном количестве Q_0 истекает из насадки гидроэлеватора под давлением P_0 . Давление на поверхностном силовом насосе составляет P_H .

Уравнение равновесия в системе гидроэлеватор-подводящие коммуникации может представлено в виде (без учета потерь):

$$P_0 = P_H + \rho_0 * g * h_g + \rho_0 * g * h_1 = P_H + \rho_0 * g * (h_g + h_1) \quad (1)$$

где: h_g – динамический уровень, h_1 – заглубление под уровень жидкости у забоя песчаной пробки.

С учетом потерь в подводящих трубопроводах искомое давление, которое развивает гидроэлеватор, должно быть достаточным для подъема песчаной гидросмеси на заданную высоту в подъемном трубопроводе:

$$P_I = \rho_n * g * (h_g + h_n) + \rho_n * g * h_2 \quad (2)$$

где: ρ_n – плотность гидросмеси в напорном трубопроводе гидроэлеватора, кг/м³

h_2 – потери на трение в подъемной трубе, м.вод.ст.

Эффективная эксплуатация гидроэлеватора соответствует предкавитационному режиму, где КПД максимально с расходом эжектируемого потока:

$$Q_1 = \varphi * \sqrt{2g(10 - h_{\text{нас}})} * \frac{\pi}{4} (D^2 - d_0^2) \quad (3)$$

где Q_1 – эжектируемый расход, м/с;

$h_{\text{нас}}$ – напор насыщенных паров эжектируемой гидросмеси, м.вод.ст;

D, d_0 – соответственно диаметр камеры смешения и насадки гидроэлеватора, мм.

Зная необходимую глубину заложения песчаной пробки в скважине и производительность гидроэлеватора по эжектированию и учитывая величину потерь напора в подводящих трубопроводах, можно определить давление на насадке, которая создаст необходимый напор за диффузором.

Имея значения коэффициента напора β (отношение глубины заложения песчаной пробки к напору на рабочей насадке гидроэлеватора) и коэффициента эжекции α (отношение эжектируемого расхода песчаной гидросмеси к расходу воды через насадку) можно рассчитать с достаточной точностью все параметры гидроэлеваторной установки при работе в скважине.

Список литературы

1. Аренс В.Ж. и др. Физико-химическая геотехнология – М; Издание «Горная книга», 2010, 575 с.
2. Фазлуллин М.И. подземное и кучное выщелачивание урана, золота и других металлов т.1 и т.2 – М; Издание «Руда и металлы». 2005.
3. Ялтанец И.М., Леванов Н.И. Справочник по гидромеханизации – М; Издание «Горная книга», 2008.

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОЙ МОДЕЛИ УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ, ВЫПОЛНЯЕМОГО ПО СХЕМЕ ПОДАЧИ ЖИДКОГО АЗОТА В ОТКРЫТЫЙ СТВОЛ СКВАЖИНЫ

Рыбалкин Л.В., Сердюков С.В., Сердюк И.М.

ИГД СО РАН, г. Новосибирск

Аннотация. В данной работе представлены результаты разработки и создания крупногабаритных лабораторных моделей углепородной среды для исследования криогенного воздействия, выполняемого по схеме подачи жидкого азота в открытый ствол скважины, на газопроницаемость приконтурной области модельной скважины.

Введение

Газовый фактор является одним из ключевых параметров, определяющих безопасность и темпы ведения работ в угольных шахтах. Производственные риски существенно возрастают при неконтролируемом газовыделении из горного массива. Поэтому наличие пластового газа метана требует постоянного мониторинга и комплексного подхода к управлению темпов горных работ для предотвращения аварийных ситуаций и обеспечения безопасных условий труда.

Программа развития угольной промышленности России на период до 2030 года предусматривает комплекс мероприятий, направленных на улучшение технико-экономических показателей за счет применения высокопроизводительной техники и проектирование выемочных участков мощностью не менее 2-3 млн. т угля в год. Однако, без принудительного извлечения метана методами заблаговременной дегазации [1] угольных пластов нельзя эффективно использовать высокопроизводительную очистную технику. Обильное выделение метана из отработываемых высокогазоносных пластов угля сдерживает возможности угледобывающей техники по газовому фактору, что существенно влияет на рентабельность работы угольных шахт [2].

Без решения газовой проблемы невозможно достичь запланированных показателей. Нельзя будет ни эффективно использовать современное оборудование, ни обеспечить безопасность труда, ни выйти на намеченные объёмы добычи. Поэтому важно разрабатывать новые методы и подходы в области интенсификации дегазации неразгруженных угольных пластов. Одним из перспективных методов повышения фильтрационной способности угля по газу метану является обработка жидким азотом [3], [4]. За счет развития новых и раскрытия естественных

трещин за счет расширения замерзающей воды возможен значительный прирост газоотдачи из пластов, где проведение стандартных операций по разбуриванию дегазационных скважин и проведение локальных гидравлических разрывов трудозатратно, или не дает требуемого положительного эффекта.

Обсуждение результатов

Для исследования влияния обработки жидким азотом углепородного массива на его газопроницаемость была разработана лабораторная модель массива с имитацией открытого ствола скважины. Работы проводились на специальной установке [5], позволяющей проводить исследования с контролируемым нагружением в трех ортогональных плоскостях. Модель среды представляет собой куб с стороной грани в 420 мм, основная часть которого является монолитным куском угля марки ДГ из Моховского угольного разреза (Кузбасс), как показано на рисунке. Сам образец угля залив в кубической форме пескобетонной смесью марки М300.



Рисунок - Размещение монолита угля в форме под последующую заливку цементом для создания физической модели углепородного массива

Имитация открытого ствола скважины, выполненной из шахтного поля, осуществлялась за счет последующего выбуривания специальной коронкой полости диаметром 105 мм до середины модели с извлечением керна. Далее область в пределах модели от полости делили на 4 сектора, в каждом из которых на разном расстоянии от центра разбуривали коронкой малого диаметра 16 мм каналы на расстояние до половины длины полости. В каждый из каналов вклеивалась стальная трубка с внешней резьбой.

Дальнейший ход проведения работ заключается в следующем. После того, как модель разместят в лабораторной установке, производят требуемое трехосное нагружение плоскими домкратами. На первом этапе подключают поочередно трубки к системе подачи порций сжатого газа азота, и по восстановлению кривой давления измеряют время фильтрации газа от места подачи до открытого пространства центральной полости. На втором этапе производят циклическую обработку полости, выполняемую по схеме подачи жидкого азота в открытый ствол скважины. Далее повторяют первый этап с последующей регистрацией изменения времен фильтрации газа в зависимости от удаления от области.

Заключение

Разработка и создание крупногабаритных моделей неоднородной среды, имитирующей углепородный массив, ориентированных

на проведение стендовых исследований влияния на угольный материал криогенного воздействия, выполняемого по схеме подачи жидкого азота в открытый ствол скважины, позволит отработать методику подачи порций жидкого азота, закрепить подход по измерению изменения газопроницаемости отдельных областей модели методом кривой восстановления давления, а так же определить оптимальные параметры циклической обработки угленосного массива для дальнейшей разработки прикладных решений в области интенсификации дегазации.

Благодарности. *Исследования проведены в рамках научного проекта РНФ №25-27-00060*

Список литературы

1. Мелехин Е.С., Кузина Е.С. / Е.С. Мелехин / Заблаговременная дегазация высоко газоносных угольных пластов – задача государственная //Маркшейдерия и недропользование - №2 (82), 2016. - С. 19-22.
2. Рубан А.Д., Щадов М.И. / А.Д. Рубан / Подготовка и разработка высоко газоносных угольных пластов: Справочное пособие/– М.: Издательство «Горная книга», 2010. - 500 с.
3. Ruiyue Yang, Chunyang Hong, Zhongwei Huang, Xianzhi Song, Shikun Zhang, Haitao Wen / Yang Ruiyue / Coal breakage using abrasive liquid nitrogen jet and its implications for coalbed methane recovery. Applied Energy. 2019. Vol. 253. P. 113485
4. Zhongwei Huang, Shikun Zhang, Ruiyue Yang, Xiaoguang Wu, Ran Li, Hongyuan Zhang, Pengpeng Hung / Huang Zhongwei / A review of liquid nitrogen fracturing technology. Fuel. 2020. Vol. 266. P. 117040,
5. Сердюков С.В., Рыбалкин Л.А., Дробчик А.Н., Патутин А.В., Шилова Т.В. / С.В. Сердюков /Лабораторный стенд для моделирования гидравлического разрыва массива трещиноватых пород // ФТПРПИ. – 2020. – № 6. – С. 193–201.

УДК 622.822.22

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОВЕДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ РАДОНОВОЙ СЪЕМКИ НА ПРИМЕРЕ ШАХТЫ КУЗНЕЦКОГО УГОЛЬНОГО БАССЕЙНА

Мироненкова Н.А., Полещук А.А.

*Санкт-Петербургский горный университет
имени императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург*

Аннотация. В горнодобывающей промышленности сохраняется актуальность проблемы негативного воздействия вредных производственных факторов на здоровье персонала. Среди профессиональных заболеваний преобладают патологии дыхательной системы, обусловленные

повышенной запыленностью воздуха (АПФД), а также воздействием радона и его дочерних продуктов распада. Особое внимание следует уделить радону – радиоактивному газу, который накапливается в подземных выработках и выходит на поверхность вследствие естественной дегазации и особенностей горно-геологических условий. Длительное воздействие радона и его дочерних продуктов распада (ДПР) на легкие приводит к увеличению риска развития онкологических заболеваний. В данной статье представлены результаты мониторинга радоновой активности на шахте им. В.Д. Ялевского (АО «СУЭК-Кузбасс»), проведенного в период с 2014 по 2023 годы. В ходе исследований выполнена поверхностная радоновая съемка над выемочными участками лавы, позволившая выявить зоны с высокими значениями эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) радона. Полученные данные свидетельствуют о возможных дополнительных рисках для здоровья горнорабочих. Результаты исследования имеют практическую значимость для повышения безопасности труда и снижения уровня профессиональных заболеваний среди работников угольных шахт. Оптимизация методики позволит своевременно принимать превентивные меры по защите персонала.

Введение

В последние десятилетия в горнодобывающей промышленности вопросы в сфере охраны труда становятся все более актуальными. Россия является лидером в области угледобычи, по запасам угля Россия занимает второе место в мире. Кузнецкий бассейн является крупнейшим по добыче угля [1, 2]. И относится к территориям, подверженным высоким канцерогенным рискам, связанным с радоном. Основной вклад в дозу облучения населения Кузбасса вносят природные источники ионизирующего излучения за счет интенсивной добычи угля и горно-геологической особенности территории. Средняя индивидуальная доза облучения населения Кузбасса от всех источников ионизирующего излучения составила 5,132 мЗв/год, что на 13% выше средней дозы на одного жителя РФ [3]. Основным дозообразующим компонентом является радон, вклад которого в среднюю дозу на одного жителя составляет 2,88 мЗв/год в 2023 г., что составляет более половины годовой дозы согласно нормам радиационной безопасности (НРБ – 99/2009) [4, 5].

Поверхностную радоновую съемку проводят с целью контроля производственного процесса для обеспечения безопасных условий труда. В ходе проведения газовых съемок можно выявить превышения радиационного фона, очаги самовозгорания угля, горно-геологические нарушения [6, 7, 8]. Выявлено, что при повышении температуры (например, при самонагревании угля) выделение радона на поверхность увеличивается в 2-3 раза [9, 10, 11].

Радоновая съемка играет ключевую роль в оценке радиационного фона, что позволяет прогнозировать возможные риски для здоровья горняков и принять соответствующие меры для их защиты [12]. Анализ проведенной радоновой съемки над выемочными участками лавы на примере шахты им. В.Д. Ялевского АО «СУЭК-Кузбасс» за период с 2014 по 2023 годы, позволяет выявить уровни пиковых значений ППР при поверхностной радоновой съемки.

Цель данного исследования – статистический анализ результатов радоновой съемки за 9-летний период для оптимизации существующей методики. В работе рассмотрены особенности методики измерений плотности потока радона.

Важным фактором является изменчивость интенсивности радоновой эксхалляции, обусловленная сезонными колебаниями температуры и влажности, что значительно усложняет прогнозирование радиационной обстановки [13, 14, 15]. Оптимальным периодом проведения съемок является летний период.

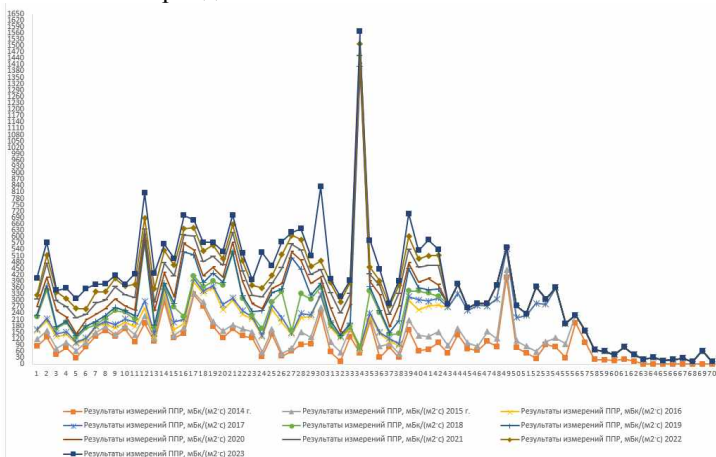


Рисунок — Результаты измерения ППР над выемочными участками шахты (составлено авторами)

Анализируя результаты, полученные при использовании дескриптивного метода обработки статистических данных, можно сделать вывод, что пиковые значения зафиксированы в 2014 г. ($105\text{--}1631 \text{ мБк}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$), 2016 г. ($84,8 \text{ мБк}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$), 2019 г. ($70,4 \text{ мБк}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$) и 2023 г. ($55,7 \text{ мБк}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$). Минимальные значения отмечены в 2017 г. ($15,1 \text{ мБк}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$) и 2021–2022 гг. ($44\text{--}53 \text{ мБк}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$). Разница между максимальными и минимальными показателями значительна (например, 2019 г.: 1320 и $5 \text{ мБк}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$), что свидетельствует о неравномерном распределении радона. Стабильно низкие

минимальные значения (4–33 мБк/(м²·с)) во все годы подтверждают наличие «фоновых» зон. В 2019 г. зарегистрирован максимум (1320 мБк/(м²·с)), что может указывать на локальные геологические нарушения или на возможный очаг самовозгорания угля. Средние значения варьируются от 10 мБк/(м²·с) (2017 г.) до 207 мБк/(м²·с) (2019 г.), что коррелирует с пиковыми. Высокие значения в 2019 г. (32,5 мБк/(м²·с)) и 2023 г. (16,3 мБк/(м²·с)) указывают на значимые отклонения от фона. Низкие значения (например, 0,06 мБк/(м²·с) в 2015 г.) предполагают случайные колебания. Выявлены зоны с устойчиво высокими значениями (2014, 2016, 2019, 2023 гг.), требующие приоритетного контроля. Данные подтверждают необходимость адаптивного управления радиационным риском для повышения безопасности условий труда горнорабочих.

Обсуждение результатов.

В ходе анализа результатов поверхностных радоновых съемок были выявлены значения, превышающие фоновые, что может свидетельствовать о горно-геологических нарушениях, о возможных очагах эндогенных пожаров. Своевременное обнаружение повышенных значений плотности потока радона (ППР) позволяет принять превентивные меры для повышения безопасности шахтёров и сотрудников военизированных горно-спасательных частей (ВГСЧ) [16, 17, 18].

Существенным фактором, влияющим на интенсивность радоновой эксхалации, являются переменные параметры окружающей среды, в частности влажность, температура. К существенным ограничениям поверхностной радоновой съёмки относится значительная трудоёмкость метода.

Заключение.

Уровень безопасности на рабочих местах во многом зависит от совокупного воздействия ряда производственных факторов, что требует использования различных методик для контроля и снижения рисков профзаболеваний. Применение радоновой съёмки с целью анализа радиационного фона на шахтах позволит повысить уровень безопасности. Современные методики не предусматривают оперативного реагирования на изменения температуры и объёмной активности радона, поэтому требуют оптимизации процесса измерений.

Данная методика требует много времени на установку и сбор адсорбционных колонок, адсорбцию на угле, анализ в лаборатории и обработку результатов. Оптимизация методики проведения поверхностных съемок позволит: устранить выявленные недостатки; за счет корреляции с эквивалентной равновесной объемной активностью (ЭРОА) радона в шахте - снизить риски профессиональных заболеваний; обеспечить своевременное

принятие превентивных мер при превышении фоновых значений плотности потока радона (ППР).

Можно сделать вывод, что применение радоновой съемки оправдывает свою надежность и имеет перспективы развития на практике, однако требует дополнительных исследований для оптимизации методики.

Список литературы

1. Мешков Г.Б., Петренко И.Е., Губанов Д.А. Итоги работы угольной промышленности России за 2023 год // Уголь. 2024. №3. С. 18–29. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-3-18-29.

2. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору: ежегодные отчеты о деятельности [Электронный ресурс]. URL: http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/ (дата обращения: 18.12.2024).

3. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Кемеровской области – Кузбассе в 2024 году: государственный доклад [Электронный ресурс]. URL: <https://42.rospotrebnadzor.ru/content/813/> (дата обращения: 01.07.2025).

4. Бабкин В.А. Развитие угольной промышленности Российской Федерации на примере инновационного кластера Кемеровской области «Комплексная переработка угля и техногенных отходов» // Уголь. 2016. №3. С. 50–52. DOI: 10.18796/0041-5790-2016-3-50-52.

5. Gopinathan P., Subramani T., Barbosa S., Yuvaraj D. Environmental impact and health risk assessment due to coal mining and utilization // Environmental Geochemistry and Health. 2023. Vol. 45. №10. P. 6915–6922. DOI: 10.1007/s10653-023-01744-z.

6. Березовская А.В., Фомин А.И. Факторы опасности здоровью шахтеров и меры противодействия этим рискам // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. №5. С. 17–25. DOI: 10.23670/IRJ.2023.131.17.

7. Deng X., Zhang Y., Cui L. Occupational health and occupational hazard control in coal mines: a comparative study // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 446. №5. P. 052109. DOI: 10.1088/1755-1315/446/5/052109.

8. Кабанов Е.И., Коршунов Г.И., Корнев А.В. и др. Анализ причин взрывов, вспышек и воспламенений метана в угольных шахтах России в 2005–2019 гг. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. №2-1. С. 18–29. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-18-29.

9. Родионов В.А., Турсенев С.А., Скрипник И.Л., Ксенофонтов Ю.Г. Результаты исследования кинетических параметров самовозгорания каменноугольной пыли // Записки Горного института. 2020. Т. 246. С. 617–622. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.3.

10. Портола В.А., Бобровникова А.А., Палеев Д.Ю. и др. Исследование скорости сорбции кислорода самовозгорающимися сульфидными рудами //

Безопасность труда в промышленности. 2020. №1. С. 57–62. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-1-57-62.

11. Коршунов Г.И., Мироненкова Н.А., Потапов Р.В. и др. Контроль очагов самовозгорания на угольных шахтах с помощью измерения плотности потока радона // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 6. С. 194–196.

12. Баловцев С.В., Скопинцева О.В., Коликов К.С. Управление аэрологическими рисками при проектировании, эксплуатации, ликвидации и консервации угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. №6. С. 85–94. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-85-94.

13. Нарский В.А., Портола В.А. Применение тепловизоров для обнаружения и локации очагов самовозгорания, возникших в шахтах // Промышленная безопасность и геомеханика. 2021. № 2. С. 13–18.

14. Qin Y. et al. A comprehensive method to prevent top-coal spontaneous combustion utilizing dry ice as a fire extinguishing medium: Test apparatus development and field application // Environmental Science and Pollution Research. 2021. Vol. 29. №13. P. 19741–19751. DOI: 10.1007/s11356-021-17213-y.

15. Liu Q. et al. The evolution law of functional groups during the heating of coal in oxygen and oxygen-free atmospheres // Greenhouse Gases: Science and Technology. 2021. Vol. 11. № 2. P. 266–276. DOI: 10.1002/ghg.2047.

16. Портола В.А., Тайлаков О.В., Ли Хи Ун и др. Обнаружение, локация и оценка состояния очагов подземных пожаров по аномалиям радона на земной поверхности // Уголь. 2021. №5. С. 47–52. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-5-47-52.

17. Казанин О.И., Ярошенко В.В. Снижение потерь угля при отработке сближенных пластов донной Воркутского месторождения // Записки Горного института. 2020. Т. 244. С. 395–401. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.1.

18. Зубов В.П., Голубев Д.Д. Перспективы использования современных технологических решений при отработке пологих пластов угля с учетом опасности формирования очагов его самовозгорания // Записки Горного института. 2021. Т. 250. С. 534–541. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.6.

УДК 622.24:622.232

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЙ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОНФИГУРАЦИИ ВОСХОДЯЩИХ СКВАЖИН ПРИ ОЧИСТНОЙ ВЫЕМКЕ РУДНОЙ МАССЫ НА ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ РАБОТАХ

Радченко Д.Н., Аверин А.П.

ИПКОН РАН, г. Москва

Несмотря на значительные успехи в области создания современного оборудования и цифровых систем, используемых при бурении скважин в процессах очистной выемки, проблема эффективной оценки отклонений

пробуренных скважин от проектной траектории остается весьма актуальной. Техничко-экономические показатели отработки запасов выемочных единиц — уровень потерь и разубоживания, выход негабарита, нарушение проектного контура смежных камер и др., в значительной мере зависят от уровня технических решений, применяемых при уточнении фактической пространственной конфигурации скважин. Причем, в наибольшей степени данная проблема на подземных горных работах стоит при ведении буровзрывных работ веерами восходящих скважин.

На практике буровые работы часто выполняются операторами на основе опыта. Буровые установки, оснащенные современными системами сбора данных в реальном времени, регистрирующие осевую нагрузку, крутящий момент, давление, вибрации и положение буровой штанги, как правило, производства западных стран, весьма дорогостоящи, требуют соответствующей квалификации персонала для обслуживания цифровых систем. Более того, выполненные обзоры [1,2], наглядно демонстрируют с одной стороны, активное развитие технологий, обеспечивающих проактивный контроль процесса бурения в режиме, близком к реальному времени (нефтяная, газовая и горнодобывающая отрасли). С другой стороны, количественно подтверждают существующую проблему отклонения фактической траектории от проектной. В работе [1] показано, что внедрение систем на основе искусственного интеллекта на роботизированные буровые установки позволило увеличить скорость бурения на 61%. Однако результаты исследования [2] скважин, пробуренных роботизированными комплексами, показали процентное отклонение нагрузки на забой на 31,2%, отклонение расстояния между скважинами на 2,8% и глубины скважин на 3,2%. При этом выход горной массы увеличился, в среднем, на 23%, что свидетельствует о существенном отклонении от проектных показателей отбойки.

Применяемые на отечественных горных предприятиях технические средства контроля не всегда надежны — оборудование часто показывает неточные азимуты, в ряде случаев, навигационное бурение до настоящего времени выполняется по отвесу с транспортиром. Анализ практики работы горнодобывающих предприятий в России (золоторудная промышленность) показал, что эксплуатация доступных на рынке буровых станков особенно затруднительна в части выставления и выдерживания заданных углов — датчики показывают некорректные значения при бурении вееров скважин с разных положений манипулятора, что требует постоянной перенастройки оператором.

Поэтому до настоящего времени съемка фактических параметров пробуренных вееров скважин является критически важной операцией. На практике технология съемки, основанная на использовании лазерных сканеров (лидаров) сталкивается с ограничениями — в большинстве случаев сканер не обеспечивает полного пробития скважин на всю глубину,

а выводы, относительно их ориентирования в толще горного массива, являются весьма приблизительными. Кроме того, длительная постобработка данных в камеральных условиях с последующей корректировкой проекта буровзрывных работ приводит к снижению интенсивности отработки запасов выемочной единицы. Поэтому наиболее точными методами оценки являются методы контроля пространственного положения скважин, включая гироскопические и магнитометрические системы. Среди традиционных методов контроля траектории скважин наиболее распространены инструменты типа Boretrak для измерения траектории уже пробуренной скважины [3]. Также известны и применяются инклинометрические системы для горной промышленности:

- Reflex EZ-Trac — популярная система для измерения траектории восстающих и горизонтальных скважин. Компактный зонд, совместимый со стандартной буровой штангой, передает данные о зенитном и азимутальном углах, позволяя строить 3D-модель скважины сразу после бурения [4];

- Devico AS — норвежская компания предлагает решения на основе гироскопических инклинометров, идеально подходящие для обсаженных металлическими трубами скважин или условий сильных магнитных помех, обеспечивая точность до 0,1 [5].

Отечественные разработки предлагают роботизированные комплексы, самостоятельно перемещающиеся по скважине снизу-вверх [4]. Это решение представляет собой технологический мост между традиционным измерением отклонения и предиктивными системами аналитики, позволяя оцифровать результаты работы и принять управленческое решение.

Совершенствование описанного оборудования и технологий исследования пространственной конфигурации восходящих скважин включает:

- унификацию оборудования для использования в скважинах различного диаметра;

- разработку решений по интенсификации процесса съемки одной скважины (1,5-3 мин);

- получение данных в интерактивном режиме на месте производства работ;

- совмещение функций измерения истинной глубины пробуренной скважины, направления, кавернометрии;

- высокая автономность устройства.

Разрабатываемое в ИПКОН РАН решение основано на интеграции технологий инклинометрии, видеоэндоскопии и фотограмметрии, для создания высокоавтономного комплекса, который обеспечивает оперативное получение точных 3D-моделей скважин непосредственно на месте бурения, совмещая в одном измерении контроль траектории, глубины и состояния стенок.

Список литературы

1. Teodoriu, C.; Bello, O. An Outlook of Drilling Technologies and Innovations: Present Status and Future Trends. *Energies* 2021, 14, 4499.
2. Oppong, M. N and Agyei, G. An Analysis of Hole Deviation and its Effect on Production. *NIPES Journal of Science and Technology Research*, 2020, 2(2), 1-10.
3. Boretrak®2. Электронный ресурс: <https://www.respec.com/> Дата обращения 07.09.2025.
4. Reflex EZ-TRAC, руководство по эксплуатации. Электронный ресурс: <https://manualshive.com/ru/manual/reflex/ez-trac/1432712?page=8>. Дата обращения 07.09.2025.
5. Направленное колонковое бурение и инструменты для исследования скважин. Электронный ресурс: <https://www.mining-technology.com/contractors/exploration/devico>. Дата обращения 07.09.2025 г.
6. Программно-аппаратный комплекс для контроля качества буровзрывных работ // Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2022. URL: <https://www.istu.edu/novosti/pub/80320>

УДК: 622.6

СЕТЕВОЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ КРИТИЧНОСТИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ГОРНЫХ МАШИН И ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Зырянов И.В.¹, Непомнящих К.А.², Труфанов А.И.²,
Храмовских В.А.², Шевченко А.Н.²**

¹*ИПКОН РАН, г. Москва*

²*ФГБОУ ВО «ИРНИТУ», г. Иркутск*

Базовые принципы и достоинства сетевого (комплексные сети) решения задачи контроля и прогнозирования технического состояния горных машин и иного оборудования, основываются на реальных данных, поступающих с сенсоров, отслеживающих основные параметры технической системы. В качестве узлов сетевого представления системы выбираются окна временных рядов на протяжении регулярной работы машины, узлы связываются исходя из степени их сходства. Прозрачность и простота интерпретации решения на основе комплексных сетей - несомненное преимущество метода в сравнении с имеющимися (Фурье, вейвлет, фрактальный анализы, использование искусственных нейронных сетей). Особо выигрышным является то, что для выявления критичности состояния системы достаточным может быть и не слишком длительный (п*24 часов) временной ряд фиксируемых показателей режимов работы горных машин.

Понятие остаточного ресурса (ОР) находится на одном из центральных мест в теории и практике надежности восстанавливаемых

и невосстанавливаемых технических систем [1,2]. Принципиально задача оценки ОР машин и оборудования заключается в выявлении изменений в состоянии системы (регулярных – regular, критически серьезных – serious, катастрофических, непоправимых – grave) на текущий момент времени T_c .

Сами системные изменения могут характеризоваться временами продолжительностью регулярности, жизненными циклами систем system life-cycles, кратковременные- short-time, долговременные - long-time: стрессы живого организма, ресурс технического устройства, природные, геологические и космические объекты.

Обработка данных при выявлении системных изменений подобна криптоанализу – чем больше данных, тем успешнее оценка этих изменений. Однако, если наблюдается смена системного механизма (алгоритма шифрования, замена или ремонт машины, глобальные природные изменения и т.п.), своего рода сингулярность, тогда накопленный объем данных оказывается малоприспособным для прогнозирования дальнейшего поведения рассматриваемой системы и оценки ее ОР. Таким образом необходим набор данных не просто с момента запуска системы, но с момента смены механизма до момента, для которого будет произведен анализ текущего состояния системы (интервал $[T_3, T_c]$, рис.1 (б).

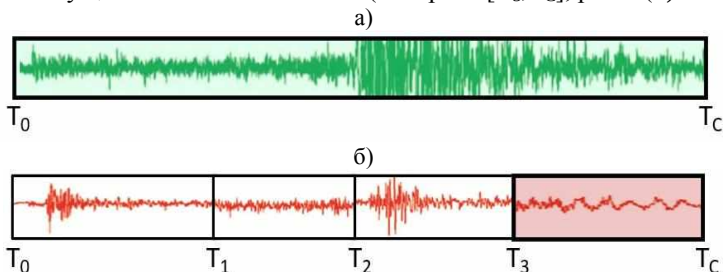


Рисунок 1 - Регулярный режим (а) и моменты сингулярности (принципиальной смены T_1, T_2, T_3) регулярных процессов (б)

Кроме надежного различения критичности системных изменений в течение квази-регулярных режимов на практике к методу анализа предъявляются и такие требования как прозрачность вычислительного процесса, открытость всех процедур, гибкость, (при смене машин и оборудования), реализуемость, простота (внедрения и освоения). Современная техника как правило оснащена оборудованием – сенсорами, фиксирующими ее текущее состояние в формате временных рядов (TS). Следует отметить, что наиболее известные методы обработки временных рядов – Фурье- и вейвлет-анализ, мультифрактальный анализ, анализ, использующий искусственные нейронные сети в большинстве своем сложен и требует при внедрении серьезных затрат и тщательной и долгой настройки и верификации.

В качестве альтернативы в [3] предложен Сетевой подход (СП) к оценке остаточного ресурса карьерных самосвалов, годный также для решения широкого спектра задач распознавания иных специфических свойств систем природного и когнитивного характера.

Важно, что СП использует не исторический набор данных, но свежий сет с момента новой эры регулярности (жизненного цикла) машины. На практике достаточным может быть и 200-250-ти часовой временной ряд фиксируемых показателей режимов работы карьерного самосвала.

Относительно простая методика различения критических состояний разных объектов (выявления условия критичности, в терминологии временных рядов обнаружения «разладки» - Change Point [4]): электродвигателей, двигателей внутреннего сгорания, участков Земной коры и пр. в таком виде состоялась в связи с общедоступными R- инструментами обработки временных рядов и их сетевизацией. Иллюстрация обработки данных с использованием СП представлена на рис. 2. Ранее, применяя подходы науки о сетях, авторы настоящей методики подготавливали и адаптировали алгоритмы и коды (Python, Gyson, и т.п.) конвертирования временных рядов в сети и последующего сравнения уже сетей, что всегда интересно и полезно, но безусловно и трудоемко (рис. 2.1).

В используемом упрощенном подходе (рис. 2.2) на последнем этапе результаты сравнения временных рядов дискретизируются (можно сказать, квантуются), используется язык дискретной математики - теории графов, достаточно понятный и для пользователей из прикладных предметных областей.

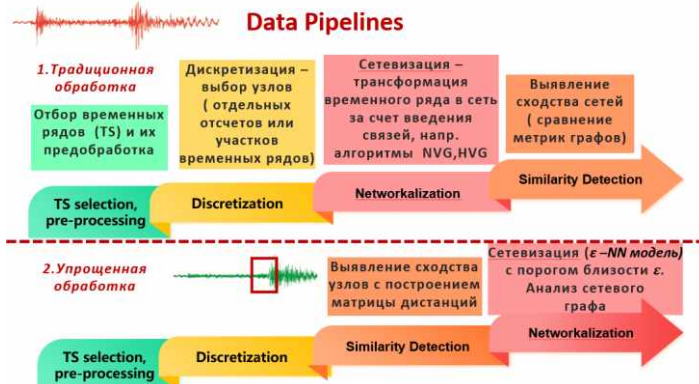


Рисунок 2 - Обработка данных с использованием сетевого подхода в выявлении пограничных и критических режимов

Установление степени подобия TS позволяет определить критичность текущего момента T_c (наличия «разладки», Change Point). Возникает естественный вопрос: насколько важно после сравнения окон временных рядов на сходство переводить (трансформировать) TS в сетевую структуру? Действительно, казалось бы достаточно ограничиться выявлением степени подобия участков временного ряда через расчет метрики «расстояний» (дистанций) [5].

Однако, именно сетевизация обеспечивает открытость методики и простоту ее интерпретации. Полезной при этом оказывается пороговая модель связности узлов в сети (ϵ -NN модель) [5], предполагающая, что любой узел соединен со всяким другим, если расстояние до него меньше $\epsilon \in R_+$, (задается экспертом).

Выбирая надежные пороговые значения с помощью ϵ -NN – сети выявляются узлы (окна временного ряда), соответствующие критическим состояниям («разладкам», Change Points) и, тем самым, дается сигнал о необходимости внепланового технического обслуживания и ремонта (ТОиР) горной машины (рис.3).

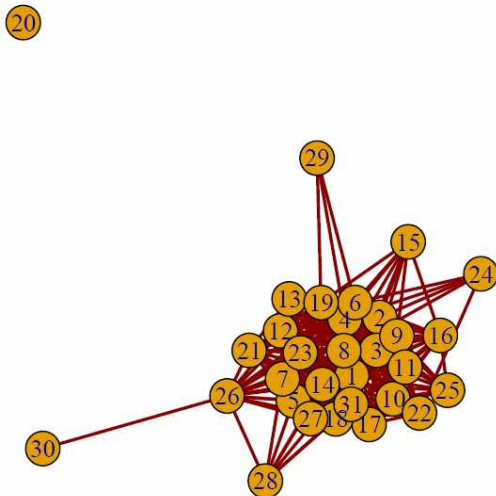


Рисунок 3 - Иллюстрация критичности узла - окна (временного ряда 20-го дня месяца мая 2025 г.) сигнала, поступающего от датчика давления масла двигателя карьерного самосвала.

Используемый алгоритм определения сходства TS–DTW, «динамическая трансформация времени» [6], $\epsilon=0.6$

Представляется перспективным использование методики при выявлении пограничных и критических режимов машин и оборудования,

параметры функционирования которых время от времени корректируются, например, при проведении ТОиР (т.е. систем с непродолжительными регулярными жизненными циклами). При этом для выявления критичности состояния системы в определенный период регулярной работы достаточным является временной ряд фиксируемых показателей режимов горных машин в $n \cdot 10^4$ отсчетов, что соответствует длительности работы в $n \cdot 24$ часов. Полезной видится настоящая методика при внедрении автоматизированных систем контроля остаточного ресурса в случаях множественных экземпляров машин или множественных показателей режимов их работы, когда ручное обслуживание высококвалифицированными специалистами становится проблематичным.

Несомненными преимуществами сетевого решения задачи оценки остаточного ресурса машин и систем горнодобывающей промышленности являются:

1. Перспективы дальнейшей автоматизации и совершенствования алгоритмов идентификации отказов, что повысит эффективность и надежность диагностики.

2. Наглядность, простая интерпретация, возможность использования дополнительного ручного режима.

Список литературы

1. Садыхов Г.С., Кудрявцева С.С. Оценка среднего остаточного ресурса невосстанавливаемых объектов на основе цензурированных данных о безотказных наработках // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2024. - №1. - С. 43-50. DOI: 10.31857/S0235711924010059

2. Hu, Y., Liu, S., Lu, H., Zhang, H. Remaining Useful Life Model and Assessment of Mechanical Products: A Brief Review and a Note on the State Space Model Method. Chin. J. Mech. Eng. 32, 15 (2019). <https://doi.org/10.1186/s10033-019-0317-y>

3. Зырянов И.В., Непомнящих К.А., Труфанов А.И., Храмовских В.А., Шевченко А.Н. Сетевой метод как инструмент прогнозирования отказов карьерных автосамосвалов. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2025, номер 2, С.78-89

4. Aminikhanghahi, S., Cook, D.J. A survey of methods for time series change point detection. Knowl Inf Syst 51, 339–367 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10115-016-0987-z>

5. Ferreira L. N. From time series to networks in R with the ts2net package, 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.09660>.

6. Иванова Е.В., Цымблер М.Л. Обзор современных систем обработки временных рядов //Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2020. Т. 9, № 4. С. 79–97. DOI: 10.14529/cmse200406

КАРТИРОВАНИЕ ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ФОНОВОГО ПОЛЯ (ПОЛЯ ПОДСВЕТКИ)

Савватеев Я.В.¹, Иляхин С.В.², Корнилов Б.А.³

¹ИФЗ РАН им. О.Ю.Шмидта, ²РГГРУ имени Серго Орджоникидзе,

³Научно-технический кооператив «Диоген», г. Москва

Аннотация

При разработке месторождений кристаллосырья главная задача - необходимость определить в породе локализацию отдельных кристаллов с целью их дальнейшей выработки и безопасного извлечения. При поиске геофизических аномалий данная задача решается применением различных методов, в том числе георадиолокационным зондированием. Одним из методов решения подобной задачи является также является авторский метод георадиолокационного зондирования, с получением отраженного сигнала под дополнительным действием фонового поля (поля подсветки)

Ключевые слова: временной спектр, локальные объекты; прямое Фурье-преобразование, обратное Фурье-преобразование частотный спектр; зона прохождения прямой волны.

Теория

Разрешающая способность метода определяется различным расстоянием между частотными пиками в координатах ось частот – спектральная плотность. Важные осложняющие факторы при применении георадиолокационного зондирования при картировании отраженного сигнала являются волна прямого прохождения между приемной и передающей антенной, либо кратные волны [1]. Однако разрешающую способность есть возможность повысить действием фонового поля (поля подсветки), представляющее собой наложение электромагнитного поля на поле отраженного сигнала георадара, действующее аналогично операции деконволюции по отношению к отраженному сигналу. Под воздействием фонового поля и смещения спектра в сторону высокочастотной составляющей проявляются дифракционные волны над локальными объектами (представляющими собой объекты поиска - кристаллы в модели породы).

Электромагнитное поле отраженного сигнала в двух плоскостях: в магнитной (горизонтальной) при значении угла $\varphi=0$ и $\varphi=\pi$, и в электрической (горизонтальной) плоскости при $\varphi=+\pi/2$ (названия плоскостей связаны с поляризацией набегающей волны).

$$E_{\Omega} = H_{\varphi} = 0,$$

$$E_{\varphi} = -H_{\Omega} = -ikabB(e^{ikr}/4\pi r)(1 + \cos\Omega)F_d(\Omega), \quad (1)$$

где $F_d(\Omega) = \sin((\pi a/\lambda)\sin\Omega)/(\pi a/\lambda)\sin\Omega) \dots (1)$

a и b – стороны прямоугольного волновода, φ и Ω – углы сферической системы координат, k – номер волнового минимума, λ – длина волны, функция $F_d(\Omega)$ определяет направленность волновода при дифракции над локальными объектами.

Основой рассматриваемого способа является фильтр Винера [2]:

$$W(\omega) = \frac{H^*(\omega)}{|H(\omega)|^2 + \frac{P_N(\omega)}{P_S(\omega)}} \quad (2)$$

где $H(\omega)$ – фурье-образ аппаратной функции $h(t)$, $H^*(\omega)$ – сопряженная величина [3, 4], а $P_S(\omega)$ и $P_N(\omega)$ – спектральные плотности энергии соответственно сигнала и шума. Аппаратная функция $h(t)$ в рассматриваемой задаче соответствует по форме и ширине спектральному пику [5, 6].

Методика измерений

В целом, задачей поставленного эксперимента было проверка возможности определения наличия кристаллов во вмещающей породе при помощи излучения георадара в отсутствии фонового поля [5], и при наличии поля подсветки. В качестве источника георадиолокационного излучения использовался георадар производства группы компаний «Логис-Геотех» АБ-400 с центральной частотой 400 МГц. Объекты поиска – три кристалла берилла, и три кристалла мориона различного размера были вставлены на различных расстояниях внутрь специально подготовленного ящика с песком.

Наличие фонового поля повышает разрешающую способность за счет смещения спектра полезного сигнала в сторону высокочастотной составляющей, облегчая задачу выявления аномалий, связанных с локальными объектами [7]. У нас появляется возможность сравнить запись отраженных сигналов без действия фонового поля, и с включенным генератором фонового поля.

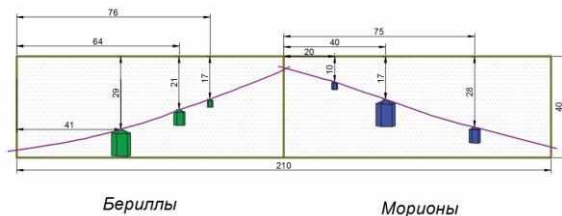


Рисунок 1 - Схема проведенного эксперимента (расстояния даны в сантиметрах)

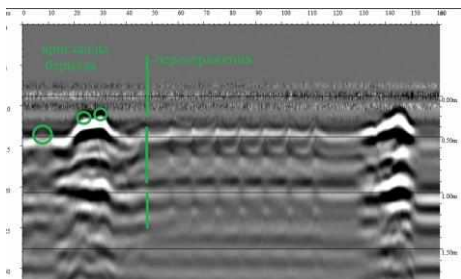


Рисунок 2 – Запись радарограммы профиля георадиолокационного зондирования при действии генератора фонового поля (в записи отраженного сигнала появляются дифрагированные волны над кристаллами берилла)

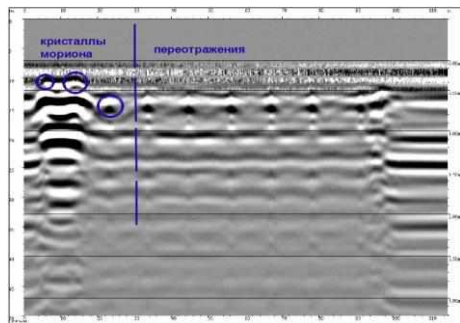


Рисунок 3 - Запись радарограммы профиля георадиолокационного зондирования при действии генератора фонового поля (в записи отраженного сигнала появляются дифрагированные волны над кристаллами мориона)

Выводы

При проведении георадиолокационного зондирования действие фонового поля облегчает поиск локальных объектов. Практически на всех выявленных локальных объектах произошло уточнение положения при наличии фонового поля за счет смещения спектра к более высокочастотным составляющим, в том числе появились переотражения, уточняющие локализацию кристаллов.

Список литературы

1. Применение голографических подповерхностных радиолокаторов для обследования и диагностики конструкционных материалов / Разевиг В.В., Васильев И.А., Журавлев А.В., Ивашов С.И. // Тр. III Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». — Москва, 2009. — Том 1 — С. 173-177.
2. Вайнштейн, Л.А. Электромагнитные волны // Советское Радио. — 1957. — С.471-490.
3. Вопросы подповерхностной радиолокации. Коллективная монография / Под ред. А.Ю. Гринёва. — М.: Радиотехника, 2005. — 416 С.
4. Выбор частоты при СВЧ диагностике композиционных изделий с помощью голографических радиолокаторов / Ивашов С.И., Чиж М.А., Журавлев А.В.,

Разевиг В.В., Мильяченко А.А., Кологов А.В. // Контроль. Диагностика. — 2017 — №1. — P. 16-23. DOI: 10.14489/td.2017.01.pp.016-023.

5. Léger, E.; Saintenoy, A.; Coquet, Y.; Tucholka, P.; Zeyen, H. Evaluating hydrodynamic parameters accounting for water retention hysteresis in a large sand column using surface GPR. J. Appl. Geophys. 2020, 182, 104176.

6. Tran, A.P.; Vanclooster, M.; Zupanski, M.; Lambot, S. Joint estimation of soil moisture profile and hydraulic parameters by ground-penetrating radar data assimilation with maximum likelihood ensemble filter. Water Resour. Res. 2014, 50, p.3131–3146.

7. Yu, Y.; Huisman, J.A.; Klotzsche, A.; Vereecken, H.; Weihermüller, L. Coupled full-waveform inversion of horizontal borehole ground penetrating radar data to estimate soil hydraulic parameters: A synthetic study. J. Hydrol. 2022, p.610.

УДК 622.271

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВНУТРИКАРЬЕРНЫХ СЪЕЗДОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ БЕСПИЛОТНОГО АВТОТРАНСПОРТА

Бархатов С.П.

ИПКОН РАН, г. Москва

Аннотация. Исследования посвящены рассмотрению вопросов изменения параметров глубоких карьеров при применении на горном производстве беспилотного автотранспорта. Актуальность темы подтверждается высоким уровнем научно-технического прогресса, достигнутого за последнее десятилетие. Цель работы заключается в определении параметров внутрикарьерных съездов и в выявлении изменения эксплуатационных затрат за счет уменьшения объема вскрышных работ. Цель сформулирована на основании возможности внедрения инновационной техники на существующих предприятиях, а также возможности проектирования новых карьеров твердых полезных ископаемых с изначальным использованием беспилотного автотранспорта.

Введение

В современных условиях внедрение роботизированного карьерного автотранспорта становится ключевым направлением повышения безопасности и эффективности горных предприятий.

Применение роботизированных самосвалов дает несколько преимуществ по сравнению с автосамосвалами, управляемыми водителями. Как известно, подавляющее большинство ошибок, допускаемых при ведении горных работ, связаны с человеческим фактором, что в свою

очередь приводит к возникновению опасных ситуаций, простоям оборудования и пр. Помимо этого, известны сложности выдерживания водителем постоянной скорости, что сказывается на затратах топлива и износе техники. Частично данная проблема решается применением цифровых советчиков [1]. Важно отметить, что человеческий фактор влияет на небезопасное и нерациональное выстраивание траектории своего движения, что может привести к заминкам на узких участках пути, где встречаются несколько водителей одновременно [2]. Это в свою очередь сводит на нет возможность применения однополосной дороги с двухсторонним движением. Перечисленные проблемы обуславливают актуальность перехода горной промышленности к применению беспилотного автотранспорта. В области проектирования карьеров твердых полезных ископаемых также применяются новые решения. Одним из таких новшеств, может быть, уменьшение объемов вскрышных работ за счет изменения параметров внутрикарьерных съездов.

В диссертации Д.Я. Владимирова [3] показано, что роботизация позволяет пересматривать параметры горнотехнических систем. Работы К.Н. Трубецкого, М.В. Рыльниковой и И.А. Пыталева [4,5] подтверждают возможность уменьшения ширины транспортных берм за счёт исключения человеческого фактора. М.Л. Хазин [6] указывает на допустимость перехода к однополосному движению с площадками разъезда.

В настоящей работе предложено конкретное решение и расчёты для обоснования однополосных съездов с площадками примыкания. Применение роботизированного автотранспорта, где все управление согласованно между всеми единицами техники, позволяет выстраивать маршрут по самому короткому рациональному пути, предотвращая возможность простоев, столкновений и т.д. Благодаря этому возможно достичь налаженную систему, при которой самосвалы встречались бы и разъезжались на площадке примыкания (рис. 1), что позволило бы сократить ширину съездов на определенных участках.

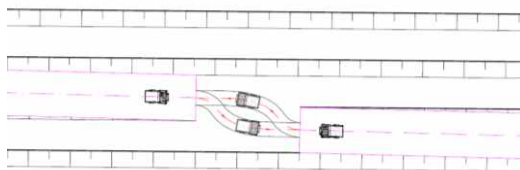


Рисунок 1 – Схема разьезда роботизированных самосвалов на площадке примыкания

На рис. 2 приведен вид сверху карьера со съездами для автотранспорта, управляемого водителями (а), а также вид сверху карьера со съездами для беспилотного автотранспорта (б).

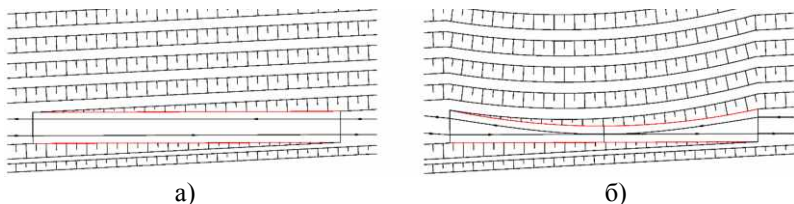


Рисунок 2 – Вид сверху карьеров со съездами:
а) для автотранспорта, управляемого водителями,
б) для беспилотного автотранспорта

Обсуждение результатов

В связи с уменьшением транспортной бермы на определенных участках увеличивается угол откоса борта карьера. Таким образом, при глубине карьера 100 м угол откоса борта с одним съездом увеличивается на 0,4-0,5 градусов. При глубине карьера 100 м с двумя съездами угол откоса борта может быть увеличен на 1,1-1,5 градуса. При этом объем извлекаемой вскрыши сокращается в среднем на 6-8%. На рисунке 3 представлены разрезы карьеров при применении управляемого людьми (красным цветом) и беспилотного автотранспорта (зеленым цветом).

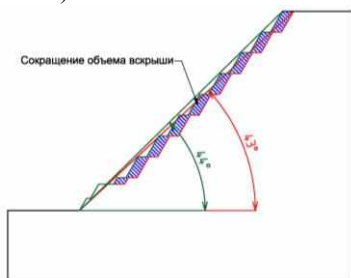


Рисунок 3 – Разрез карьера

Заключение

Подводя итог, можно выделить положительный экономический эффект от проектирования узких внутрикарьерных съездов: уменьшение объема вскрыши на 6-8%, уменьшение фонда оплаты труда (ФОТ) за счет сокращения количества водителей самосвалов, увеличение коэффициента использования техники, увеличение ресурса техники (уменьшение износа техники), уменьшение расходов на топливо за счет перехода на электричество.

Список литературы

1. Piklema Driver Assistant / Электронный ресурс. Режим доступа <https://www.piklema.ru/pds>. Дата обращения 07.09.2025.

2. Бархатов, С.П. Исследование возможностей применения роботизированных самосвалов в горнодобывающей отрасли / С.П. Бархатов, Я.В. Устинова, А.С. Семенов // Горное оборудование и электромеханика. – 2022. – №1(159). – С. 19-27. – DOI 10.26730/1816-4528-2022-1-19-27. – EDN MLEBJY.

3. Владимиров Д.Я. Обоснование параметров роботизированных горно-технических систем в осложненных условиях открытой разработки месторождений полезных ископаемых: автореферат дис. канд. техн. наук: 25.00.21 / Владимиров Дмитрий Ярославович – Магнитогорск, 2016. – 21 с.

4. Трубецкой К.Н. Условия и перспективы внедрения роботизированных геотехнологий при открытой разработке месторождений / К.Н. Трубецкой, М.В. Рыльникова, Д.Я. Владимиров, И.А. Пыталев // Горный журнал. – 2017. – №11. – С. 60-64. – DOI 10.17580/gzh.2017.11.11.

5. Трубецкой, К. Н. От системы «Карьер» к новому интеллектуальному укладу открытых горных работ / К.Н. Трубецкой, М.В. Рыльникова, Д.Я. Владимиров // Проблемы недропользования. – 2019. – №3(22). – С. 39-48.

6. Хазин, М.Л. Роботизированная техника для добычи полезных ископаемых / М.Л. Хазин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2020. – Т. 18, №1. – С. 4-15. – DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-1-4-15.

УДК: 622.1:550.834

МЕТОДИКА И ИНСТРУМЕНТАРИЙ ПОСТРОЕНИЯ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ВИДЕОСЪЕМКИ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК С НИЗКОЙ ОСВЕЩЕННОСТЬЮ*

Кирков А.Е., Гавриленко В.В.

ИПКОН РАН, г. Москва

Построение фотограмметрических моделей на основе данных видеосъемки в подземных горных выработках с плохой освещенностью является актуальной задачей в свете развития беспилотных технологий, машинного обучения и искусственного интеллекта [1,2]. Одна из исследовательских задач здесь состоит в разработке соответствующих методик для подземных условий при отсутствии спутниковых систем. Создание точной 3D-модели по видеозаписи, снятой в сложных условиях горных выработок, представляет собой многоэтапный процесс, требующий специальных методик сбора, обработки и автоматизированного анализа данных. Среда с недостаточным освещением, однородными

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-17-00345, <https://rscf.ru/project/25-17-00345/>

текстурами и ограниченным пространством предъявляет высокие требования к каждому этапу мониторинга и последующего анализа данных. Для подземной видеосъемки и последующей фрагментации видео критичны недостаток света, искажение объектива, сложность текстур и многие другие параметры, которые в условиях дневной поверхности не оказывают негативного влияния на последующую обработку данных видеоряда.

Пилотные исследования проводились в подземных горных выработках с использованием БПЛА, которые находят все большее применение [3]. Освещенность создавалась дополнительно – размещением светодиодной системы в горных выработках. БПЛА был оснащен собственной системой подсветки.

Подготовка полученных данных состояла в раскадровке видео, когда из видеофайла извлекались все кадры, включая ключевые и промежуточные. Для 30-секундного видео с частотой 25 кадров в секунду получали 750 кадров. С учетом неустойчивого полета БПЛА (по высоте и скорости с учетом влияния воздушной струи) полученные данные характеризовались крайней неоднородностью. Фильтрация кадров включала выбор соседних кадров с перекрытием менее 90%, чтобы исключить дублирующие изображения.

Коррекция изображений состояла в применении комплексного подхода улучшения их качества. Для этого производилась очистка от шумов, размытия и других дефектов, характерных для подземных съемок. Для упрощения обработки кадров, полученных с применением широкоугольных объективов, осуществлялась обрезка периферийной части изображений с большими искажениями.

Алгоритм подбора стереопар включал использование двух показателей для оценки изменений между кадрами - изменение цвета пикселей, а также изменение яркости и структуры изображения. С учетом выполненной обработки отстраивались графики изменений вышеназванных показателей во времени. По ним определялись кадры с оптимальным перекрытием (40-20% разницы).

С учетом реализованного этапа подбора стереопар выполнено построение модели. Из отобранных кадров сформированы стереопары, которые были использованы для построения фотограмметрической модели.

Полученная модель трансформируется в нужные координаты и масштаб с учетом реальных горнотехнических условий в привязке к маркшейдерской сети рудника.

Применение разработанной для условий подземного рудника технологии перспективно с учетом развития технологий компьютерного зрения и нейросетей для решения широкого ряда задач мониторинга

и оценки параметров геотехнологических процессов, таких как очистная выемка, крепление, состояние технологического оборудования, а также широкого спектра геомеханических задач [4].

Список литературы

1. Захаров, В.Н. Ценность и взаимосвязь цифровых данных горнотехнических систем в единой системе государственного управления недропользованием / В.Н. Захаров, Д.Н. Радченко, Д.А. Клебанов // Горный журнал. – 2024. – №11. – С. 63-69.
2. Подкуйло Н.В. и др. Современные технологии в маркшейдерском деле // Горный журнал, 2025. -№6 – С. 87-91.
3. Использование беспилотных летательных аппаратов для управления процессами подземных горных работ / Г.С. Курчин, А.О. Шигин, А.Н. Анушенков [и др.] // Маркшейдерия и недропользование. – 2025. – Т. 25, №1. – С. 82-86.
4. Анализ методов подготовки и преобразования информации, поступающей в хранилища данных для эффективного управления горнотехнической системой / В.Н. Захаров, Д.А. Клебанов, М.А. Макеев, Д.Н. Радченко // Горная промышленность. – 2023. – № S5. – С. 10-17.

УДК 622.272.2:622.36

ПОВЫШЕНИЕ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПОЛЕЗНОГО ИСКОПАЕМОГО ПРИ РАЗРАБОТКЕ КАЛИЙНЫХ ПЛАСТОВ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ

Ковальский Е.Р., Конгар-Сюрюн Ч.Б.

*Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург*

Применяемые в настоящее время камерные системы разработки калийных руд характеризуются низкими показателями извлечения [1]. При этом предлагаемые различными исследователями технические решения по увеличению коэффициента извлечения калийных руд не могут обеспечить достаточный уровень безопасности разработки калийных месторождений по фактору прорыва надсолевых вод в выработанное пространство рудников.

С целью решения вопросов, связанных с ресурсосбережением, технической и экологической безопасностью калийных рудников, наиболее перспективным направлением исследований является внедрение двухстадийной выемки калийной руды с закладкой выработанного пространства. Закладка увеличивает несущую способность целиков, что позволяет регулировать напряженным состоянием массива [2].

В условиях больших глубин наиболее целесообразно использование камерной системы разработки с периодическим оставлением опорных целиков (B) между смежными выемочными участками (L) (рис. 1). Данный способ обеспечивает более высокие показатели извлечения по сравнению с камерной системой разработки с оставлением междуканнерных целиков постоянной ширины, а также является более перспективным с точки зрения возможности дальнейшего повышения извлечения путем отработки опорных целиков.

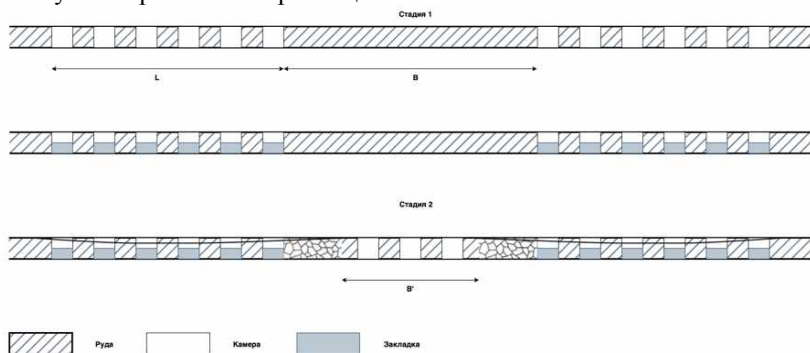


Рисунок 1 - Камерная система разработки с периодическим оставлением опорных целиков

Основное внимание в работе уделено возможности разгрузки опорного целика за счёт проведения закладочных работ в отработанных камерах на выемочном участке.

Комплексное рассмотрение вопросов, связанных с закладочными работами, позволит предложить варианты систем разработки (технологических схем) с закладкой, обеспечивающие повышение коэффициента извлечения калийной руды при сохранении безопасных условий подработки водозащитной толщи [3]. Одной из важных задач при этом будет являться прогнозирование распределения напряжений во временной перспективе развития геомеханических процессов в горном массиве [4, 5]. Традиционно для этого в горной геомеханике применяются численные методы, характеризующиеся относительно низкими временными затратами на проведение экспериментов по сравнению с физическими экспериментами, а также позволяющие учесть существенно большее количество влияющих факторов.

Результаты проведенных исследований показали, что при закладке камер под кровлю твердеющими закладочными материалами напряжения в опорном целике снижаются практически до уровня естественных напряжений (рис. 2).

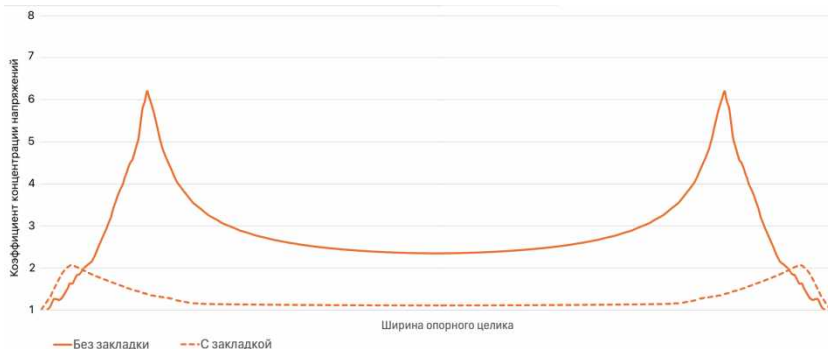


Рисунок 2 – распределение напряжений в опорном целике до и после закладки камер

Распределение напряжений свидетельствует о возможности разгрузки опорного целика от повышенных напряжений, что позволит дополнительно пройти камеры в опорном целике, повысив коэффициент извлечения.

Список литературы

1. Барях А.А., Губанова Е.А. О мерах охраны калийных рудников от затопления // Записки Горного института. 2019. Т. 240. С. 613–620. DOI: 10.31897/pti.2019.6.613.
2. Ковальский Е.Р., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Сиренко Ю.Г., Миронов Н.А. Моделирование реологических процессов деформирования несущих элементов камерной системы разработки для условий Верхнекамского месторождения калийных солей // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024. – Т. 16. – № 3. – С. 1017–1030. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1017-1030.
3. Sidki-Rius N., Sanmiquel L., Bascompta M., Parcerisa D. Subsidence Management and Prediction System: A Case Study in Potash Mining // Minerals. 2022. № 12(9). 1155. DOI: 10.3390/min12091155.
4. Конгар-Сюрюн Ч.Б., Ковальский Е.Р. Твердеющие закладочные смеси на калийных рудниках: перспективные материалы, регулирующие напряжённо-деформированное состояние массива // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – № 13(4). – С. 177–187. <https://doi.org/10.46698/VNC.2023.34.99.014>.
5. Морозов И.А. Применение закона Нортон для описания процесса ползучести соляных пород // Горное эхо. – 2021. – № 2. – С. 20–23. <https://doi.org/10.7242/echo.2021.2.5>.

ПУТИ СНИЖЕНИЯ РИСКА АВАРИЙ И ИНЦИДЕНТОВ ПРИ РАБОТЕ ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЯЕМОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ОЧИСТНЫХ КАМЕРАХ*

Сыровацкий Р.А.

ИПКОН РАН, г. Москва

Аннотация. В работе рассматриваются особенности работы дистанционно управляемых погрузочно-доставочных машин (ПДМ) в сложно прогнозируемых условиях очистных подземных камер с камерными системами разработки с торцевым выпуском руды. Особое внимание уделено систематизации опасных явлений, возникающих при разработке месторождений полезных ископаемых, и применению в качестве средств оперативного мониторинга беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с целью минимизации и управления потенциальными рисками. Предложенный подход обеспечивает повышение безопасности и эффективности автоматизированных подземных горных работ, минимизируя риски для персонала, техники и оптимизируя производственные процессы.

Введение

Современная тенденция в области автоматизации подземных горных работ направлена на повышение безопасности и производительности рудников, что привело к широкому внедрению камерных систем разработки с торцевым выпуском руды и использованием дистанционно управляемых погрузочно-доставочных машин (ПДМ) [1,2]. Ключевой особенностью подобных систем является исключение присутствия рабочего персонала в очистном пространстве, что повышает безопасность пребывания персонала в подземном руднике. Однако данные условия сопровождаются ещё одним риском, связанным с потенциальным повреждением дорогостоящего горного оборудования ввиду разного рода обрушений, вывалов и протекающих в массиве горных пород геомеханических процессов. В связи с этим актуальной задачей становится своевременная идентификация и систематизация потенциальных опасностей для разработки превентивных мер контроля.

В основу работы положен анализ практики работы подземных рудников, применяющих системы с торцевым выпуском и последующей

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-17-00345, <https://rscf.ru/project/25-17-00345/>

закладкой выработанного пространства породой с цементным раствором. Была изучена статистика инцидентов, проанализированы данные видеомониторинга работы ПДМ в границах очистного пространства, а также результаты геомеханического анализа и маркшейдерского контроля, включая методы лазерного сканирования и фотограмметрии. Систематизированы ряд характерных, для подобных систем разработок, опасных явлений и процессов, протекающих как в массиве горных пород, так и в границах очистного пространства.

В процессе выпуска и отгрузки отбитой руды происходит разгрузка и перераспределение напряжений в массиве, что приводит к проявлению ряда специфических опасностей, это [3,4]:

- обрушения разупрочненных вмещающих пород. По мере очистной выемки рудной массы происходят нарушение равновесия массива, приводящее к вывалам и отслоениям пород с боков и кровли камер;

- обрушение негабаритных фрагментов горной породы. Крупные куски руды, образовавшиеся из-за несовершенства производства буровзрывных работ с проектными, могут расклиниваться в массиве и внезапно обрушиваться в процессе выпуска рудной массы из очистной камеры, создавая угрозу для оборудования;

- формирование «зависаний» и «затягов» (недоработок). В кровле забоя могут формироваться участки неразрушенного массива или слежавшейся рудной массы, которые обрушаются под воздействием динамических нагрузок от работы ПДМ и по мере выпуска и отгрузки рудной массы;

- отслоения по литологическим контактам. На участках со смешанными, разнородными литотипами и невыдержанным составом пород возможны обрушения по границам раздела литологических разностей;

- обрушение закладочного массива. При отработке последующих в очередности отработки камер, примыкающих к закладочным массивам смежных ранее отработанных камер, существует риск обрушения материала закладки в очистное пространство;

- формирование естественного свода и зон беспорядочного обрушения. При отработке слепых камер в динамике выпуска может самопроизвольно формироваться свод обрушения, плохо прогнозируемый традиционными статическими методами.

Обсуждение результатов

Наиболее перспективным направлением для оперативного выявления указанных опасностей признано внедрение беспилотных технических средств, в частности, беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), в качестве средств комплексного мониторинга [2]. Они позволяют проводить оперативный мониторинг состояния очистного пространства

и контура выработок с вентиляционно-закладочного горизонта, идентифицируя трещины, отслоения, зоны интенсивной трещиноватости, зоны дробления (брекчирования), и скопления негабарита. Совместный анализ данных мониторинга и телеметрии с ПДМ позволяет своевременно принимать решения об остановке работ и выводе оборудования из опасной зоны для проведения профилактических мероприятий. Вместе с тем, интеграция данных мониторинга и телеметрии требует развития алгоритмов обработки информации и систем принятия решений в реальном времени.

Заключение

Рассмотренные условия формирования опасностей в очистных камерах представляют собой основу для создания эффективной системы управления рисками при автоматизированной очистной выемке. Внедрение комплекса беспилотного мониторинга на базе БПЛА и технологий LiDAR+SLAM позволяет перейти от реактивной к проактивной модели безопасности, минимизировать простои дорогостоящей техники и предотвратить аварийные ситуации, обеспечивая тем самым экономическую эффективность и промышленную безопасность ведения подземных горных работ. Дальнейшие исследования и внедрение подобных систем станут ключевыми факторами для широкого распространения автономного оборудования на подземных рудниках.

Список литературы

1. Larsson J. Unmanned Operation of Load-Haul-Dump Vehicles in Mining Environments / Orebro Studies in Technology 51 – 2011 – no. 51 – P. 1-68.
2. Прокопьева, В.М. Обзор роботизированной техники в горном деле / В.М. Прокопьева, М.В. Каймонов // Интерактивная наука. – 2023. – №8 (84). – С. 49-53.
3. Именитов В.Р. Технология, механизация и организация производственных процессов при подземной разработке рудных месторождений / В.Р. Именитов // М.: «Недра» - 1973 – 464 с.
4. Медведев И.Ф., Абрамов Л.В., Нефедов Л.П. Ликвидация завесаний и вторичное дробление руды. / И.Ф. Медведев, Л.В. Абрамов, Л.П. Нефедов – М., «Недра», 1975. – 200 с.

О РАЗРАБОТКЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ К УПРАВЛЕНИЮ ОЧИСТНЫМ КОМБАЙНОМ В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Малахов Ю.В.

ИПКОН РАН, г. Москва

Аннотация. В статье сформулирована концепция к разработке основных технических требований к функциям автоматизированного

очистного комбайна с адаптивно управляемыми режимами работы. Отмечено, что для эффективной и безопасной работы очистного комбайна, его режимы работы должны быть адаптируемы при изменении горно-геологических и горно-технических условий в лаве.

Введение.

В 2025 году утверждена энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2050 года [1], в которой определено, что к приоритетным направлениям развития угольной отрасли отнесена безопасная отработка запасов. В комплекс первоочередных мер по решению задач угольной промышленности входит внедрение ресурсо- и энергоэффективных инновационных технологий добычи угля с учетом современных требований в области промышленной безопасности, в том числе внедрение технологий безлюдной добычи угля.

Комплекс мероприятий, обеспечивающих решение указанных задач, предусмотрен на втором этапе (2026–2030 годы) реализации программы развития угольной промышленности на период до 2035 года [2] за счет интенсификации научно-технологического и технического развития, в том числе за счет создания условий для массового внедрения цифровых технологий в процессах добычи угля. Подпрограмма «Обеспечение технологического развития угольной промышленности» предусматривает в части технологий подземных горных работ развития автоматизация и роботизация комплексно-механизированных забоев на основе создания комплексов нового поколения.

Актуальность.

Выемочный очистной участок является основным производственным элементом угольной шахты [3]. Опыт отработки угольных пластов, показывает, что эффективная работа очистных механизированных комплексов отмечается в угольных шахтах с благоприятными горно-геологическими условиями. При этом в настоящее время в угольных шахтах наблюдается устойчивая тенденция перехода горных добычных работ на большие глубины 400 м и более, при значительном росте интенсификации очистных работ. В таких условиях, для безопасной и эффективной работы оборудование очистных механизированных комплексов должно быть адаптируемо к рискам ухудшения горнотехнических и горно-геологических факторов обрабатываемых угольных пластов, взаимоувязаны функционально и конструктивно, обеспечивать приспособляемость к изменяющимся условиям конкретной очистной лавы и угольного пласта, формировать режимы работы оборудования с учетом контроля и анализа параметров безопасности [4]. Мировой опыт [5, 6] определяет, что мероприятия по повышению эффективности работы оборудования в выемочных забоях и внедрению

новых технологий должны проводится комплексно, с учетом обеспечения безопасности работ.

Предлагаемые решения.

Основной горной машиной очистного механизированного комплекса является очистной комбайн, который одновременно выполняет операции по разрушению угля и его погрузке на лавный конвейер. Важнейшим показателем эффективности очистного комбайна является его производительность. По данным [7] к ключевым факторам влияющих на эффективную и безопасную работу очистных забоев отнесены общий контроль и управление всем комплексом технологических процессов в лаве, в том числе при помощи комплекса датчиков. Одним из путей повышения производительности очистного комбайна является обеспечение рациональных режимных параметров его работы [8].

В работах [9-11] отмечено, что на выбор рациональных режимов работы очистного комбайна оказывают влияние состояние шахтной атмосферы, угольного и породного массива. При этом оптимальная производительность достигается при совмещении во времени и пространстве выбора режимов работы и контроля параметров безопасности в лаве и взаимная увязки этих процессов.

Для достижения целей рациональных режимов работы очистного комбайна в сложных горно-геологических и горно-технических условий необходима современная технология управления технологическим процессом, при котором заданные режимы работы очистного комбайна изменялись бы в зависимости от текущих условий, параметров пласта и др.

На основе вышеописанного подхода сформулирована концепция основных технических требований для создания автоматизированного очистного комбайна с адаптивно управляемыми режимами работы.

1. Процесс управления очистного комбайна совместно с параметрами его функционирования должен базироваться на использовании информации о состоянии массива горных пород, параметрах рудничной атмосферы и горного давления в очистном забое. В качестве источника информации следует использовать датчики и сенсоры контролирующие изменения горно-геологических и горно-технических условий в лаве.

2. Автоматический режим работы и управления очистным комбайном должно обеспечивать его точное позиционирование и контроль положения в лаве (угол падения и поперечный). При этом управление комбайна должно быть взаимовязано с автоматической передвижкой секций крепи после выемки угля комбайном и с автоматическим контролем и обеспечением прямолинейности лавного конвейера.

3. Процесс планирования выемки угля очистным комбайном должен быть адаптивным. Повышение эффективности выемки угля следует обеспечивать путем использования информации о геологических данных строения угольного пласта (прогноза положения поверхности кровли

и почвы впереди забоя) и мониторинга положения почвы и кровли пласта при движении очистного комбайна. Выбор оптимальной траектории движения исполнительных органов и скорости подачи очистного комбайна должны быть адаптированы с непосредственным массивом горных пород пласта, с использованием математической модели геологических данных пласта и датчиков отслеживания положения почвы и кровли пласта.

Разработка исчерпывающих технических требований к функциям очистного комбайна соответствующих современному техническому уровню – это сложный и многогранный процесс, требующий комплексного подхода и учета знаний и опыта в области добычи угля, горного машиностроения, робототехники, информационных технологий и безопасности. Создание научно-технического задела, по разработке перспективного автоматизированного очистного комбайна с адаптивно управляемыми режимами работы в настоящее время возможно в рамках научно-технического сотрудничества с технологическим партнером, в качестве которого мог бы выступить Анжеромаш где разработан перспективный отечественный очистной комбайн K-1000A [12]

Заключение. Сформулированная в работе концепция основных технических требований к функциям автоматизированного очистного комбайна с адаптивно управляемыми режимами работы направлена на обеспечение безопасности, эффективности и повышение производительности выемки в очистных забоях со сложными горно-геологическими и горно-техническими условиями залегания углей, и является научно-техническим заделом для создания роботизированного очистного механизированного комплекса с адаптивно управляемыми режимами работы, без постоянного присутствия людей.

Список литературы

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2050 года. <http://static.government.ru/media/files/LWYfSENa10uBrBoyLQqAAOj5eJYIA60.pdf> [дата обращения 18.09.2025г.].
2. Программа развития угольной промышленности на период до 2035 года. https://minenergo.gov.ru/upload/iblock/ee4/ngpuwtmbm0h7iz66p6mzig3h2iinntai/Programa_razvitiya_ugolnoy_promyshlennosti_Rossii_na_period_do_2035_goda_novaya_redakciya.pdf [дата обращения 18.09.2025г.].
3. Проблемы обеспечения высокой производительности очистных забоев в метанообильных шахтах /А.Д. Рубан, В.Б.Артемов, В.С.Забурдяев, Г.С.Забурдяев, Ю.Ф.Руденко-М.:2009, 396 с.
4. Малахов, Ю.В. О разработке технических требований к функциям роботизированной технологии отработки угольных пластов очистными механизированными комплексами / Ю.В. Малахов, С.С. Кубрин // Научное

технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2025. – №11. – С. 93-96.

5. Safety evaluation of roof accident based on IAHP-Fuzzy comprehensive evaluation method. Tian Shuicheng, Shen Zhangjin. Journal of Heilongjiang university of science and technology. 2023 №1. P. 46-50

6. Determination on electrical safety evaluation index weight of coal mine based on improved analytic hierarchy process. Wang Junli. Journal of Heilongjiang university of science and technology. 2023 №1. P. 51-55.

7. Syd S. Peng. Longwall Mining // West Virginia University. 2006 P. 621

8. ГОСТ Р 58200–2018 Оборудование горно-шахтное. Комплексы механизированные забойные. Общие требования безопасности

9. Говорухин, Ю.М. О перспективном направлении повышения эффективности управления газовыделением на выемочных участках угольных шахт / Ю.М. Говорухин, С.С. Кубрин // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2024. – №10.

10. Эффективность работы механизированных очистных забоев с системой управления марко «Цифровая шахта» / М. Ройтер, М. Крах, У. Кисслинг, Ю. Векслер // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2014. – Т. 1, №2. – С. 176-181.

11. Стебнев, А.В. Анализ работы очистных механизированных комплексов в условиях шахт АО «СУЭК-Кузбасс» / А.В. Стебнев, С.Г. Мухорчиков, Д.А. Задков // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017: Сборник научных трудов международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 23–24 марта 2017 года / Научные редакторы В.В. Максarov, В.В. Габов. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2017. – С. 84-89.

12. Очистные комбайны К-1000А - ОАО «Анжеромаш» <https://angera.ru/catalog/ochistnye-kombajny/> [дата обращения 18.09.2025г.].

ПАРАМЕТРЫ ГИДРОМЕХАНИЗИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ ИЗ ШЛАМОХРАНИЛИЩ УГЛЕОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИК С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИДРОЭЛЕВАТОРНЫХ ЗЕМСНАРЯДОВ

Корякин А.А.¹, Федотенко В.С.²

¹ФБУ «ТФГИ по Сибирскому федеральному округу», г. Новосибирск,

²ИПКОН РАН, г. Москва

Основная нагрузка по добыче угля в РФ приходится на Кемеровскую область, доля которой составляет 48% от всего угля, что добывается в России.

Особое внимание потребители уделяет качеству угля, что определило интенсивное строительство обогатительных фабрик в Кузбассе и,

в перспективе, переработка угля будет развиваться опережающими темпами. [1-5]

В шламохранилища Кузбасса уложено более 30 млн. т отходов углеобогащения. Они загрязняют окружающую среду, занимают большие территории и рано или поздно после их заполнения шлам придётся утилизировать. [6-8]

В этой связи исследования по обоснованию технологии и оборудования для безопасной и эффективной разработки угольных шламов, намывтых ранее в шламохранилище, должны базироваться на передовом опыте разработки и перемещения неконсолидированных пород способом гидромеханизации. [9-12]

Анализ технологии и оборудования, которые применяются для разработки шламов из шламохранилищ углеобогажительных фабрик, показал, что они не соответствуют свойствам разрабатываемых пород и малоэффективны. Следовательно, обоснование технологии и технических средств для разработки шламов с целью их утилизации или захоронения, является актуальной научно-практической задачей.

В связи с тем, что основой применяемых технологий является гидромеханизация, причем ее работа, учитывая климатические условия, является сезонной, а процесс обогащения круглогодичным, главным элементом шламового хозяйства является шламохранилище. В нем накапливаются хвосты обогащения за весь холодный период года, а в летний сезон средствами гидромеханизации он должен быть перемещен на карты фильтрации для утилизации. В настоящее время, из-за невыполнения в первую очередь вышеуказанного условия, площадь шламохранилищ практически достигла критических, по экологическим понятиям, значений. Изучив опыт применения гидромеханизации, которая, особенно в Кузбассе, хорошо зарекомендовала себя при проведении гидровскрышных работ, можно сказать, что научных рекомендаций по эффективной и безопасной гидромеханизированной технологии очистки шламохранилищ углеобогажительных фабрик с применением гидроэлеваторного земснаряда выявить не удалось.

Специалистам известно, что намывтые или сильно обводненные породы должны разрабатываться землесосным снарядом, который для большей эффективности может оснащаться специальными средствами: гидрорыхлителем, фрезами и т.п. Применять землесосные снаряды при открытой добыче угля к сожалению, не принято, учитывая сравнительно высокие затраты на их приобретение и сезонность работ.

При этом появились публикации о разработке обводненных запасов песчаногравийных месторождений строительных материалов на карьере

Тучковского комбината строительных материалов (ТКСМ), где успешно эксплуатировался гидроэлеваторный земснаряд УГБ-2М. [13, 14].

Подобные земснаряды для разработки грунтов применялись еще во время строительства ряда Волжских гидротехнических сооружений. [15]. Самостоятельное использование водоструйных насосов сдерживалось из-за их ограниченных возможностей, в первую очередь это сравнительно небольшие расстояния транспортирования, а также невысокий коэффициент полезного действия. На карьере ТКСМ не требовался существенный геодезический подъем и перемещение гидросмеси на значительное расстояние. Как правило, карта намыва строительных материалов находилась в пределах 300 м от забоя земснаряда, а величина геодезической высоты подъема гидросмеси не превышала 5 м.

Опубликованные данные по фактической (статистической) производительности гидроэлеваторного земснаряда УГБ-2М в условиях карьера ТКСМ показали, что при длине пульповода 250 м его производительность по твердому изменялась в диапазоне 17300-18090 м³ в месяц, а при увеличении дальности до 300 м, сокращалась до величины 14100-15200 м³ [16].

В статье изложены результаты исследования технических и технологических решений по обоснованию параметров гидромеханизированной технологии разработки и перемещения хвостов обогащения из шламохранилищ углеобогажительных фабрик с применением гидроэлеваторных земснарядов, которые могут быть эффективно в горнотехнических условиях эксплуатации шламохранилищ углеобогажительных фабрик Кузбасса с учетом физико-механических свойств уложенных там гидросмесей.

Основные результаты, выводы и рекомендации:

1. На основании анализа горнотехнических условий и организации работы водошламового хозяйства углеобогажительных фабрик Кузбасса, в соответствии с разработанным методологическим подходом, произведен расчет параметров гидротранспорта, обеспечивающих устойчивую и безопасную работу земснаряда УГБ-2М, и определен главный параметр технологии – производительность гидрокомплекса по твердому (шламу) при очистке шламохранилищ углеобогажительных фабрик для различных горнотехнических условий его эксплуатации - расстояния транспортирования гидросмеси и геодезической высоты её подъема при различных диаметрах пульповода [17].

2. С целью оперативного планирования, для определения производительности гидроэлеваторного земснаряда УГБ-2М при очистке шламохранилища в производственных условиях, определены упрощенные эмпирические зависимости для прогнозирования изменения часовой

производительности земснаряда по твердому (шламу) для каждого из технически возможных диаметров пульповода при переносе места выпуска гидросмеси и изменении расстояния её перемещения или геодезической высоты подъема.

3. Разработана технология перемещения хвостов обогащения из шламохранилищ углеобогажительных фабрик с применением гидроэлеваторных земснарядов, работающих на трубопровод, который попеременно используется как пульповод и водовод. Установлена система уравнений, определяющая условия функционирования и параметры этой технологии разработки и перемещения хвостов обогащения из шламохранилищ углеобогажительных фабрик с применением гидроэлеваторных земснарядов с учетом физико-механических свойств хвостов углеобогащения.

4. Разработана методика и блок-схема алгоритма расчета параметров системы гидротранспорта и оптимизации параметров технологии разработки и перемещения хвостов обогащения из шламохранилищ углеобогажительных фабрик с применением гидроэлеваторных земснарядов в зависимости от горнотехнических условий эксплуатации [18].

5. Рекомендации по совершенствованию работы водошламового комплекса гидротехнических сооружений ОФ «Черниговская» с применением гидроэлеваторного земснаряда переданы в проектный институт ООО «Сибгеопроект». Годовой экономический эффект при применении для отработки хвостов ОФ «Черниговская» гидроэлеваторным земснарядом УГБ-2М составит более трех миллионов рублей в год.

Список литературы

1. Суфиянов Р.Ш., Катыльмов А.В., Гольберг Г.Ю. Экологический аспект основных направлений повышения эффективности ресурсосбережения в сфере топлива переработки // Кокс и химия. - 2010. - №2. - С. 39-43.

2. Владимир Рашевский: обогащение угля - один из главных приоритетов стратегии СУЭК // Уголь. - 2016. - № 8(1085). - С. 70.

3. Ефимова Н. В. Анализ состояния и основные тенденции добычи, обогащения и экологии потребления энергетических углей в России // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. - 2017. - №1. - С. 83-91.

4. Жолобова Ю.С., Сафронов А.Е., Куший Н.А., Савон Д.Ю. Минимизация воздействия на окружающую среду при применении новых технологий обогащения углей и утилизации отходов добычи // Горный журнал. - 2016. - № 5. - С. 109-112. DOI: 10.17580/gzh.2016.05.18.

5. Харионовский А.А., Данилова М.Ю. О методических подходах к переходу предприятий угольной промышленности на систему нормирования сбросов загрязняющих веществ в водные объекты по технологическим

показателям // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. - 2018. - №10(130). - С. 50-61.

6. Ефимов В.И., Сидоров Р.В., Корчагина Т.В. К вопросу образования отходов производства от предприятий угольной отрасли в Кузбассе // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). -2017. - №1. - С. 85-96.

7. О состоянии и охране окружающей среды Кемеровской области в 2014 г.: доклад Департамента природных ресурсов и экологии Кемеровской области. - Кемерово: Администрация Кемеровской области, 2015.

8. Белокопытов П.И., Сазыкин Г.П. Решение экологических проблем Кузбасса в проектах обогащительных фабриках // ТЭК и ресурсы Кузбасса. - 2003. - №4/13. - С. 17-19.

9. Серегин А.И., Горлов Е.Г. Разработка технологических схем переработки угольных шламов в товарную продукцию // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2008. - №5. - С. 241-244.

10. Горлов Е.Г., Серегин А.И., Ходаков Г.С. Условия реализации шламов угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий в виде суспензионного топлива // Химия твердого топлива. - 2007. - №6. - С. 51-57.

11. Мосилян А.В. Признаки отнесения накопителей гетерофазных отходов к гидротехническим сооружениям // Управление техносферой. - 2021. - Т. 4, № 2. - С. 221-228. DOI: 10.34828/UdSU.2021.30.58.010.

12. Кононенко Е.А., Белоусов К.С. Анализ работы и возможности гидроэлеваторного земснаряда в условиях карьера Тучковского комбината строительных материалов // ГИАБ. - 2009. - №9. - С. 210-214.

13. Бабичев Н.И., Дворовенко А.Е. Конструкция и опыт эксплуатации новых типов гидродобычных установок для разработки обводненных залежей песчано-гравийных смесей. Издательство МГГУ, ГИАБ, Гидромеханизация № 4, М. 2006. С. 135-142.

14. Федотенко В.С., Корякин А.А. Перспективы применения эжекторных земснарядов для очистки шламонакопителей обогащительных фабрик // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2022. - №9. - С. 15-28. DOI: 10.25018/ 0236_1493_2022_9_0_15.

15. Каменев П.Н. Гидроэлеваторы и другие струйные аппараты. Машинностроительное изд-во, М. 1950. (Ленинград). - 348 с.

16. Бекренев С.В., Белоусов К.С. Тучковский комбинат строительных материалов: История, современное состояние и опыт решения производственных задач. // Горный журнал. - 2007, №1, С. 33-35.

17. Корякин А.А. Производительность эжекторного земснаряда УГБ-2м при очистке шламонакопителя обогащительной фабрики // Маркшейдерия и недропользование. - Москва, 2022. - №3. - С. 36-41.

18. Корякин А. А. Обоснование параметров технологии очистки илонакопителей углеобогащительных фабрик гидроэлеваторными земснарядами // Маркшейдерия и недропользование. - Москва, 2023. - №4. - С. 30-36.

ПРИМЕНЕНИЕ БЕНТОПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИЦИИ ПРИ ОКОМКОВАНИИ ПОЛИКОМПОНЕНТНОЙ ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ШИХТЫ

Ветюгов Д.А.^{1,2}, Матвеева Т.Н.¹

¹*ИПКОН РАН, г. Москва,*

²*ООО «Бентонит Хакасии», г. Черногорск*

Применение бентонитополимерных композиций (БПК) в составе шихты является перспективным направлением для производства железорудных окатышей с целью повышения прочностных свойств окатышей [1] и повышения технико-экономических показателей процесса обжига [2].

Наиболее распространенным связующим при производстве окатышей является бентонит [3]. Основной составляющей бентонитовых глин является монтмориллонит. Бентонит представляет собой высокодисперсную глину, способную набухать в присутствии воды и образовывать гель с большим количеством тонкодисперсных частиц, взаимодействующих с частицами железорудного концентрата.

БПК – это объединенная смесь органического полимера и неорганической части (бентонитовой глины) в единый гибридный материал, который обладает повышенной связующей способностью и формирует структуру сырого окатыша, более устойчивую к динамическим и статическим нагрузкам, то есть обладает улучшенными технологическими свойствами и увеличивает функциональные возможности как связующей, так и упрочняющей добавки.

Достоинства данной добавки заключаются в том, что при ее взаимодействии с водой шихты, образуется полимер-бентонитовый гель, который обладает повышенной связующей способностью и формирует структуру сырого окатыша, устойчивую к динамическим и статическим нагрузкам.

Целью проведения работы является определение технологических параметров процесса окомкования для производственного комплекса железорудных окатышей на Череповецком металлургическом комбинате с применением бентоглин различных месторождений ООО «Бентонит Хакасии», бентонитополимерных композиций и смеси трех железорудных концентратов Оленегорского и Ковдорского ГОКов, а также аглоруды Яковлевского ГОКа.

Характеристики железорудных концентратов и их смеси приведены в табл.1.

В ходе испытаний показана принципиальная возможность получения сырых окатышей при окомковании шихты, состоящей из 3 железорудных компонентов.

Таблица 1

Характеристики железорудных концентратов и их смеси

Компонент	Удельная поверхность см ² /г	Радиус капилляра, мкм	Скорость капиллярного всасывания, см/сек
К-т «Оленегорский ГОК»	1596	3,34	0,0055
К-т «Ковдорский ГОК»	1821	2,31	0,0035
Аглоруда «Яковлевский ГОК»	4035	1,58	0,0025
Трехкомпонентная смесь 40%(ОГОК)+20%(КовГОК)+40%(ЯГОК)	2616	1,82	0,003

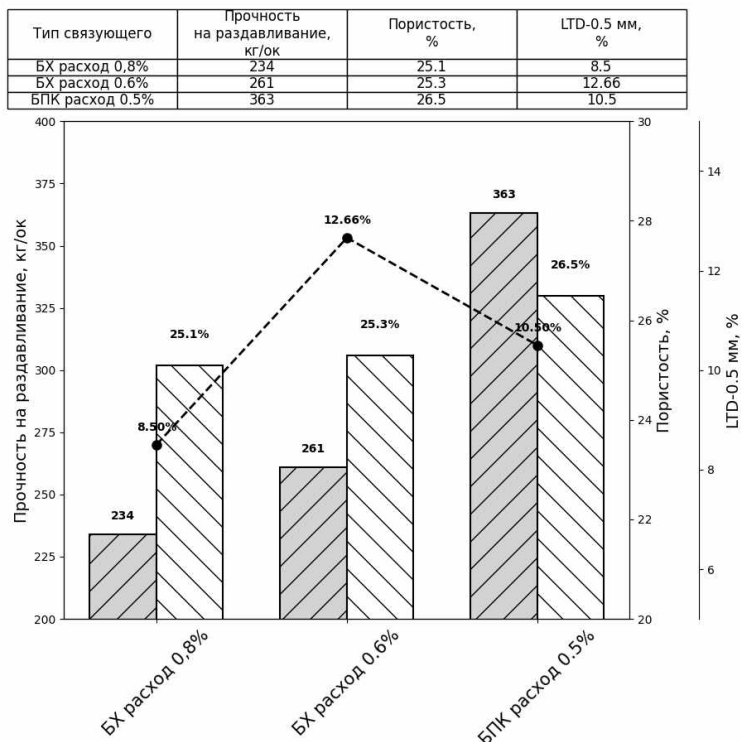


Рисунок 1 - Зависимость характеристик железорудных окатышей от типа и расхода связующего

Зависимость характеристик железорудных окатышей от расхода бентополимерных композиций при проведении испытаний показана на рис. 1. При использовании БПК с расходом 0,5% против бентоглины с расходом 0,6% наблюдается значительное повышение прочности окатышей с 261 до 363 кг/ок (на 39%). Одновременно увеличилась пористость с 25,3 до 26,5% (на 4,74% отн.). Показатель прочности во вращающемся барабане LTD -0,5 мм (%) при снижении расхода бентоглины с 0,8% до 0,6% увеличился с 8,5% до 12,66% (на 4,16% абс.), затем, при применении БПК с расходом 0,5% показатель уменьшился с 12,66% до 10,5% (на 2,16% абс.), что также говорит об увеличении прочности окатышей при использовании БПК.

Анализ результатов, полученных в ходе проведения испытаний по окомкованию шихты, состоящей из 3 железосодержащих компонентов, показал, что добавление в состав шихты концентрата Ковдорского ГОКа в количестве 20% приводит к увеличению времени окомкования, вне зависимости от вида связующего. Увеличивается время образования зародышей, и даже при минимальной добавке воды шихта плохо смачивается, поскольку вся влага остается на поверхности окатышей.

Учитывая полученные результаты испытаний и опыт работы горно-металлургических предприятий, необходимо отметить, что подача повышенного расхода бентонита (1,0-0,8%) в шихту не целесообразна из-за удорожания готовой продукции и снижения качества железорудных окатышей в результате повышенного содержания кремния и более низкого содержания $Fe_{общ.}$ в товарных окатышах [4] [5] [6].

Таким образом, на основании результатов лабораторных испытаний процесса окомкования железорудных концентратов установлено, что применение бентополимерной композиции, состоящей из органического полимера и бентонитовой глины, при расходе 0,5% позволило значительно повысить прочность обожжённых окатышей и их пористость, что положительно скажется на последующих этапах восстановления материала.

Экспериментально доказана возможность получения окатышей из смеси трех железосодержащих компонентов: концентратов Оленегорского и Ковдорского ГОКов, аглоруды Яковлевского ГОКа, что имеет важное технологическое значение для строящейся фабрики окомкования (г. Череповец).

Список литературы

1. Koohestani H., Hasanpoor J., Ghasemi B. Eco-friendly steelmaking: Exploring the potential of plant-based binder Acacia gum for iron ore pelletizing // Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, №11, 2025.

2. Vetyugov D., Matveeva T. Research for Industrial Application of Bentonite-Polymer Material in Ferrous Metallurgy // IntechOpen, 2024. pp. 87-101.

3. Ветюгов Д.А., Русский А.В., Жигарев В.В. Сб. трудов 5 Международной научной школы «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» под ред. Академика РАН К.Н. Трубецкого // Бентонит - минеральное сырье для производства железорудных окатышей. Москва. 2022.

4. Ветюгов Д.А., Матвеева Т.Н. Экспериментальное исследование процесса окомкования доизмельченного железорудного концентрата Стойленского ГОКа с применением новых составов бентополимерных связующих. // Черные металлы, № 3, 2023. С. 4-10.

5. Wang C., Xu C., Liu Z. Effect of organic binders on the activation and properties of indurated magnetite pellets // Int J Miner Metall Mater, No. 28, 2021. pp. 1145-1152.

6. Ma Y., Li Q., Zhang Y., Yang Y., Tang Y., Jiang T. A novel polymer-type binder to decrease bentonite dosage during iron ore pelletizing: Performance and mechanisms // Journal of Materials Research and Technology, No. 27, 2023. pp. 6900-6911.

УДК 622.2

НЕЙРОСЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЯЦИЕЙ ШАХТЫ

До Чи Тхань

*Кафедра электротехники и электроники,
Восточноазиатский технологический университет (EAUT), Вьетнам*

1. Введение

Проблема контроля концентрации опасных газов (CH_4 и CO) в угольных шахтах актуальна для обеспечения безопасности. Разработка автоматизированной системы управления вентиляцией шахт важна для предотвращения аварий. Система должна обеспечивать точный контроль с помощью датчиков и адаптивное управление в нормальных и аварийных условиях. Аэрогазодинамические процессы в шахтных вентиляционных сетях (ШВС) сложны, описываются дифференциальными уравнениями и требуют значительных ресурсов для моделирования. Адаптивные методы управления упрощают математическое описание и повышают эффективность. Интеллектуальное управление, имитирующее человеческое мышление, обладает адаптивностью, живучестью и простым интерфейсом. Цель статьи - оценка нейросетевого метода управления расходом воздуха в ШВС на основе имитационной модели.

2. Имитационная модель участка ШВС

Для построения имитационной модели ШВС в динамическом режиме целесообразно рассмотреть одну из самых распространенных схем проветривания добычного участка [4] с трехсторонним прилеганием произведенного пространства (с прямым ходом добычи) в откатного штрека, лавы и вентиляционного штрека (рис. 1).

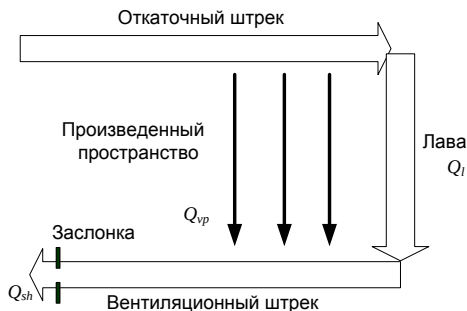


Рисунок 1 - Схема проветривания добычного участка с трехсторонним прилеганием выработанного пространства

Добычный участок как объект управления в целом описывается дифференциальным уравнением [4] переходного аэродинамического процесса формирования потока воздуха Q на входе откатного штрека под действием депрессии H , создаваемой вентиляторами главного проветривания и аэродинамическим сопротивлением собственно участка R и заслонки RR , которая регулирует отток воздуха из вентиляционного штрека (см. рис. 1)

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{k} (H - R \cdot Q \cdot |Q| - RR \cdot Q \cdot |Q|), \quad (1)$$

где $k = \frac{\rho \cdot l}{S}$ - Коэффициент инерционности, который в свою очередь определяется плотностью воздуха ρ , длиной участка l и эквивалентным сечением участка S .

Опасную концентрацию метана в атмосфере добычного участка создают дебиты метана отдельных компонентов участка: выработанного пространства, лавы и вентиляционного штрека. Однако процесс проветривания изменяет концентрации метана в этих компонентах. Поэтому для создания имитационной модели участка ШВС необходимо создать модели, которые описывают динамику дебита и расхода метана в каждом компоненте.

Модель аэрогазовых процессов выработанного пространства должна описывать переходные аэродинамические процессы, происходящие в пространстве, которое остается после выемки угольных пластов и, таким образом, превращается в фильтрационное среду. Движение воздушного потока возникает вследствие пространственно распределенной разницы давлений между штреками, а также присутствующим нелинейным аэродинамическим сопротивлением выработанного пространства. Динамика дебитов метана Q_m из выработанного пространства описывается моделью [4].

$$T_m \frac{dQ_m}{dt} + Q_m = Q_{0m} + \beta \frac{dQ^2}{dt}, \quad (2)$$

где T_m - постоянная времени, Q_{0m} - начальный объем метана в выработанном пространстве, β - удельное аэродинамическое сопротивление выработанного пространства.

Однако зависимость (2) из-за наличия последнего члена суммы является неудобной для построения имитационной модели и поэтому целесообразно будет проинтегрировать обе части и избавиться от дифференциала при Q^2 .

$$Q_m = \frac{1}{T_m} \int (Q_{0m} - Q_m) dt + \frac{\beta}{T_m} Q^2 \quad (3)$$

Метан, выходящий из источников в выработанном пространстве, смешивается с воздушными потоками в штреке, что приводит к образованию на всей длине вентиляционного штрека притока воздушно-метановой смеси Q_{vp} с концентрацией метана C_{vp} . Динамика этого процесса описывается дифференциальным уравнением [4].

$$\frac{dC_{vp}}{dt} = \frac{1}{V_{vp}} (Q_m - (Q_m + Q_{vp}) \cdot C_{vp}) \quad (4)$$

где V_{vp} - объем выработанного пространства.

Лава представляет собой место непосредственной добычи угля. Угол наклона скамьи соответствует углу залегания пласта угля. Модель аэрогазовых процессов лавы должна учитывать нестационарность процесса насыщения атмосферы лавы метаном и может быть представлена следующим дифференциальным уравнением [4].

$$\frac{dC_l}{dt} = \frac{1}{V_l} (Q_{ml} - (Q_l + Q_{ml}) \cdot C_l) \quad (5)$$

V_l - объем лавы, Q_{ml} - объем метана в лаве, Q_l - объем воздуха в лаве, C_l - концентрация метана в атмосфере лавы.

Приток воздушно-метановой смеси Q_{vp} из выработанного пространства и $Q_l + Q_{ml}$ из лавы вызывает в вентиляционном штреке формирование результирующего потока воздушно-метановой смеси Q_{sh} с концентрацией метана C_{sh} . Модель аэрогазовых процессов вентиляционного штрека может быть описана следующим дифференциальным уравнением [6]

$$\frac{dC_{sh}}{dt} = \frac{1}{V_{sh}} (Q_{md} + Q_{mld} - (Q + Q_{mld} + Q_{md}) \cdot C_{sh}) \quad (6)$$

Q_{md} - объем метана, поступающего из выработанного пространства, Q_{mld} - объем метана, поступающего из лавы, V_{sh} - объем вентиляционного штрека.

Используем эту имитационно модель для исследования нейросетевой системы управления, описанной в следующем пункте.

3. Нейросетевая модель управления расходом воздуха

Предварительный анализ показал [6-7], что последовательная схема нейросетевого управления (рис. 2) может обеспечить достаточную эффективность через отсутствие дополнительных звеньев управления, таких как дополнительные контроллеры. В режиме обучения нейронной сети (НС) на ее вход подается обучающая выборка, состоящая из ряда кривых, описывающих динамику аэрогазового среды добычного участка.

Эти кривые получены путем выполнения имитационной модели (1) - (6) в среде MATLAB / Simulink. Структура учебного вектора НС приведена в табл. 1.

Таблица 1

Структура вектора обучения НС

Входные значения НС							Исходное значение НС
C_{vp} (t)	C_l (t)	C_{sh} (t)	ΔC_{vp} (t)	ΔC_l (t)	ΔC_{sh} (t)	t	$Q(t)$
%	%	%	%	%	%	Секунды	м ³ /секунду

Целью обучения является снижение соответствующих концентраций C_{vp} , C_l , C_{sh} в компонентах добычного участка путем изменения расхода воздуха $Q(t)$ к безопасного уровня без выбросов концентраций метана, которые вызваны резкими изменениями расхода воздуха $Q(t)$ при управлении и превышают предельно допустимые концентрации. На

рис.2 процесс обучения, что характеризуется итерационным процессом настройки весовых коэффициентов и порогов нейронов, изображен штриховой стрелкой. В режиме управления НС воспроизводит желаемую кривую расхода воздуха $Q(t)$ при соответствующих значениях входных концентраций C_{vp} , C_l , C_{sh} и их отклонений ΔC_{vp} , ΔC_l , ΔC_{sh} . При этом весовые коэффициенты и пороги нейронов соответствуют тем значениям, которые были получены при обучении, то есть штриховая стрелка на рис. 2 не действует.

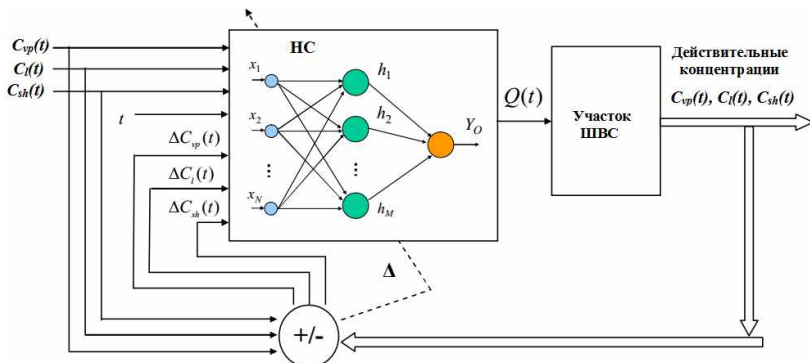


Рисунок 2 - Структура нейросетевой системы управления проветриванием

4. Результаты имитационного моделирования [3]

На основе приведенных выражений (1-6) разработана имитационная модель участка ШВС в среде Simulink пакета MATLAB. Графики переходных аэродинамических процессов изменения значений концентрации метана в выработанном пространстве C_{vp} , в вентиляционном штреке C_{sh} и лаве C_l приведены на рис. 3 (б, в, г соответственно) при подаче на вход имитационной модели управляющего воздействия, изменяющегося по позиционному закону (см. рис. 3а).

Переходный процесс начинается на 20-той секунде с началом подъема заслонки (проветривание). Режим проветривания начинается при значении концентрации метана C_{vp} в выработанном пространстве около 2,5%, что является взрывоопасным.

В момент начала проветривания через нестационарность аэрогазовых процессов и наличие «застойных зон», где накапливается метан, концентрация метана C_{vp} в выработанном пространстве достигает значение около 11%, что более чем в 4 раза превышает допустимую норму. Переходный процесс длится около 10 секунд, при котором значение снижается до допустимого 2,5%. Так же, в момент начала проветривания

концентрация метана в вентиляционном штреке C_{sh} достигает значения около 3,5%, что на 1% больше допустимого. Только концентрация метана в лаве C_l в момент начала проветривания уменьшается до отметки значительно ниже допустимой. Существенная нелинейность переходных аэродинамических процессов в участке ШВС и наличие временной положительной обратной связи приводят к пиковому увеличению контролируемого параметра – концентрации метана при использовании позиционного управляющего влияния (резком поднятии заслонки). В работах [4, 5] показано, что изменение поднятия заслонки по экспоненциальному закону на участке ШВС позволяет избежать пикового значения концентрации метана. Поэтому целесообразно в дальнейшем определить параметры, которые будут описывать процесс формирования экспоненциального управляющего воздействия.

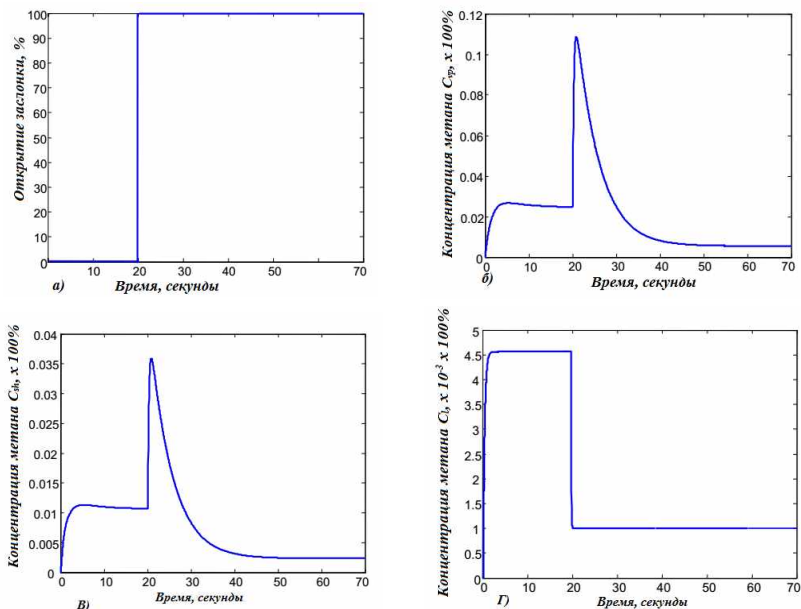


Рисунок 3 - Позиционное управляющее воздействие (а) и переходные процессы изменения концентрации метана C_{vp} в выработанном пространстве (б), концентрации метана C_{sh} в вентиляционном штреке (в) и концентрации метана C_l в лаве (г)

При использовании нейросетевой системы управления объекта ответ не содержит выбросов концентрации метана (рис. 4). Это объясняется нелинейным изменением расхода воздуха, что обеспечивается нелинейным характером связей НС. Использование НС обеспечивает необходимую

динамику расхода воздуха при различных концентрациях метана C_{vp} , C_l , C_{sh} и их отклонений ΔC_{vp} , ΔC_l , ΔC_{sh} .

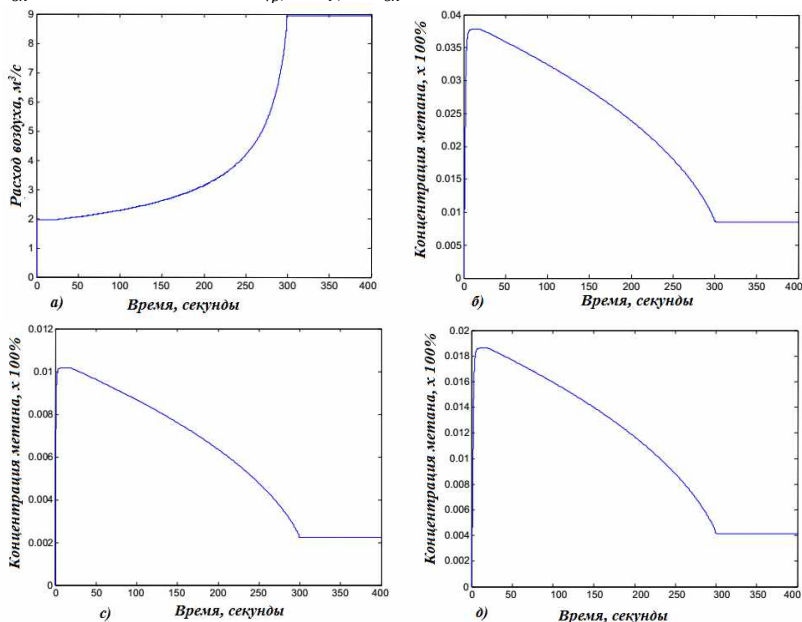


Рисунок 4 - Изменения концентраций метана выработанного пространства (б), лавы (в) и вентиляционного штрека (г) при нейросетевом управлении расходом воздуха (а)

5. Выводы

Для проведения имитационного моделирования нейросетевой системы управления расходом воздуха использована имитационная модель участка шахтной вентиляционной сети, что адекватно отражает динамику аэрогазовых процессов участка [13]. Результаты имитационного моделирования показали лучшие параметры управления по сравнению с широко применяемой позиционной системой управления. Однако нейросетевая модель управления показала значительное увеличение времени переходного процесса. Поэтому следующие исследования целесообразно провести по оптимизации нейросетевой системы управления относительно указанного параметра.

Список литературы

1. Святный В.А., Ефремов С.С. Разработка структуры и операционных алгоритмов микропроцессорной системы безопасного управления проветриванием шахты // Механизация и автоматизация управления. – 1983. - № 4. - С. 31–34.

2. Омату С., Халид М., Юсоф Р. Нейроуправление и его приложения. Пер.с англ. Н.В. Батина; Под. Ред. А.И. Галушкина, В.А. Птичкина. – М.:ИИПРЖ, 2000. – 272 с.

3. Головки В.А. Нейронные сети: обучение, модели и применение. – М.:Радиотехника, 2001. – 256 с.

4. Ушаков В.К. Моделирование случайных потоков дискретной динамики шахтных вентиляционных систем с целью улучшения условий труда // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 9. – С. 206–210.

5. Yi Zheng, Qi Liu, Enhong Chen, Yong Ge, and JL Zhao. Time Series Classification Using Multi-Channels Deep Convolutional Neural Networks. Web-Age Information Management, pages 298–310, 2014.

УДК 622.271:622.7.035:628.52

КОНСОЛИДИРОВАННАЯ ЗАКЛАДКА - КАК УСЛОВИЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РАЗРАБОТКИ СОЛЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Татарников В.И.¹, Цховребов Б.В.²

¹*ИПКОН РАН, ²РАНХИГС, г. Москва*

В мировой практике при подземной разработке соляных месторождений ключевыми факторами являются: устойчивость горного массива, полнота извлечения, сохранность водозащитной толщи, а также экологическая безопасность [1-5]. На фоне накапливаемых отходов обогащения и ужесточающихся требований к экологической эффективности всё большее внимание уделяется системам разработки с закладкой выработанного пространства, позволяющая одновременно стабилизировать массив и утилизировать техногенные материалы [6]. В обзорных и диссертационных работах по соляным рудникам показано, что выбор состава и технологии приготовления закладочных смесей определяется совместным учётом литологии, транспорта и способов укладки, а также экономико-экологических ограничений; в том числе отмечены подходы с использованием галитовых отходов и различных вяжущих, представленные в исследованиях, посвящённых калийным рудникам Прикарпатья и геомеханическим аспектам твёрдеющей закладки. Эти результаты суммируются в работах Гаркушина П.К., Атрощенко В.А. и др., отражающие эволюцию взглядов на «конструктивную» роль закладки в системах разработки соляных месторождений [7]. Также нельзя не отметить сухую закладку. Главный ее недостаток заключается в неспособности формировать монолитный массив, тем самым не имея возможность стабилизировать выработанное пространство от схлопывания камер,

которые могут вызвать образование водопроводящих трещин и нарушения водозащитного толщи.

Концепция консолидированной закладки рассматривает новый вид закладочных смесей на основе солеотходов, набирающих несущую способность за счёт кристаллизационно-консолидационных процессов при контролируемых температурно-влажностных условиях и технологическом уплотнении. Такие смеси формируют монолитный массив без применения традиционных вяжущих, при этом количество затворителя задаётся из условия предела рассолоотдачи, а уплотнение осуществляется механически либо под действием собственного веса. Концептуально важна управляемость структуры и усадки массива за счёт подбора гранулометрии солеотходов и режима укладки, что обеспечивает воспроизводимую прочность и деформационные характеристики без выделения избыточных рассолов.

Лабораторные и опытно-промышленные исследования, выполненные для условий глубокозалегающих соляных месторождения, подтвердили критическое влияние влаготеплового режима и способа уплотнения на набора прочности формируемого закладочного массива. Показано, что регулируемая влажность смеси близкая к оптимальной и постоянство микроклимата в выработках обеспечивают консолидацию без рассолоотдачи, тогда как отклонение во влажность 7–8% относительно целевого уровня вызывает лишь незначительное влаговыделение при соблюдении технологической дисциплины.

Ключевым аргументом в пользу отказа от гидравлической закладки в данных условиях выступают результаты, свидетельствующие о снижении прочностных и деформационных характеристик соляных пород при контакте с насыщенными рассолами, а также о недопустимости взаимодействия пульпы с карналлитсодержащими породами. В лабораторных и натурных испытаниях зарегистрировано разупрочнение силикатных образцов и риск формирования водопроводящих трещин в приконтурной зоне, что прямо противоречит целевой функции поддержания водозащитной толщи. Карналитосодержащие эффекты обоснованно исключают применение гидрозакладки в пользу консолидированной схемы, утилизирующей солеотходы без агрессивного жидкофазного воздействия на почву и целики.

Испытания методом одноосного сжатия, консолидированного закладочного массива, сформированного в опытно-промышленных нишах, показали предел прочности равным 3–3,3 МПа на сроках 60–90 суток с продолжающимся ростом вследствие кристаллизационных процессов, при этом технологическое уплотнение позволяет целенаправленно управлять плотностью и, следовательно, прочностью массива.

С точки зрения промышленной эффективности консолидированная закладка открывает доступ к поэтапной доработке части междуканальных целиков, ранее оставляемых как несущие элементы, что в моделях и натурной проверке обеспечивает кратное увеличение полноты извлечения при сохранении требований к устойчивости массива и целостности водозащитной толщи. Таким образом, закладка перестаёт быть исключительно утилизационной операцией и становится конструктивным элементом системы разработки, интегрированным в геомеханику панели и график очистных работ.

Экологическая значимость подхода проявляется в снижении площадей и рисков, связанных со складированием солеотходов и рассолов на поверхности, а также в минимизации оседаний и деформаций под охраняемыми объектами за счёт равномерной передачи нагрузок и отсутствия фильтрации агрессивных растворов к карналлитным нижележащим пластам. Дальнейшая цифровизация процесса через мониторинг состава, плотности и температурно-влажностных параметров смеси в реальном времени повышает воспроизводимость и позволяет оперативно корректировать технологические режимы, что напрямую влияет на промышленную и экологическую безопасность шахтных работ.

В совокупности полученные результаты подтверждают, что консолидированная закладка на основе солеотходов при правильно заданных параметрах приготовления, транспортирования и укладки является достаточным условием для достижения повышения полноты извлечения соляных месторождений, а также экологической безопасности при разработке соляных месторождений.

Список литературы

1. Татарников, В.И. Применение технологий разработки месторождений калийных солей с управляемым воздействием на формируемый закладочный массив / В.И. Татарников // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр: материалы 6 конференции МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ академика РАН К.Н.Трубецкого, посвященная 300-летию Российской академии наук, Москва, 17–21 июня 2024 года. – Москва: ИПКОН РАН, 2024. – С. 264-266. – EDN GQLAXG.
2. Backfill Technologies and Designs for Deep-Level Sylvinitic Mining / M.V. Ryl'nikova, R.V. Berger, I.V. Yakovlev [et al.] // Journal of Mining Science. – 2024. – Vol. 60, No. 2. – P. 332-340. – DOI 10.1134/S1062739124020145. – EDN IYZTKZ.
3. Развитие научно-методических основ технологий закладки выработанного пространства с учетом специфики горно-геологических и горно-технических условий освоения соляных месторождений / М.В. Рыльникова, Р.В. Бергер, П.О. Зубков, В.И. Татарников // Рациональное освоение недр. –

2024. – № 1(75). – С. 36-44. – DOI 10.26121/RON.2024.37.79.003. – EDN IJDDNW.

4. Концепция устойчивого развития горнопромышленного региона Кабардино-Балкарии на основе использования хвостов обогащения Тырнаузской фабрики в закладке выработанного пространства / М.В. Рыльникова, Р.К. Джаппуев, М.В. Цупкина, О.З. Габараев // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024. – Т. 16, № 1(59). – С. 181-196. – DOI 10.21177/1998-4502-2024-16-1-181-196. – EDN ПУТWQ.

5. Верхоланцева Т.В., Дягилев Р.А. Изучение влияния закладочных работ на сейсмический режим калийных рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 12. – С. 222–224.

6. Татарников, В.И. Влияние добавок отходов переработки руд фосфорита на механические характеристики консолидирующегося закладочного массива при освоении Гремячинского месторождения / В.И. Татарников // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых: Сборник материалов, Москва, 23–27 октября 2023 года. – Москва: Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 2023. – С. 191-194. – EDN CZIPIG.

7. Гаркушин, Павел Кириллович. Исследования и выбор составов твердеющей закладки для калийных рудников Прикарпатья. Кандидатская диссертация. ЛГИ, Ленинград, 1972.

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ПРИ РАБОТЕ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ МАШИН С ДВИГАТЕЛЕМ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Белехов П.А.

*Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург*

Разработка месторождений полезных ископаемых подземным способом предусматривает использование самоходного транспортного оборудования в целях транспортировки руды или породы, проходки горных выработок, а также перевозки людей. Большую часть такого оборудования в настоящее время составляют машины с дизельными двигателями внутреннего сгорания (ДВС). В результате неполного сгорания топлива в атмосферу горной выработки выделяются вредные для здоровья человека вещества. Их объём зависит от множества факторов [1]. Например, на величину выбросов влияют степень эффективности газоочистки, качество топлива, режим нагрузки на двигатель, технического состояние машины и двигателя.

Монооксид углерода и оксиды азота являются одними из наиболее опасных для человека веществ, выделяемых с выхлопными газами дизельной техники с ДВС. Помимо этих компонентов также в атмосферу выбрасываются сажа, альдегиды, оксиды серы и сероводород.

Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности Приказ Ростехнадзора № 505 от 08.12.2020 регулируют ПДК вредных компонентов выхлопных газов в рудничном воздухе, а также устанавливают минимальное содержание кислорода в области рабочей зоны – 20% по объёму (п. 372). Максимальные допустимые величины для монооксида углерода и оксидов азота (в пересчёте на диоксид азота), согласно этому документу, составляют 20 мг/м^3 и 5 мг/м^3 соответственно [2].

С целью поддержания необходимых уровней ПДК вредных компонентов, а также требуемого объёмного содержания кислорода в воздухе рабочей зоны в горную выработку подаётся определённое количество свежего воздуха, обеспечивающее нормативную концентрацию вышеперечисленных загрязняющих веществ в рабочей зоне. В качестве основного показателя, характеризующего объём свежего воздуха принимается его расход, приведенный к установленной мощности двигателя

эксплуатируемого горнотранспортного оборудования с ДВС: Q ($\text{м}^3/\text{мин}/\text{л.с.}$) [3].

Для установления этой величины используется комплекс экспериментальных и теоретических исследований. Первые направлены на определение характеристик выбросов загрязняющих веществ для конкретного горнотранспортного в зависимости от режима работы ДВС: расход выхлопных газов, их температура, содержание в них CO и NO_2 , а также концентрация загрязняющих веществ в рабочей зоне – в воздухе, окружающем водителя машины. Вместе с тем, использование результатов экспериментальных исследований для анализа влияния выбросов на концентрацию загрязняющих веществ в воздухе рабочей зоны ограничено геометрическими размерами выработки, где выполнялись инструментальные замеры, в частности сечения выработки. Вариация сечения выработки при одинаковом объеме выбросов может привести и к изменению концентраций загрязняющих веществ в воздухе рабочей зоны.

Для определения влияния площади сечения горной выработки на эффективность проветривания, с учетом полученных экспериментально исходными данными, были осуществлены теоретические исследования, основанные на математическом компьютерном моделировании концентраций полей CO и NO_2 , образующихся в воздушном пространстве горной выработки.

В качестве модели была выбрана тупиковая горная выработка, с работающим на отставании 15 м от забоя дизельным транспортным средством (86 л.с.) с двигателем внутреннего сгорания [4, 5]. Параметры рассчитываемых сеток моделей (количество ячеек и узлов) в зависимости от поставленной задачи представлены на рис 1.

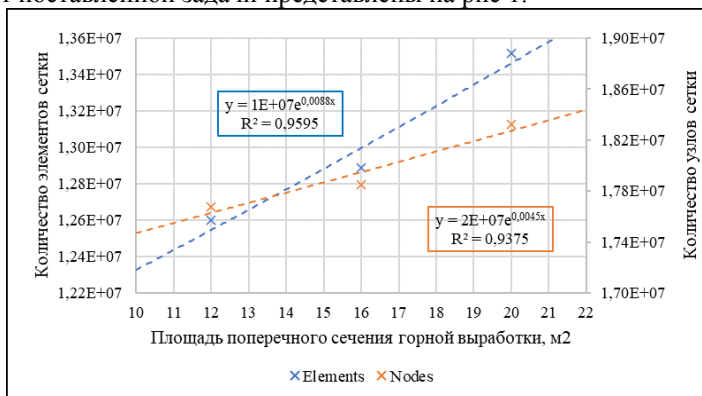


Рисунок 1 - Зависимость общего количества ячеек сетки от площади поперечного сечения моделируемого сценария

Исследовались тупиковые горные выработки с поперечными сечениями 12, 16 и 20 м². В моделировании в качестве анализа результатов учитывалась не вся поперечная площадь горной выработки, а только её часть – зона дыхания, которая по сути являлась областью, в пределах которой пребывает рабочий персонал.

Сравнение осуществлялось при равных нагрузках на двигатель и подаваемому расходу свежего воздуха, а также неизменным расстоянием от конца вентиляционного става до забойной части подземной горной выработки.

По результатам моделирования были сделаны следующие выводы:

При увеличении площади поперечного сечения горной выработки происходит уменьшение скорости движения воздушного потока и как следствие уменьшение коэффициента турбулентной диффузии;

С уменьшением площади поперечного сечения коэффициент турбулентной диффузии увеличивается за счёт повышенных турбулентных пульсаций, скоростей воздушных потоков в сравнительно ограниченном пространстве;

Значения концентраций вредных компонентов выхлопных газов увеличиваются в рассматриваемых поперечных сечениях при увеличении площади горной выработки. Постепенное повышение концентраций свидетельствует об остывании выхлопных газов, уменьшении скорости движения воздуха, и оседании концентрационных полей вредных газов в область дыхания.

Список литературы

1. Марчук, Н.А. Анализ выбросов загрязняющих веществ различными источниками / Н.А. Марчук, В.А. Таланова, А.Л. Куленцан // *Modern Science*. – 2022. – № 2-1. – С. 35-39. – EDN IHAOGA.
2. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. Приказ от 8 декабря 2020 года № 505. «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности Инструкция по аэрологической безопасности угольных шахт» // п. 181.
3. Lesin A. V. et al. A mathematical model of the dynamic viscosity dependence of motor oils on temperature, soot concentration, and its morphology // *Fine Chemical Technologies*. – 2025. – Т. 19. – №6. – С. 485-496. DOI: 10.32362/2410-6593-2024-19-6-485-496.
4. Seregin, A.S., Akhtyamov, K.D., Fazylov, I.R., Belekhev, P.A. (2025). Influence of ventilation pipe location on airing efficiency in blind drift during operation of machines with internal combustion engines. *Gornyi Zhurnal*, 2025(5), 66-72. <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.05.09>.
5. Zeraati-Rezaei S. et al. Size-resolved physico-chemical characterization of diesel exhaust particles and efficiency of exhaust aftertreatment // *Atmospheric Environment*. – 2020. – Т. 222. – С. 117021. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.117021.

ОБ ОСОБЕННОСТИ КОРОТКОЗАМЕДЛЕННОГО ВЗРЫВАНИЯ, КОТОРАЯ МОЖЕТ ПРИВОДИТЬ К УСИЛЕНИЮ ВОЗДУШНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ И ПОВЫШЕННОМУ ПЫЛЕОБРАЗОВАНИЮ

Гаврюшова В.Д., Комиссаров П.В., Басакина С.С.

ФИЦ ХФ РАН, г. Москва

Многорядное короткозамедленное взрывание (КЗВ) в горнодобывающей промышленности применяется по нескольким причинам: для уменьшения сейсмического действия взрыва, ослабления воздушных ударных волн (ВУВ), повышения эффективности дробления породы, а также для снижения пылеобразования. Однако даже при КЗВ, образующиеся ВУВ могут взаимодействовать друг с другом. В результате появляются локальные области повышенных параметров ВУВ (импульса и давления). В конечном итоге это приводит к усилению фугасного действия взрыва и увеличению пылеобразования. Известны лишь считанные работы, в которых исследовано совместное действие ВУВ от распределенных источников. При этом отсутствует понимание связи между временами задержек инициирования нескольких зарядов с импульсом ВУВ в зависимости от расстояния до заряда.

С целью определения влияния задержек инициирования на давление и импульс ВУВ в группе зарядов было проведено численное моделирование в программе Ansys Autodyn в трехмерной постановке. Рассматривался взрыв пяти приподнятых цилиндрических зарядов с отношениями длины к диаметру $l/d=4$ и массами по 3.5 кг. Заряды размещались равномерно в области с размерами 6×6 м с высотой 1 м. Были исследованы случаи, как одновременного взрыва зарядов, так и короткозамедленного, с задержками от 0.1 до 5 мс. В результате серии расчетов были построены поля импульсов и максимальных давлений ВУВ. Было установлено, что при задержке инициирования более 2 мс, импульс распределяется равномернее в сравнении с меньшими задержками. Определенные в расчетах длительности и площади воздействия импульсов ВУВ на поверхность оказались выше для КЗВ, чем в случае одновременного взрыва.

Таким образом, при проведении буровзрывных работ необходимо подбирать оптимальные интервалы инициирования зарядов, которые зависят от их взаиморасположения и формы. Это позволит снизить вероятность нежелательных последствий в виде повышенных пылеобразования и фугасного действия взрыва.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Леденёва И.П.

НИТУ МИСИС, г. Москва

Аннотация

Работа посвящена проблеме управления газовыделением в угольных шахтах, которая усложняется из-за роста глубины разработки, высокой газоносности пластов и устаревших методов прогнозирования. Отмечены недостатки традиционных подходов, приводящие к значительным погрешностям (до 30%), подчеркивается необходимость разработки новых методик на основе математического моделирования и актуальных эмпирических данных.

Введение

Эффективное управление газовыделением в угольных шахтах остается одной из ключевых проблем горной промышленности. В процессе добычи угля происходит разрушение массива, сопровождающееся выделением метана и образованием угольной пыли [1], что создает серьезные риски для безопасности и требует постоянного совершенствования методов контроля. Особое внимание уделяется дегазации, поскольку традиционные системы вентиляции уже не справляются с растущими нагрузками. Усложнение горно-геологических условий, увеличение глубины разработки, рост нагрузки и высокая газоносность пластов приводят к росту газообильности, что ограничивает производительность очистных работ [2]-[4].

Существующие методы прогнозирования газовыделения, основанные на данных геологоразведки, обладают существенными недостатками. Погрешность оценок может достигать 30%, а при колебаниях газоносности пласта от 7 до 13 м³/т качественное проектирование систем управления газовыделением становится практически невозможным [5]-[6]. Это увеличивает технико-экономические и аэрологические риски, особенно с учетом того, что действующие методики, разработанные в 1989 году, рассчитаны на суточную добычу до 4000 тонн, тогда как современные шахты работают с нагрузками в 30 тысяч тонн и более [7]. В связи с этим необходима принципиально новая методика прогнозирования метанообильности, учитывающая современные условия и основанная на математическом моделировании и актуальных эмпирических данных [8]-[11].

Обсуждение результатов

Важным аспектом изучения газовыделения является анализ динамики пластового давления метана. На рис. 1 представлены кривые, отражающие изменение давления в зависимости от расстояния до забоя для различных марок угля с разными константами сорбции Ленгмюра. Различия в динамике изменения давления обусловлены сорбционно-кинетическими свойствами угля, что подтверждает необходимость учета этих параметров при моделировании.

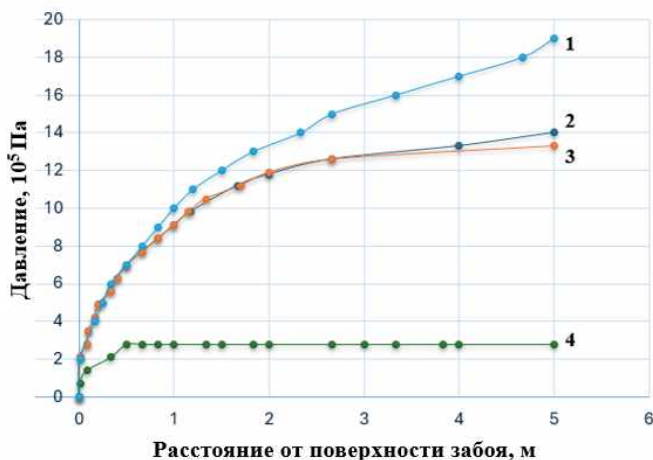


Рисунок 1 - Зависимость пластового давления метана от расстояния поверхности забоя:

1) $a=2,6 \times 10^{-6}$, $b=14,3$, $P_{nl}=2,107 \times 10^6$; 2) $a=0,53 \times 10^{-6}$, $b=30,09$, $P_{nl}=1,352 \times 10^6$; 3) $a=0,207 \times 10^{-6}$, $b=60$, $P_{nl}=1,308 \times 10^6$; 4) $a=1,548 \times 10^{-6}$, $b=68,7$, $P_{nl}=2,367 \times 10^5$

Заключение

Исследование динамики давления метана позволяет более точно оценивать свойства угольных пластов, определять коэффициенты проницаемости и другие ключевые характеристики. Это, в свою очередь, способствует корректному прогнозу газообильности и разработке эффективных методов управления газовыделением, снижению затрат и минимизации экологических рисков, связанных с выбросами метана в атмосферу. Таким образом, совершенствование методик прогнозирования и контроля газовыделения остается важной задачей, от решения которой зависит безопасность и экономическая эффективность угледобычи.

Благодарности. Исследования проведены в НИТУ МИСИС при поддержке Российского научного фонда, проект № 23–19–00398.

Список литературы

1. Сукманов, А.И. Разработка методики оценки состояния оборудования очистных комплексов горных предприятий / А.И. Сукманов, В.В. Зотов, С. С. Кубрин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – №10. – С. 260-264. – EDN PZEMPD.
2. Каледина, Н.О. Роль системы метанобезопасности в угольной промышленности / Н.О. Каледина, Н.Ю. Карпова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – №S7. – С. 382–388. – EDN ONBXCL.
3. Баловцев, С.В. Управление аэрологическими рисками при проектировании, эксплуатации, ликвидации и консервации угольных шахт / С.В. Баловцев, О.В. Скопинцева, К.С. Коликов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – №6. – С. 85–94. – DOI 10.25018/0236-1493-2020-6-0-85-94. – EDN FYXQHM.
4. Леденева, И.П. К вопросу о моделировании газовыделения на выемочном участке угольной шахты / И.П. Леденева, В.В. Зотов, К.С. Коликов // Труды РАНМИ. – 2024. – № 3-1(41). – С. 91-100. – DOI 10.24412/2519-2418-2024-341-91-100. – EDN DXYYIX.
5. Эттингер И.Л., Шульман Н.В. Распределение метана в порых ископаемых углей— М.: Издательство «Наука», — 1975. —111 с.
6. Кузнецов С.В., Кригман Р.Н. Природная проницаемость угольных пластов и методы ее определения/ М.: Наука, 1978. – 122 с.
7. Артемьев, В.Б. АО «СУЭК». Подземные горные работы, динамика развития / В.Б. Артемьев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – №S48. – С. 13–22. – DOI 10.25018/0236-1493-2018-11-48-13-22. – EDN YSTIMH.
8. Сластунов С.В., Каркашадзе Г.Г., Коликов К.С., Ермак Г.П. Методика расчета допустимой нагрузки на очистной угольный забой по газовому фактору // ФТПРПИ. 2013. - №6. - С. 53-59.
9. Сластунов С.В., Каркашадзе Г.Г., Коликов К.С. Программа расчета предельно допустимой нагрузки на очистной забой угольной шахты по газовому фактору. Св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614769 дата регистрации 23 июня 2015г.
10. К вопросу о предельной скорости подачи очистного комбайна с учетом параметров газовыделения угольного пласта / В.В. Зотов, К.С. Коликов, И.П. Гусева [и др.] // Уголь. – 2024. – №6(1181). – С. 96–100. – DOI 10.18796/0041-5790-2024-6-96-100. – EDN QSEFCV.
11. Коликов, К.С. О необходимости совершенствования геоинформационного обеспечения отработки угольных пластов / К.С. Коликов, И.П. Гусева, Н.В. Ледяев // Инновационные перспективы Донбасса: материалы 10-й Международной научно-практической конференции, Донецк, 28–30 мая 2024 года. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2024. – С. 13-15. – EDN VJVSQG.

ВДЫХАЕМАЯ ПЫЛЬ В КЕРАМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Шоджан Барджон С.¹, Родионов В.А.¹, Яздани М.²

¹*Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург,*

²*Технологический университет Исфахана, Исфахан, Иран*

Аннотация. В данном исследовании для определения объёма отбора проб применён метод аналогичных групп экспозиции (SEGs). Отбор проб воздуха в дыхательной зоне осуществлялся по методике NIOSH 7602. Средний уровень воздействия респираторной пыли варьировал от 0,28 до 20,13 мг/м³. В большинстве профессиональных групп, за исключением печного участка, линии глазурирования и упаковки, средние концентрации пыли превышали норматив АСГИН (3 мг/м³). Результаты исследования помогут руководителям предприятий керамической отрасли оценить риски и повысить эффективность инженерных мер и средств индивидуальной защиты для охраны здоровья работников.

Введение

Работники промышленных предприятий подвергаются воздействию опасной пыли, которая классифицируется на вдыхаемую, торакальную и респираторную фракции по размеру частиц. Воздействие пыли характерно для многих отраслей и связано с развитием респираторных заболеваний. В керамической промышленности основным риском является кристаллический диоксид кремния — фактор развития силикоза, рака лёгких и других заболеваний дыхательных путей. Цель исследования — количественная оценка воздействия респираторной пыли на работников керамической отрасли.

Основная часть

Исследование проведено на предприятиях керамической промышленности провинции Йезд (Иран), занимающей около 4,5% территории страны. Керамическая отрасль является ведущей по численности занятых и экономическому развитию региона. В провинции насчитывается свыше 189 керамических предприятий, из которых 86 — крупные. Численность работников отрасли оценивается примерно в 300 тысяч человек, а среднегодовой рост производства в 2013–2019 гг. составил 36%.

Для оценки воздействия респираторной пыли применён метод отбора проб из дыхательной зоны работников с использованием метода аналогичных групп экспозиции (SEGs). Отбор проб осуществлялся с помощью алюминиевых циклонов SKC, оснащённых каскадами SKC SureSeal с ПВХ-фильтрами (37 мм, 5,0 мкм пористость) (рис.).

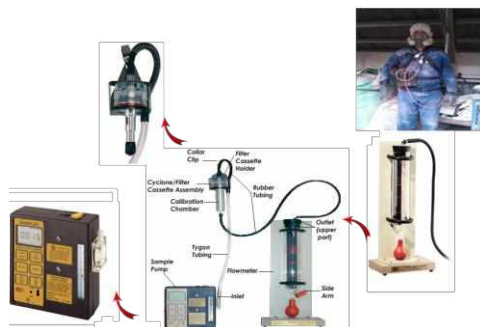


Рисунок - Оборудование, используемое для измерения концентрации респираторной пыли в керамической промышленности

В период экспозиции фильтры размещались в дыхательных зонах добровольцев и подключались к пробоотборному насосу SKC AirChek 3000 с расходом воздуха 2,5 л/мин в течение четырёх часов. Масса собранной пыли определялась на прецизионных весах путём взвешивания фильтров до и после отбора проб. Концентрация респираторной пыли рассчитывалась по формуле:

$$C = \frac{(W_2 - W_1) - (b_2 - b_1)}{V} \times 10^3 \quad (1)$$

где: **C** — концентрация респираторной пыли (мг/м³); **W₁** — масса фильтра до отбора проб (мг); **W₂** — масса фильтра после отбора проб (мг); **b₁** — масса контрольного образца до отбора проб (мг); **b₂** — масса контрольного образца после отбора проб (мг); **V** — объём отобранного воздуха, л.

Для калибровки пробоотборного насоса применялся метод мыльных пузырьков. Он основан на измерении времени прохождения мыльного пузырька через градуированную прозрачную трубку с известным объёмом. По этим данным вычисляют фактическую скорость воздушного потока, после чего регулируют насос для обеспечения заданного расхода.

Результаты измерений респираторной пыли с использованием метода SEG показали общую концентрацию 820,03 мг/м³. Максимальное значение — 14,97 мг/м³ (оператор распылительного шарового помола), минимальное — 0,28 мг/м³ (оператор упаковочного участка). При анализе средних значений концентрации респираторной пыли профессиональные группы располагались в порядке убывания следующим образом: оператор распылительного шарового помола (7.19 мг/м³) > дробильщик (6.99 мг/м³) > подготовка керамического сырья (5.10 мг/м³) > глазурование (3.95 мг/м³) > прессовщик (3.86 мг/м³) > оператор калибровки (3.57 мг/м³) > водитель погрузчика 3.55 мг/м³ > электрик

(3.32 mg/m³)> механик (3.06 mg/m³)> упаковщик (2.87 mg/m³)> печной участок (2.73 mg/m³)> линия глазурования (2.55 mg/m³). Средняя концентрация респираторной пыли во всех профессиональных группах составила 4,06 мг/м³. В большинстве групп, кроме печного участка, линии глазурования и упаковочного отдела, средние значения превышали норматив ACGIH (3 мг/м³).

Результаты t-теста выявили статистически значимое превышение концентраций респираторной пыли над нормативом ACGIH в группах подготовки керамического сырья, дробления камня, распылительного шарового помола, прессовки, глазурования и линии глазурования. В каждой группе не менее 34% проб превышали норму, при этом максимальная частота превышений была у операторов распылительного шарового помола и подготовки сырья. Наибольшая средняя концентрация и коэффициент вариации отмечены у дробильщиков.

Заключение

Средние концентрации респираторной пыли во всех профессиональных группах, кроме работников печного участка, линии глазурования и упаковочного отдела, превышали нормативы стандарта ACGIH. Результаты исследования могут служить основой для регуляторов и руководителей предприятий керамической отрасли при разработке и корректировке программ снижения пылевого воздействия и минимизации рисков для здоровья работников. Мониторинг уровней респираторной пыли и оценка её влияния на персонал способствуют повышению эффективности охраны труда и улучшению условий работы.

Список литературы

1. Амбашта С.К., Хариташ А.К. Выбросы респираторной пыли при добыче камня, потенциальные риски для здоровья и методы управления // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. С. 1–8.
2. Анлимах Ф., Гопалдасани В., МакФейл К., Дэвис Б. Систематический обзор эффективности мер контроля пыли для снижения профессионального воздействия // *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Т. 30, № 19. С. 54407–54428.
3. Кэри Дж. П.С., Кэри А.Г. Промышленный рост и планирование развития в Иране // *The Middle East Journal*. 1975. С. 1–15.
4. Чаргонья М., Мектерович Д., Журга П., Равлић-Гулан Й., Радович И.Б., Жаухар Г. Накопление тяжёлых металлов в биологических тканях работников металлообрабатывающих мастерских // *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Т. 30, № 13. С. 36794–36806.
5. Чамдимба Г., Вунайн Э., Маони М. Оценка воздействия частиц пыли на атмосферный воздух и его влияние на работников двух гранитных карьерных шахт в Ндзули, Южный Малави // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2023. Т. 195, № 9. Статья 1069.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕГАЗАЦИИ И ПРОВЕТРИВАНИЯ ВЫЕМОЧНЫХ УЧАСТКОВ

Кобылкин А.С.

ИПКОН РАН, г. Москва

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы вентиляции и дегазации выемочного участка угольной шахты. Представлены результаты моделирования совместной работы дегазации и проветривания. Отмечена различная степень влияния дегазационных скважин, пробуренных в выработанное пространство, на воздушный поток в лаве.

Введение

Оптимальные параметры вентиляции и дегазации позволят обеспечить снижение метановыделения на выемочном участке угольной шахты [1, 2, 3]. В качестве инструмента, позволяющего осуществить подбор таких параметров, предлагается использовать моделирование [4, 5]. В качестве основы компьютерной модели была разработана геометрия выемочного участка (рис. 1). Анализ данных вентиляции и дегазации позволил внести в компьютерную модель начальные и граничные условия.

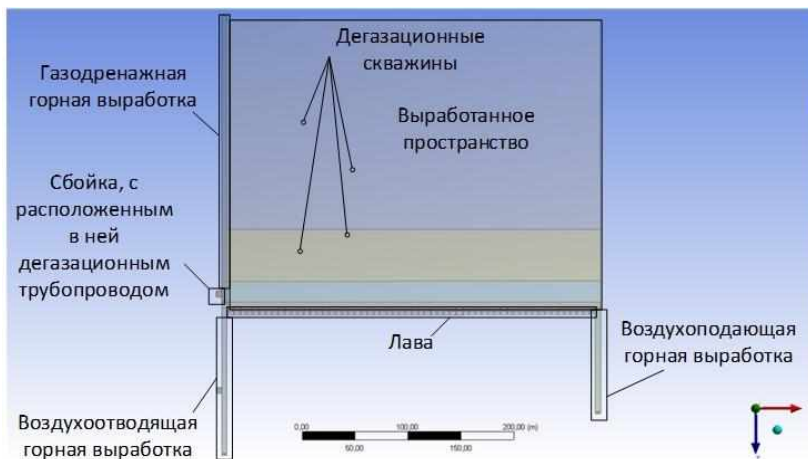


Рисунок 1 – Геометрическая модель выемочного участка

Доменам, представляющим выработанное пространство, были заданы характеристик пористости и проницаемости, ввиду их возможности пропускать часть воздуха, идущего по лаве, через себя. Также в модель были внесены параметры характеризующие воздушный поток: поступающий на выемочный участок – давление воздуха на входе в модель; исходящий из выемочного участка и выработанного пространства через дегазационные скважины, сбойку и газодренажную выработку – давление воздуха на выходе из модели.

Обсуждение результатов

В результате моделирования были получены данные по распределению направления движения (давления) воздуха в горных выработках, выработанном пространстве и дегазационных скважинах. Установлено, что в области сопряжения лавы с воздухоотводящей горной выработкой образуется зона рециркуляции (рис. 2), которая может способствовать накоплению метана.

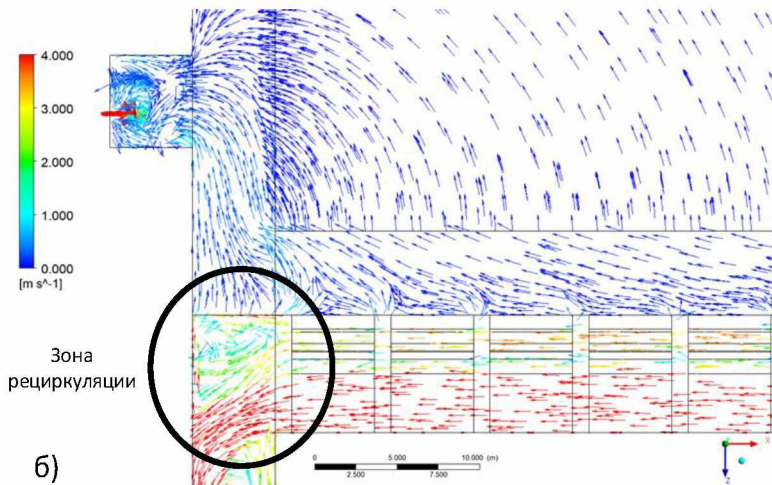


Рисунок 2 – Вектора скорости движения воздуха в модели, приближен участок сопряжения лавы и воздухоотводящей горной выработкой

Также было установлено, что работа дегазационных скважин, пробуренных с поверхности имеет разную степень влияния на газовоздушные потоки в выработанном пространстве. Скважины, отводящие метан из выработанного пространства, формируют газовоздушный поток в направлении от лавы. Наиболее эффективно в этом процессе участвуют скважины находящиеся ближе к лаве, находящиеся же на удалении оказывают меньшее влияние перемещение газовоздушного потока.

Заключение

Дегазационные скважины, пробуренные с поверхности, имеют разную эффективность. Влияние на газовоздушные потоки в выработанном пространстве зависит от их расстояния до забоя. Все скважины отводят метан из выработанного пространства, однако в формировании газовоздушного потока, направленного от лавы, участвуют скважины находящиеся ближе к ней, находящиеся же на удалении оказывают незначительное влияние на данный процесс.

Список литературы

1. Balovtsev, S.V. Analysis of accidents and development trends in aerological safety of coal mines / S.V. Balovtsev, O.V. Skopintseva, E.Yu. Kulikova // Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). – 2024. – №12. – Р. 135-149. – DOI 10.25018/0236_1493_2024_12_0_135.
2. Левин, Л.Ю. Расчет аэродинамического сопротивления проектируемых шахтных стволов с использованием методов вычислительной гидродинамики / Л.Ю. Левин, С.В. Мальцев, М.А. Семин, Е.В. Колесов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2025. – №5. – С. 100-117. – DOI 10.25018/0236_1493_2025_5_0_100.
3. Кулик, А.И. Особенности моделирования аэрогазодинамики очистного забоя угольной шахты / А.И. Кулик, А.Н. Тимченко, В.Н. Костеренко, С.С. Кобылкин // Уголь. – 2023. – №3(1165). – С. 75-78. – DOI 10.18796/0041-5790-2023-3-75-78.
4. Леденева, И.П. К вопросу о моделировании газовыделения на выемочном участке угольной шахты / И.П. Леденева, В.В. Зотов, К.С. Коликов // Труды РАНИМИ. – 2024. – №3-1(41). – С. 91-100. – DOI 10.24412/2519-2418-2024-341-91-100.
5. Попов, М.Д. Анализ воздухораспределения в наклонной горной выработке при наличии интенсивного источника тепловыделения / М.Д. Попов, М.А. Семин, Л.Ю. Левин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2024. – №4. – С. 140-151. – DOI 10.15372/FTPRPI20240412.

УДК 622.807

ЗАВИСИМОСТЬ ОБЪЕМА ПЫЛЕОТЛОЖЕНИЯ ОТ СВОЙСТВ УГЛЯ И ЕГО ПЕТРОГРАФИЧЕСКОГО СОСТАВА

Харченко А.В., Дубинский М.Л.

ИПКОН РАН, г. Москва

Аннотация. В статье приведен анализ факторов пылеобразования при добычи угля подземным способом. Показано, что выделение пыли

связано как с влажностью и трещиноватостью угля, так и с петрографическим составом и стадией метаморфизма углей.

Наращивание интенсивности ведения горных работ приводит к обострению и так сложной ситуации по газовому и пылевому фактору [1, 2].

При добычи угля как взрывным разрушением, так и при резании горной породы механическим инструментом, происходит образование угольной пыли, т.е. образуется измельченный материал, который характеризуется распределением частиц по крупности.

Количество образовавшейся пыли зависит как от вида техногенного воздействия, так и от свойств угля.

При разрушении угольного массива на пылеобразование влияют такие характеристики угля как, петрографический состав, трещиноватость, влажность и другие, которые встречаются в углях в разных сочетаниях.

При добыче угля механизированным способом наиболее важной физико-механической характеристикой углей является их прочность. Под этим термином объединяются различные виды прочности: дробимость, сопротивление сжатию и хрупкость. Одним из простых способов определения прочности, является разрушение кусков угля падающим грузом. После этого определяют гранулометрический состав продуктов дробления и выход пылевидных фракций рассевом. Поэтому получается, что существует обратная связь между прочностью угля и его пылеобразованием, и те факторы, от которых зависит прочность углей, от этих же факторов зависит и его пылеобразование [3, 4].

Также на пылеобразующую способность углей влияет их петрографический состав.

Оценить влияние петрографического состава на пылеобразующую способность можно косвенно по выходу тонких фракций углей средней стадии метаморфизма с учетом типа трещиноватости угля в пластовых пробах [5]. Проведенные исследования (табл. 1) показали, что зависимость выхода мелких фракций угля (менее 6 мм) от петрографического состава становится более явной.

Таблица 1

Влияние петрографического состава на гранулометрический состав углей средних стадий метаморфизма (по пластово-эксплуатационным пробам)

№ пробы	Содержание компонентов группы фюзинитов	Выход (%) класса крупности, мм							Преобладающий тип трещин
		>150	100-150	50-100	25-50	13-25	6-13	0-6	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	10	3	3	6	9	11	25	43	Эндогенный

продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	28	7	7	9	15	20	14	28	То же
3	54	9	14	23	28	11	9	6	—
4	30	1	-	3	6	8	24	58	Экзоген- ный
5	38	4	2	5	9	9	18	53	То же
6	45	—	3	9	15	23	17	33	—
7	55	10	23	13	13	9	14	18	—

Угли, обогащенные компонентами группы фюзинита, имеют большую механическую прочность и худшую дробимость и, следовательно, меньшую пылеобразующую способность. Витринитовые угли, менее прочные, должны обладать повышенной пылеобразующей способностью.

Заключение

Проведенный анализ показал, что на пылеобразующую способность углей влияют такие природные факторы, как влажность, крепость и трещиноватость, зависящие от стадии метаморфизма угля и, нарушения массива, а также его петрографический состав.

Список литературы

1. Романченко С.Б., Костеренко В.Н. Полномасштабные исследования взрывов угольной пыли и критерии эффективности средств локализации // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. - 2018. - № 4. - С. 6-20.
2. Забурдяев В.С., Харченко А.В. Метановая опасность высокопроизводительных угольных шахт / Горный журнал. – 2022. – №3. – С. 58-63. – DOI 10.17580/gzh.2022.03.09
3. Позин Е.З., Меламед В.З., Азовцева С.М. Измельчение углей при резании. М.: Наука, 1977, 138 с.
4. Кудряшов В.В., Викторов С.Д., Качанов А.Н. О распределении минеральных частиц по размерам при разрушении горных пород. //Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – №6. – 2006. – С. 68-72.
5. И.В. Еремин, В.В. Лебедев, Д.А. Цикарев. Петрография и физические свойства углей. М.: «Недра», 1980, 263 с.

ОПЫТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ДЕГАЗАЦИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ.

Поздеев Е.Э.¹, Кубрин С.С.²

¹АО «СУЭК-Кузбасс», г. Ленинск-Кузнецкий,

²ИПКОН РАН, г. Москва

Эффективность добычи угля высокопроизводительными очистными комплексами в современных условиях на шахте возможна при корректном выполнении комплекса дегазационных мероприятий (предварительная, текущая пластовая дегазация, дегазация выработанного пространства, дегазация сближенных пластов, а также мероприятия по интенсификации газоотдачи угольных пластов, такие, как гидроразрыв, гидрорасчленение, плазменно-импульсное воздействие и др.). Они позволяют снизить метаносность выемочного блока угольного пласта. Возрастающие объемы бурения дегазационных скважин и скважин гидрораздействия требуют значительных материальных затрат, при этом фактическая эффективность дегазационных мероприятий остается низкой (10–12%) и не соответствует параметрам заложенных в проекты. Об этом косвенно свидетельствуют показатели остаточной газоносности разрабатываемых на шахте угольных пластов. Так, на шахте им. С.М. Кирова, средняя величина остаточной газоносности угольных пластов за последние 5 лет выросла для пласта Болдыревский примерно на 20%, для пласта Поленовский на 55%. Рост остаточной газоносности выемочного блока ведет к росту простоев выемочного комплекса по причине необходимости проветривания лавы. Все это свидетельствует о необходимости опытного определения параметров и свойств угольного пласта, влияющих на эффективность дегазационных мероприятий.

Нормативный документ - «Правила безопасности в угольных шахтах» [1] требует проведения обязательной дегазации угольного пласта при его природной метаносности выше 13,0 м³/т сухой беззольной массы (с.б.м.). Для повышения эффективности дегазационных мероприятий необходимо учитывать свойства угольного пласта, такие как водопроводимость, коэффициент фильтрации, скин-фактор, пьезопроводность, коэффициент проницаемости и т.д.

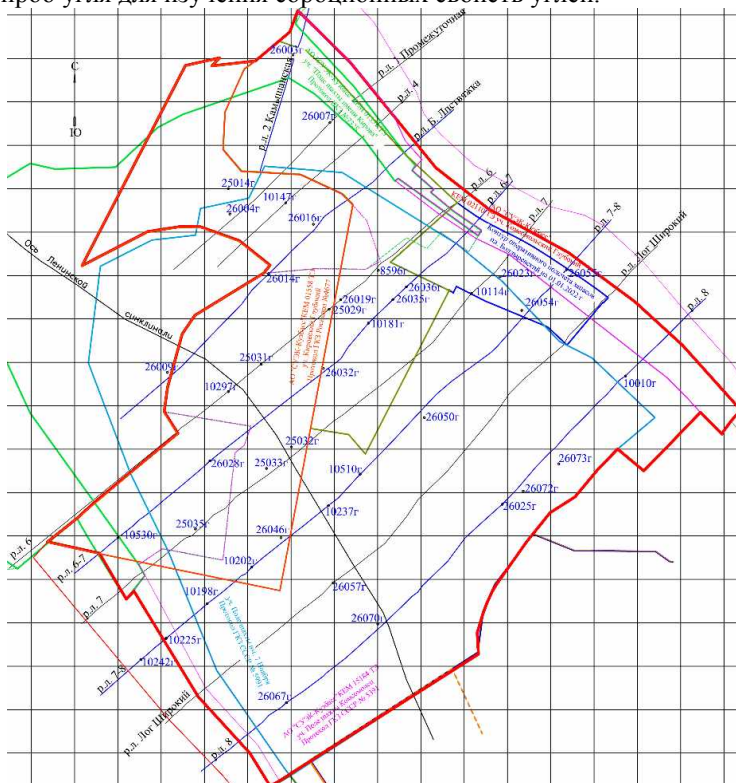
Определение указанных параметров на шахтных полях АО «СУЭК-Кузбасс» проводилось в соответствии требованиям «Инструкции по определению и прогнозу газоносности угольных пластов и вмещающих пород при геологоразведочных работах» (1977) [2]. При этом использовались следующие методы:

метод прямого опробования угольных пластов керногазонаборниками типа СКГН-76;

метод исследований газо-гидродинамических характеристик угольных пластов с помощью пластоиспытателя КИИ;

метод изучения сорбционных свойств углей.

Изучение газоносности угольных пластов на участке работ проводилось на 12 разведочных линиях в 37 скважинах, расположенных как в контуре участка, так и вблизи его границ от горизонта ± 0 до -650 м абс. (рис. 1). Всего отобрано 183 керногазовых пробы съемными керногазонаборниками СКГН-76, проведен комплекс лабораторных исследований проб для определения газоносности, в 5 скважинах проведены 8 пластоиспытаний угольных пластов комплексом КИИ-65, произведен отбор 4-х проб угля для изучения сорбционных свойств углей.



**Рисунок 1 - Расположение скважин для оценки
газоносности угольных пластов**

В основном процесс проведения испытаний с помощью КИИ-65 разбит на два этапа. Первый – открытый, когда в районе угольного пласта создается разрежение и из пласта поступает жидкость или газовая смесь. Второй этап – закрытый, объем пласта, находящегося под пакером изолируют и в нем восстанавливается пластовое давление. Пример изменения забойного давления приведен на рис. 2.

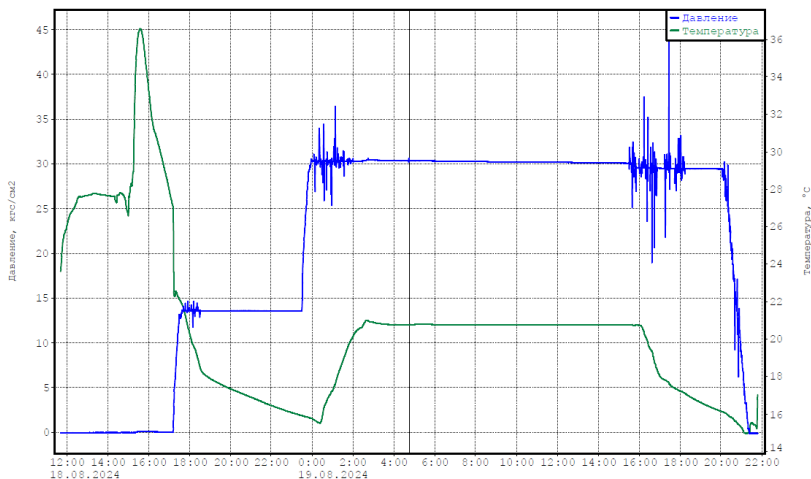


Рисунок 2 – Забойное давление и температура при гидродинамическом исследовании угольного пласта Болдыревский ш. им С.М. Кирова

Анализ результатов (за исключением проницаемости пласта Максимовский) позволил выявить эмпирическая зависимость проницаемости угольного пласта от глубины его залегания экспоненциального вида:

$$K = ae^{bh} \quad (1)$$

где: K – коэффициент проницаемости угольного пласта,

a , b – эмпирические коэффициенты равные соответственно 135,7 и 0,0122,

h – отметка подошвы угольного пласта.

При этом сумма квадратов отклонений равна 0,0114, статистическая мера R -squre, показывающая соответствуют регрессионной модели наблюдаемым данным (1 – полное соответствие, 0 соответствие отсутствует) равна 0,991. Следовательно, экспоненциальная зависимость проницаемости угольных пластов от глубины их залегания в Кузнецком угольном бассейне имеет все основания быть верной. Поэтому, полученное выражение (1) следует использовать для планирования отработки глубоко лежащих пластов в Кузбассе.

Список литературы.

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах». Серия 05. Выпуск 40. – 5-е изд., испр. и доп. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2017. – 198 с.

2. Инструкции по определению и прогнозу газоопасности угольных пластов и вмещающих пород при геологоразведочных работах. М.: Недра 1977. – 96 с.

УДК 622.4

ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИ-ПАРА-КСИЛИЛЕНА, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПРИБОРОВ КОНТРОЛЯ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Суков Д.И.^{1,2}

¹ИТПЭ РАН, ²НИТУ МИСИС, г. Москва

Аннотация. Пыль и влага - наиболее распространенные вещества, содержащиеся в воздухе не только современного мегаполиса, но и в воздухе рудников и шахт. В мегаполисах пыль и излишняя влага приводят к развитию различных заболеваний, в местах добычи полезных ископаемых, они же, приводят в негодность дорогостоящее оборудование. В настоящей работе предлагается использовать тонкопленочные покрытия на основе поли-пара-ксилилена, защитные свойства которого продлят срок службы горного оборудования.

Введение

Целью данной работы является теоретическое описание преимуществ существующего метода нанесения покрытий на основе поли-пара-ксилилена (далее – ППК) перед существующими и широко применяемыми методами защиты приборов, используемых в горном деле.

Известно, что состав атмосферы в рудниках или шахтах существенно отличается от состава атмосферы мегаполиса или отдаленной деревушки. Превалирующими компонентами атмосферы рудников и шахт являются пыль и влага [1]. Первая является наиболее опасной, она приводит не только к развитию различных заболеваний, но и может, и в действительности сокращает срок эксплуатации различного оборудования, применяемого при добыче полезных ископаемых. Основная тому причина – проникновение частичек пыли внутрь корпуса прибора, где первая, оседая впоследствии, накапливается, и по одному из 3-х механизмов [2],

выводит из строя дорогостоящее оборудование. Для решения данной проблемы предлагается использовать защитное покрытие на основе ППК.

Покрытия на основе ППК и его производных, обладают высокими барьерными свойствами, некоторые из которых, позволяют использовать ППК-покрытия, как защитную среду для разнообразной электроники в приборах, используемых в горном деле, т.е. в приборах, эксплуатируемых в агрессивных средах в течении длительного времени [3]. Некоторые из свойств покрытий на основе ППК представлены в предлагаемой таблице.

Таблица

Некоторые термические свойства ППК и его производных [3]

Название основы / Характеристика	Поли-пара- ксилилен	Полихлор- пара- ксилилен	Полидихлор- пара- ксилилен
Температура длительной (10 лет) эксплуатации, °С	62	80	100
В инертной среде и склейке, °С	220		
Допустимая температура кратко- временного нагрева на воздухе, °С	270		
В инертной среде и склейке, °С	320		

Помимо высоких термических свойств, покрытия на основе ППК являясь конформными, как и любые другие покрытия, используемые для защиты электроники от пыли и влаги, имеют преимущества перед остальными методами нанесения защитного слоя. Например, напыление происходит в высоком вакууме, где рабочее давление в камере не превышает величину в 10-5 торр. Процесс осаждения частичек мономера ППК происходит из газовой фазы, путем адсорбции высокореакционного аэрозоля-интермедиата на поверхность, содержащую электронные компоненты. Этим же способом осаждения обусловлено и полное повторение осаждаемым мономером топологии напыляемой поверхности, чего не удастся добиться методами механического нанесения защитных покрытий, например, лаковым. Полное повторение топологии поверхности, приводит к наибольшей защите поверхности, от проникания внутрь электроники пыли и влаги.

Обсуждение результатов

Теоретическим описанием предлагаемого полимерного материала для защиты электроники, работающей в агрессивных средах от выхода из строя, было показано преимущество по термическим свойствам покрытия на основе ППК перед покрытиями на иной основе.

Заключение

Покрытия на основе ППК применяются широко в самых различных отраслях наук. Основная задача подобного покрытия – полная пыле/влагозащита электронной начинки прибора. Покрытия на основе ППК, как минимум, соответствуют протоколу IP68, иначе говоря, закрывают его, а потому могут быть применяемы для защиты электроники приборов, эксплуатируемых в агрессивных средах.

Благодарности. *Исследования проведены в рамках обмена опыта между студентом кафедры Материаловедения полупроводников и диэлектриков Института новых материалов и потенциальным заказчиком.*

Список литературы

1. Кудряшов В.В., Кобылкин А.С. Анализ методов измерения запыленности шахтной атмосферы // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — №10-1. — С. 29—44. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_101_0_29.
2. Гиббс В.Э. Аэрология горных предприятий. Пыль и ее опасность в промышленности. 2023, 181 с.: ил.
3. И.Е. Кардаш, А.В. Пебалк, А.Н. Праведников. // Химия и технология высокомолекулярных соединений // М.:ВИНИТИ, 1984, Т.19, с.66-150.

УДК 622.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПРОВЕТРИВАНИИ КАРЬЕРОВ

Кобылкин С.С., Сис Мые, Часовенко С.В., Мин Туяйн Хлаини

Горный институт НИТУ МИСИС, г. Москва

Аннотация. Проветривание горных предприятий является базовым мероприятием по обеспечению безопасности. При этом для открытых горных работ проектирование вентиляции не является обязательным. Элементы расчётов по схеме проветривания, количеству вредностей, поступающих в карьер, и количеству воздуха, поступающего за счет ветра или инсоляции, в проектной документации встречаются редко. Единой методики также не существует. Процесс проектирования вентиляции карьеров в ряде случаев может вызывать трудности. Однако применение трехмерного моделирования может существенно упростить расчёты и, в перспективе, может позволить прорабатывать различные варианты схем и режимов проветривания карьеров.

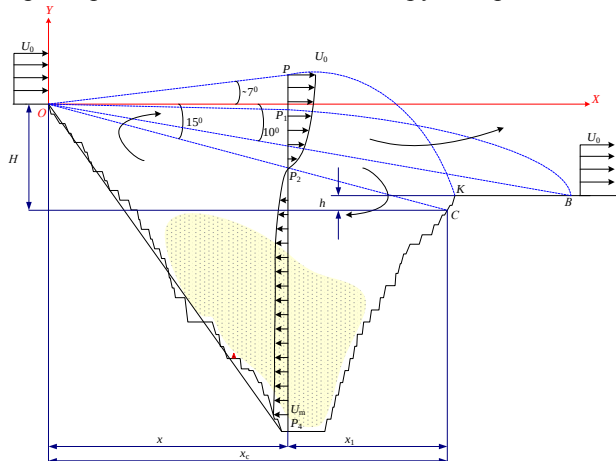
Введение

Проведенные ранее исследования [1, 2] показали, что аварии и несчастные случаи, связанные с аэрологическими факторами (например,

загазирование и повышенная запыленность), происходят регулярно. А статистика по профессиональной заболеваемости горнорабочих не ведется. Здесь следует отметить, что к опасным факторам добавляются и вредные условия труда, которые обусловлены недостаточной проработкой вопросов проветривания карьеров (учет скоростей движения воздуха, его температуры и влажности).

Порядок проектирования проветривания карьеров хорошо известен, ему обучают во всех университетах [3, 4]. Методика базируется на фундаментальных законах. Она апробирована, но не является нормативным документом.

На первом этапе проектирования вентиляции карьеров собирают сведения по климату той местности, где располагается объект. Особое внимание уделяется построению розы ветров и определению скоростей движения воздуха по преобладающим сторонам Света [2]. Эти данные лежат в основе определения количества воздуха, поступающего в карьер. Далее по тем же сторонам Света строятся разрезы, по которым определяется схема проветривания. На ее основании вычисляется скорость движения воздуха в любой точке профиля. Для определения застойных зон с рециркуляцией по всему объему карьера необходимо построить несколько десятков таких разрезов по каждому направлению Света. Графическим способом определяются координаты и длины отрезков, которые используются для расчёта количества воздуха (рис. 1). Если карьер имеет большие размеры и сложную форму, то расчёт, с учетом развития горных работ, становится весьма трудозатратным.



В настоящее время практически на всех крупных горных предприятиях, занимающихся добычей полезных ископаемых открытым способом, проводятся трехмерные маркшейдерские съемки. В результате такой съемки в графических программных комплексах формируются модели поверхности карьера. Данные модели могут быть использованы при проектировании вентиляции.

Используя программные комплексы (например, Ansys CFD или Flow Vision) не требуется вычерчивать большое количество разрезов [5]. Достаточно задать требуемые граничные условия (трехмерная модель поверхности карьера) и начальные условия (скорость и направление движения ветра, а также температуру воздуха и барометрическое давление). В результате расчетов может быть получена полная картина течений воздушных потоков внутри карьера (рис. 2).

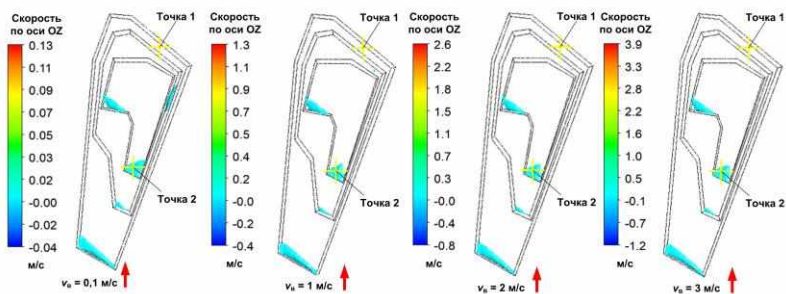


Рисунок 2 – Пример результатов численного моделирования проветривания карьера при разных скоростях движения воздуха

В зависимости от вычислительной мощности компьютера, на котором установлена программа, и от размеров карьера расчёт занимает время от нескольких минут до нескольких часов. Но в любом случае это быстрее и проще, чем проектировать вентиляцию карьера вручную.

Заключение

Обеспечение аэрологической безопасности на карьерах должно начинаться с проектирования вентиляции. В связи с большим количеством однотипных выполняемых действий при проектировании, а также с высокой скоростью развития горных работ, проектирование вентиляции карьеров становится трудозатратным.

С учетом развития современных программных средств и устройств трехмерной съемки карьеров применение трехмерного моделирования существенно упрощает процесс проектирования вентиляции карьеров.

Список литературы

1. Котельников А.Е., Есина Е.Н., Сис С., Барри А.М. Спутниковый мониторинг параметров безопасности при ведении открытых горных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2025. – № 2. – С. 43-56.
2. Кобылкин С.С., Кобылкин А.С., Сис М., Альфа М.Б. Моделирование в ANSYS CFD процесса проветривания карьеров // Горная промышленность. – 2024. – № 4. – С. 102-106.
3. Аэрология горных предприятий. Часть IV: Проектирование вентиляции карьеров и разрезов: учеб.-метод. пособие / С.С. Кобылкин, А.С. Кобылкин. – Москва: Издательский Дом НИТУ МИСИС, 2023. – 132 с.
4. Аэрология карьеров: Практикум. Каледина Н.О., Драгунский О.Н., Кобылкин С.С. – М.: Издательский дом НИТУ «МИСиС», 2020. – 68 с.
5. Кобылкин С.С., Кобылкин А.С., Баловцев С.В., Харисов А.Р. Научно-обоснованные решения по разработке инструкции по составлению плана ликвидации аварий для угольных разрезов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – №6-1. – С. 84-98. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-61-0-84-98.

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.946

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ МАССИВА ПОРОД В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Бирючков Н.Е., Сердюков А.С.

ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск

Аннотация

В рамках данной работы разработана беспроводная система для сейсмического мониторинга массива горных пород в реальном времени. Комплекс построен на базе микроконтроллеров ESP8266 с передачей данных по Wi-Fi, что обеспечивает гибкость конфигурации и низкую стоимость. Разработано программное обеспечение для микроконтроллеров на базе Arduino IDE и модуль на языке Python для приема и визуализации сейсмических сигналов. Проведены успешные испытания системы в полевых условиях.

Введение

Мониторинг состояния горных пород является важным методом предупреждения аварий в горнодобывающей промышленности, строительстве и геотехническом мониторинге. Существующие системы, такие как проводные и беспроводные сейсмостанции, обладают высокой точностью, но их высокая стоимость и сложность развертывания ограничивают их применение. В данной работе предлагается альтернативное решение на базе микроконтроллера ESP8266, обеспечивающее: беспроводную передачу данных по Wi-Fi, возможность программной настройки параметров мониторинга, низкую стоимость развертывания.

Метод

Разработанная система включает в себя следующие компоненты: аппаратные и программные. Аппаратная часть представляет собой набор сейсмических датчиков – вертикальных геофонов GMT-12.5 (рис. 2) с собственной частотой 12.5 Гц и сопротивлением 900 Ом, подключенных к микроконтроллерам ESP8266 (рис. 1). Программная часть – прошивка для микроконтроллера (написана на C++ с использованием Arduino IDE) и программа на Python для приема, обработки и визуализации данных

на компьютере. При настройке Wi-Fi модуля ESP8266 установлена скорость передачи данных 9600 bps (бит в секунду).

Алгоритм работы системы состоит из следующих этапов: вначале геофоны регистрируют колебания, который поступает на вход аналогово-цифрового преобразователя микроконтроллера с разрешением 10 бит. Далее ESP8266 оцифровывает сигнал и передает его на сервер (ПК) по Wi-Fi. Программа на Python принимает параллельно потоки данных со всех микроконтроллеров и обрабатывает, строит графики амплитуд и сохраняет результаты в файл для дальнейшего анализа.



Рисунок 1 - Микроконтроллер ESP8266



Рисунок 2 - Геофон GMT-12.5

Обсуждение результатов

В данной работе создана система сейсмического мониторинга. Основными преимуществами которой является низкая стоимость и возможность гибкой настройки. Полевые испытания системы подтвердили ее работоспособность, точность синхронизации между устройствами составляет ± 1 мс.

Заключение

Разработанный комплекс может быть использован для мониторинга сейсмической активности в шахтах, карьерах, строительстве и других областях, где требуется контроль состояния массива пород. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются: интеграция алгоритмов машинного обучения для прогнозирования опасных событий, масштабирование системы для работы с большим количеством датчиков.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-20055, <https://rscf.ru/project/25-27-20055/> и финансовой поддержки Правительства Новосибирской области.

Список литературы

1. Погрещкий А.В. и др. Опытнo-методические работы по тестированию бескабельной сейсморегистрирующей системы «SCOUT» //Приборы и системы разведочной геофизики. – 2017. – Т. 59. – №. 1. – С. 15-24.

2. Котенко И.В. и др. Комплексный подход к обеспечению безопасности киберфизических систем на основе микроконтроллеров //Вопросы кибербезопасности. – 2018. – №. 3 (27). – С. 29-38.

3. ESP8266 Technical Reference Manual / Espressif Systems. – 2023. – URL: <https://www.espressif.com/>

4. McKinney W. Python for data analysis: Data wrangling with Pandas, NumPy, and IPython. – «O'Reilly Media, Inc.», 2012.

УДК 528.9+519.6

РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ТРЕХМЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА

Флеенко А.С.

*Проектно-изыскательский институт электрификации
железных дорог и энергетических установок «Трансэлектропроект» –
филиал АО «Росжелдорпроект», г. Москва*

Широкое распространение в решении научных и прикладных задач находят компьютерное моделирование и трехмерная визуализация результатов. Чаще всего в основе подобных моделей лежат математическое описание границ или результаты трехмерного сканирования исследуемых объектов. При этом часть объектов обладает признаками, затрудняющими использование указанных способов к построению моделей. В первую очередь – невозможностью визуальной оценки и сканирования границ моделируемых тел, которые имеют неизвестную исследователю произвольную и изменяющуюся во времени и пространстве конфигурацию. Изучение и визуализация подобных объектов зависят от непосредственных измерений свойств, отличающих их от внешней среды. Таковы, к примеру, поля концентраций примесей в атмосферном воздухе, контуры промышленных запасов россыпных месторождений, границы морских течений. В условиях ключевого значения информации о местоположении и форме таких объектов для принятия решений поиск новых и совершенствование существующих методов моделирования подобных тел представляется актуальной задачей.

В качестве решения указанной проблемы рассмотрено применение инструментов геоинформационного картографирования [0] в связи с тем, что описанные выше объекты объединяет между собой наличие пространственной составляющей в исходных данных. Предложена практическая реализация метода трехмерного моделирования и визуализации в виде модуля ГИС, ориентированного на повышение качества и частичную

автоматизацию проводимых работ на примере характеристики загрязнения почвенного покрова тяжелыми металлами и мышьяком.

На начальном этапе подготовки геоинформационного модуля он рассматривается в качестве системы, целевой функцией которой является преобразование исходных данных в информацию о пространственном распределении свойств исследуемого объекта. Задачи унификации и стандартизации диктуют единый характер ожидаемого результата, который включает в себя набор стандартизированных данных и картографические материалы, в том числе трехмерные модели.

Для получения результата в качестве исходных данных необходим ряд параметров, среди которых не зависящие от специфики объектов (например, границы исследования, сведения о свойствах объектов, полученные путем непосредственных измерений) и связанные со спецификой объектов (например, критерии классификаций и иные сведения об особенностях объектов).

В качестве базового подхода при разработке модуля ГИС избран инкрементальный подход, состоящий в итеративной подготовке отдельных функциональных инкрементов (или блоков), что позволяет постепенно наращивать общую функциональность системы, обеспечивая гибкость и возможность корректировки и дополнения [0]. Первый блок включает в себя операции по стандартизации исходных материалов и получению общей информации, дополнению данных специфическими параметрами, а также статистический и геостатистический анализ. В основе второго и третьего блоков геоинформационного модуля лежат встроенные в ГИС инструменты интерполяции, позволяющие по результатам непосредственных измерений свойств объекта получить информацию о характере их распределения в пределах участка исследования [0]. Результат характеризует конкретный период времени измерения свойств исследуемых объектов.

При решении задачи оценки загрязненности почвенного покрова в качестве специфических параметров приняты утвержденные нормативы качества окружающей среды и формулы расчета показателей комплексной оценки [0]. Целью моделирования определено картографирование распространения поллютантов для последующего анализа и принятия решений. Среди исследуемых свойств – содержание тяжелых металлов и мышьяка. Итогом построения модели загрязнения почвенного покрова является атрибутивная информация о комплексной оценке загрязнения территории исследования, а также ее визуализация с помощью набора двумерных поверхностей и трехмерных изополей.

Трехмерная визуализация в рассматриваемом случае представлена поверхностью перехода от категории «умеренно опасного» к категории

«допустимого» загрязнения почв (рис.). Подобный подход к определению границы тела загрязнения позволяет уточнить объемы изымаемого грунта и снятия плодородного слоя почв.

В результате проведенного исследования разработан метод трехмерного моделирования и визуализации объектов, имеющих неизвестную конфигурацию и недоступных для визуальной оценки и сканирования, основанный на применении геоинформационных систем и картографических методов исследования. Среди направлений дальнейшей работы предполагается совершенствование интерфейса подготовленного на основе предложенного метода модуля ГИС для возможности выбора тех или иных параметров в зависимости от индивидуальных особенностей исследуемых ситуаций.

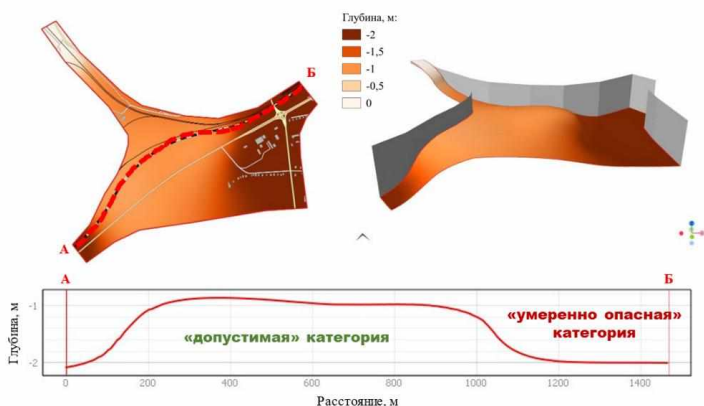


Рисунок – Трехмерная визуализация тела загрязненных почв и профиль АБ, иллюстрирующий границу перехода от категории «умеренно опасного» к категории «допустимого» загрязнения почв в пределах участка исследования

Список литературы

1. Лисицкий, Д.В. Назначение и особенности цифрового картографического изображения в геоинформационном картографировании / Д.В. Лисицкий, С.Ю. Кацко. – Текст: непосредственный // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2005. – № 4. – С. 22-28.
2. Кулямин, В.В. Формальные подходы к тестированию математических функций / В.В. Кулямин. – Текст: непосредственный // Труды Института системного программирования РАН. – 2006. – № 10. – С. 69-114.
3. Яицкая, Н.А. Геоинформационные технологии при решении трехмерных геоэкологических задач: пространственная интерполяция данных / Н.А. Яицкая, В.С. Бригида. – Текст: непосредственный // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – № 1 (12). – С. 162-173.

4. Санитарные нормы и правила «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»: СанПиН 1.2.3685-21: утв. Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 28.01.2021: ввод. в действие 01.03.2021. – Сайт электронного фонда правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115>. – Текст: электронный.

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИИ

УДК 622.7

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ФЛОТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Гатиатуллин Б.Л.

*Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург*

Аннотация. Флотационное обогащение описывается моделями кинетики флотации. Кинетические модели требуют задания определенной совокупности параметров, часть из которых требует непосредственного измерения во время эксперимента. Среди таких параметров можно выделить диаметр пузырька и высоту пенного слоя. Для установления численных значений указанных параметров предложено использовать технологию технического зрения. Нейронные сети для обнаружения объектов и сегментации экземпляров позволяют успешно производить фиксацию и последующее определение параметров аэрации, что может быть использовано при решении задач проектирования и оптимизации технологических процессов.

Введение

Флотационное обогащение характеризуется комплексностью, возникающей вследствие своей многофазной природы и протекания большого количества подпроцессов в системе. Однако необходимость количественного описания, а также оценки влияния переменных параметров на протекание технологического процесса требует использования различного рода математических моделей. При этом адаптация моделей под конкретные условия связана с необходимостью установления группы численных характеристик, определение которых, в большом количестве случаев опирается на расчет на основе эмпирических формул, общедоступные данные исторические данные, методы косвенной оценки. Возможности для прямого измерения интересующих параметров могут быть открыты за счет применения решения на базе цифровых технологий, в первую очередь, нейронных сетей.

Параметрами для измерения посредством системы технического зрения на базе нейронных сетей выступали крупность пузырьков и высота пенного слоя.

Модель кинетики флотации позволяет описывать динамику суммарного извлечения компонентов руды в зависимости от времени по уравнению 1 для модели 1-го порядка [1]:

$$R(t) = R_{\infty}(1 - e^{-PS_b R_f t}), \quad (1)$$

где R – суммарное извлечение, доли ед.; R_{∞} – предельное извлечение при $t \rightarrow \infty$, доли ед.; P – флотуемость, доли ед.; S_b – удельная интенсивность аэрации, с^{-1} ; R_f – фактор извлечения в пенном слое, доли ед.; t – время флотации, с.

Параметр S_b , определяется посредством уравнения 2 [2]:

$$S_b = 6J_g/d_{32}, \quad (2)$$

где J_g – приведенная скорость газа, мм/с; d_{32} – диаметр пузырька по Соутеру, мм.

Представленные выше параметры могут быть вычислены непосредственно, либо определены посредством метода наименьших квадратов при адаптации коэффициентов к экспериментальным результатам, за исключением уже отмеченного d_{32} , который требует непосредственного измерения. Предлагаемые в работах алгоритмы обработки изображений предоставляют возможность извлечения указанного параметра из изображений пузырьков, однако их использование может ограничиваться необходимостью тонкой настройки параметров алгоритма, чувствительностью к фону изображения, плотностью расположения пузырьков.

Высота пенного слоя связана с параметром R_f из уравнения 3 зависимостью [3]:

$$R_f = e^{-\beta H_f/J_g}, \quad (3)$$

где β – эмпирический коэффициент; H_f – высота пенного слоя, мм.

Параметр β может быть получен методом наименьших квадратов в то время, как параметр H_f требует непосредственного измерения в процессе эксперимента.

Материалы и методы

Для решения задачи по измерению указанных параметров было предложено использовать нейронные сети архитектуры yolo11 для сегментации экземпляров и обнаружения объектов для фиксации пузырьков и пенного слоя соответственно.

Для создания датасета для обучения были произведены опыты флотационного обогащения с параллельной съемкой камеры флотомашины. Также производился отбор пузырьков из флотомашины в отдельную зону для съемки пузырьков.

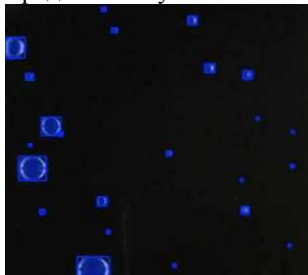
Из видеозаписей экспериментов были выделены кадры, далее размеченные для сегментации и детекции. Для повышения качества распознавания моделей, к подготовленному датасету была применена технология аугментации данных, включающая поворот изображений, изменение цветовых параметров, изменение масштаба изображений.

Агентированные наборы данных были использованы для обучения нейронных сетей. Нейронные сети далее были использованы для обработки видеозаписей экспериментов с целью получения значений требуемых параметров.

Обсуждение результатов

Обработка видеозаписей экспериментов позволила получить функции распределения крупности пузырьков по крупности.

Полученные числовые параметры могут быть использованы при построении моделей кинетики флотации при решении задач проектирования и оптимизации. Так на рисунках представлены результаты сегментации пузырьков и детекции пенного слоя, посредством которых непосредственно устанавливаются численные значения параметров.



**Рисунок – Результаты сегментации пузырьков
[составлено автором]**



Рисунок – Результаты детекции пенного слоя [составлено автором]

Заключение

В работе предложен метод определения численных значений показателей необходимых для разработки кинетических моделей флотации с использованием нейронных сетей для детекции и сегментации. Показано, что применение нейронных сетей успешно позволяет измерять

геометрические характеристики, связанные с аэрацией флотационной системы: диаметр пузырьков, высота пенного слоя.

Научный руководитель: заведующий кафедрой ОПИ, д.т.н., профессор Александрова Т.Н.

Работа выполнена при поддержке РНФ №23-47-00109

Список литературы

1. Bu, Xiangning & Xie, G. & Peng, Yaoli & Ge, Linhan & Ni, Chao. (2017). Kinetics of flotation. Order of process, rate constant distribution and ultimate recovery. Physicochemical Problems of Mineral Processing. 53. 342–365. 10.5277/ppmp170128.

2. Александрова, Т.Н. Подход к определению интенсивности аэрации / Т.Н. Александрова, В.В. Кузнецов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2023. №58. С. 812–822. 10.1134/S106273912205012X

3. Jera, T. M., & Bhondayi, C. (2021). A Review of Flotation Physical Froth Flow Modifiers. Minerals, 11(8), 864. 10.3390/min11080864

УДК 622.24.001.8:550.832.2:004.032.26

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ПРОЦЕССА БУРЕНИЯ

Подрезов Д.Б.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Югорский государственный университет», г. Ханты-Мансийск*

Аннотация

Автором предлагается инновационный программный комплекс для 3D-моделирования процесса бурения скважин. Используется гибридная модель с физической моделью разрушения на основе воксельной дискретизации горного массива (N^3 элементов) с учетом анизотропии, термопластических деформаций и стохастической неоднородности пород. Применены параллельные вычисления с использованием Cython-ядра для ускорения работы программы. Внедрен нейросетевой оптимизатор (архитектура Siamese NN) для прогнозирования энергоэффективных параметров бурения (WOB, RPM) в реальном времени. Платформа реализована на Python/PyQt6 с поддержкой ROS для интеграции с промышленными БУП. Предложенный продукт позволяет спрогнозировать напряженно-деформационное состояние забоя, возникающее в процессе бурения скважин с учетом геометрии породоразрушающего инструмента.

Введение

Современные методы добычи углеводородов требуют использования цифровых двойников буровых процессов. Традиционные методы

моделирования не учитывают нелинейные эффекты взаимодействия резцов с анизотропными средами, а также оперативную коррекцию параметров бурения на основе телеметрии. Существующие решения, такие, как Landmark DrillBench, Schlumberger Petrel используют упрощенные реологические модели, не поддерживают НРС-ускорение для сеток $>50^3$, а также обладают закрытой архитектурой без API для интеграции ИИ. Исходя из описанных выше замечаний, сформулированы основные задачи проектируемого ПО: современный подход к физическому моделированию разрушения горных пород, параллельные вычисления для работы в режиме реального времени, систему оптимизации параметров на основе машинного обучения, интерактивный 3D-интерфейс для инженерного анализа процессов разрушения долота и горной породы.

1. Математическая модель представлена посредством формул дискретизации пространства и уравнения энергетического баланса, позволяющего моделировать концентрацию энергии в зоне контакта инструмента с породой, а также учитывает критерий разрушения.

2. Физическая модель описывается формулами термомеханической связи, механики взаимодействия системы «резец-порода», а также формулами, раскрывающими модель износа инструмента.

3. Система уравнений в дискретном виде:

3.1. Основные переменные состояния (1):

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} d_{ijk} \\ T_{ijk} \\ \epsilon_{p,ijk} \end{bmatrix}, \quad i, j, k \in [0, N-1], \quad (1)$$

Вектор состояния $\mathbf{U}$ объединяет ключевые переменные: степень повреждения d_{ijk} , температуру T_{ijk} и пластическую деформацию $\epsilon_{p,ijk}$.

3.2. Эволюционная система (2):

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} = \mathbf{F}(\mathbf{U}, t) = \begin{bmatrix} k_d (q_E - \sigma_{\text{eff}})_+ \\ \frac{1}{\rho c_p} (\nabla \cdot (k_T \nabla T) + \dot{q}_v) \\ f(\sigma_{\text{eff}}, \dot{\gamma}) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

Система описывает эволюцию вектора состояния: 1-я компонента: кинетика повреждения, 2-я компонента: теплоперенос, 3-я компонента: пластическая деформация (функция f от σ_{eff} и скорости деформации $\dot{\gamma}$).

3.3. Схема интегрирования (3):

$$U^{n+1} = U^n + \frac{\Delta t}{2} [F(U^n, t^n) + F(U^{n+1}, t^{n+1})]. \quad (3)$$

4. Математическое описание нейросетевой модели:

4.1. Пусть входной вектор: $x \in \mathbb{R}^{15}$

$$h_1 = \text{ReLU}(\text{BN}(W_1 x + b_1)), \quad (4.1)$$

$$h_2 = \text{Dropout}(\text{ReLU}(\text{BN}(W_2 h_1 + b_2))), p = 0.4, \quad (4.2)$$

$$h_3 = \text{Dropout}(\text{ReLU}(\text{BN}(W_3 h_2 + b_3))), p = 0.3, \quad (4.3)$$

$$h_4 = \text{Dropout}(h_3, p = 0.3), \quad (4.4)$$

где $\text{ReLU}(x) = \max(0, x)$ – функция активации нейронной сети; Dropout – метод регуляризации; Batch Normalization (BN) – техника стабилизации входных данных каждого слоя. Вычисляются среднее значение и дисперсия для каждого мини-батча, затем входные данные нормализуются:

$$x_{\text{norm}} = \frac{x - \mu}{\sigma^2 + \epsilon}, \quad (5)$$

4.2. Ветви для предсказания энергии, которая принимает выход общих слоев и предсказывает энергию (регрессия):

$$e_{\text{out}} = W_{e2} \cdot \text{ReLU}(W_{e1} h_3 + b_{e1}) + b_{e2}, \quad (6)$$

4.3. Ветви для предсказания эффективности:

$$\epsilon_{\text{out}} = \sigma(W_{\epsilon2} \cdot \text{ReLU}(W_{\epsilon1} h_3 + b_{\epsilon1}) + b_{\epsilon2}), \quad (7)$$

4.4. Функция потерь:

$$\mathcal{L} = 0.7 \cdot \underbrace{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (e_{\text{pred}}^{(i)} - e_{\text{true}}^{(i)})^2}_{\text{MSE}} + 0.3 \cdot \underbrace{-\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_{\text{true}}^{(i)} \log(\epsilon_{\text{pred}}^{(i)}) + (1 - y_{\text{true}}^{(i)}) \log(1 - \epsilon_{\text{pred}}^{(i)})]}_{\text{BCE}}, \quad (8)$$

где: MSE – среднеквадратичная ошибка, $e_{\text{pred}}^{(i)}$ предсказанное значение энергии для i-го образца, $e_{\text{true}}^{(i)}$ - истинное значение для i-го образца.

Обсуждение результатов. Результаты сравнения программной реализации разрабатываемого ПО с аналогами представлена в таблице.

Таблица

Сравнительная характеристика разрабатываемого ПО с коммерческими аналогами.

№	Характеристика	Разрабатываемая платформа	Коммерческие аналоги
1	Поддержка HPC	+ (OpenMP/CUDA)	-
2	Open-source архитектура	+	-
3	Интеграция ИИ	+	Ограниченная
4	Кастомизация моделей	+	-

Заключение. Разработанная математическая модель адекватно описывает: процессы разрушения анизотропных сред, нелинейную динамику взаимодействия инструмента и породы, а также эволюцию температурных полей в зоне контакта. Интеграция гибридной модели: физического и нейросетевого расчета в производственный цикл позволяет сократить энергозатраты на бурение за счет оптимизированного выбора параметров геометрии бурового инструмента и режимов бурения.

Список литературы

1. Разрушение горных пород при бурении скважин: Учебное пособие. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2015. – 337 с. – ISBN 978-5-16-009729-9. – EDN TRWINZ.
2. Трушкин, О.Б. Выбор долот PDC в соответствии с твердостью и абразивностью горных пород / О.Б. Трушкин, А.Н. Попов // Территория Нефтегаз. – 2015. – № 6. – С. 34-38. – EDN XROHUX.
3. Mojtahedi, F., Yousefpour, N., Chow, S., Cassidy, M. Deep Learning for Time Series Forecasting: Review and Applications in Geotechnics and Geosciences // Archives of Computational Methods in Engineering. 2025. Vol. 32. P. 10.1007/s11831-025-10244-5.
4. Hareland G., Nygaard R., Al Dushaishi M. F. Real-Time Drilling Optimization System for Improved Overall Rate of Penetration and Reduced Cost/Ft in Geothermal Drilling. 2022.

УДК 528.71.952

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ГОРНОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГОРНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Басаргин А.А.

ИПКОН РАН, г. Москва

В наши дни функционирование горнодобывающих предприятий в условиях нестабильной внешней среды должно обеспечивать устойчивым снабжением человечество минеральным сырьем. Для этого необходимо устойчивое развитие горного предприятия во времени и пространстве. Это возможно достичь, разработав горнотехническую систему, которая позволила бы обеспечить устойчивое развитие минерально-сырьевого сектора в условиях колебаний спроса на сырье и рентабельности горнодобывающих предприятий, усиления законодательства в области экологической безопасности [1–4].

Разработка горнотехнической системы горного предприятия должно начинаться с проектирования ее концептуальной модели. Данная

модель объединит в рамках единого информационного пространства горного предприятия все маркшейдерские данные о месторождении полезного ископаемого.

Таким образом, разработку концептуальной модели горнотехнической системы, целесообразно производить на основе функционально-целевого подхода (ФЦП). Данный подход основан на создании многоуровневых структур, которые будут иметь древовидный характер. Это даст возможность описать структуру и алгоритмическую последовательность технологических операций. В итоге на основе синтеза структуры горнотехнической системы будут получены технологические блоки, характеризующие определенные цели предметной области, а их функции будут обеспечивать решение задач исследуемой предметной области.

На рисунке показан верхний уровень декомпозиции иерархии модели ГТС. Модели, созданные на основе ФЦП будут обладать некоторыми особенностями [5]:

- модель будет обеспечивать учет особенностей структуры исследуемой предметной области;
- достижение любой цели основывается на последовательной и параллельной декомпозиции подцелей верхнего уровня иерархии ГТС;
- при определении соответствия между целями и функциями различных уровней концептуальной модели ГТС естественный путь подцелей нижележащего уровня.

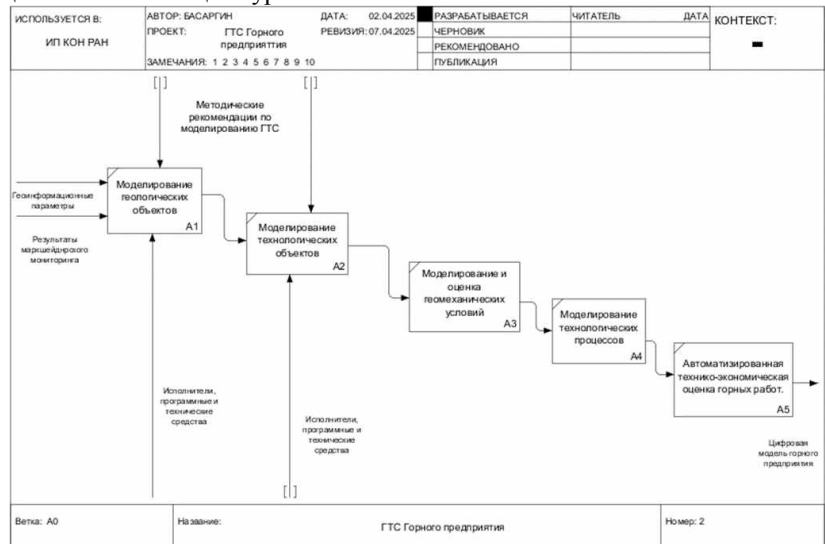


Рисунок 1 - Декомпозиция модели ГТС

Таким образом, анализ данной модели показал следующие результаты [6,7]:

1) при моделировании пространственного распределения полезного компонента месторождения будет обеспечено блочное представление различных геологических объектов при этом для будут доступны возможности геостатистического анализа на основе различных методов интерполяции;

2) при моделировании технологических объектов могут быть применены типовые сечения, определяющие формирование различных моделей выработок с заданными параметрами сложных конструктивных элементов;

3) оценка геомеханических условий будет выполняться на основе определения напряженно-деформированного состояния (НДС). При этом расчёт динамических проявлений будет представлен в двухмерной и трёхмерной постановке;

4) для технологической оценки процессов подбор оптимального состава комплексной механизации можно будет производить по нескольким критериям: по функциональному назначению, по технико-экономическим показателям и т.д. Такое преимущество позволит достоверно оценить возможности создаваемых технологических комплексов.

5) с точки зрения технико-экономической оценки горных работ появляется возможность текущего и перспективного планирования горных работ с определением периода времени с оценкой объёма извлекаемой горной массы, количества и качества руды.

Список литературы

1. Басаргин А.А. Создание цифровых моделей месторождений полезных ископаемых с применением современных технологий // Вестник СГГА" №1 (25). – 2014 г. – С. 34-40.

2. Басаргин А.А. Методика создания трехмерных геологических моделей месторождений с использованием геоинформационной системы Micromine // Сборник материалов междунар. Науч. конгр. «ГЕО-Сибирь - 2015». Т. 1 «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия», ч.1 – Новосибирск: СГУГиТ, С. 15-20.

3. Урумов В.А., Босиков И.И. 3d-модель и закономерности распределения полезных компонентов залежи Анненская жезказганского месторождения // Устойчивое развитие горных территорий. – 2015. – т. 7. № 1. С. 11-16.

4. Шульга Е.С. Чем порадует 2018 год пользователей программы Micromine // Золото и технологии. – 2017. – № 4 (38). С. 50-53.

5. Осипов В. Л. Определение рудных интервалов при подсчете запасов в программе Micromine // Горные науки и технологии. – 2018. – № 2. С. 23-31.

6. Шевкун Е.Б., Лещинский А.В., Галимьянов А.А. Короткая комбинированная забойка взрывных скважин высокой запирающей способности. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 4. С. 331-336.

7. Чантурия В.А., Макаров В.Н., Макаров Д.В. Экологические и технологические проблемы переработки техногенного сульфидсодержащего сырья // Апатиты: Кольский научный центр РАН, 2005. 218 с.

УДК 622.2:004.9

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОЧИСТНЫМ КОМБАЙНОМ В ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ ЛАВЕ

Дианов П.А., Закоршменный И.М.

ИПКОН РАН, г. Москва

Аннотация. Представлена модель адаптивного управления очистным комбайном в высокопроизводительной лаве. В модели использованы экспериментальные данные по интенсивности метановыделения из отбитого угля во времени и ПИД-регулятор, обеспечивающий адаптацию модели к изменяющимся показателям концентрации метана с целью обеспечения оптимального режима работы комбайна.

Введение

В последние годы значительно изменились условия работы шахт. При подземной разработке угольных месторождений шахтный метан оказывает решающее влияние на технико-экономические показатели работы шахт и обеспечение безопасности работ, что ограничивает возможности применяемых в настоящее время высокопроизводительных средств механизации для добычи угля.

Цель настоящей работы – разработка модели адаптивного управления скоростью подачи комбайна, позволяющей обеспечить максимальную производительность комбайна с соблюдением требований по допустимой концентрации метана на выходе из очистного забоя на основе определения вклада в газовый баланс лавы метановыделения из отбитого угля.

Постановка задачи

Результаты моделирования, приведенные в работе [1] наглядно показывают необходимость и эффективность применения оперативного управления очистным комбайном в высокопроизводительных лавах, но при этом следует учитывать неравномерность метановыделения во времени из размещенного на транспортной системе выемочного участка

отбитого угля, являющегося в этих условиях главным источником метана в призабойную зону, а впоследствии и далее по выработкам шахты [2].

Разработанный алгоритм представляет собой интеллектуальную систему управления скоростью комбайна, основанную на комбинации ПИД-регулятора и прогнозирующей модели, которая ограничивает повышение концентрации метана из отбитого угля в заданных пределах при максимально возможной производительности комбайна.

Система непрерывно анализирует текущую концентрацию метана и корректирует скорость комбайна, используя трехкомпонентный ПИД-регулятор.

В рассматриваемой горнотехнической системе принята прямоточная схема проветривания, значение длины очистного забоя L принято равным 350 м, его поперечного сечение - $S \approx 7 \text{ м}^2$, скорость очистного комбайна V варьируется в пределах его технической характеристики, скорость равномерного движения скребкового конвейера $U=1,53 \text{ м/с}$. Основным источником метана, поступающего в призабойное пространство, принято газовыделение из отбитого угля, размещенного вдоль забойного конвейера. С учетом того, что процесс перемещения угля по лаве занимает менее 4 минут, интенсивность метановыделения из отбитого угля считается постоянной во времени. В модели технологического процесса отбойки и транспортировки горной массы учтена неравномерность поступления горной массы на конвейер и изменяющийся объем метана, выделяющийся в призабойное пространство $X=0,26 \text{ м}^3/\text{т с.б.м. в мин.}$ [3] и в смеси с воздухом перемещаемый со скоростью $V=4 \text{ м/с}$ в пределах очистного забоя выемочного участка.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1, 2 представлен вариант оптимального режима работы комбайна.

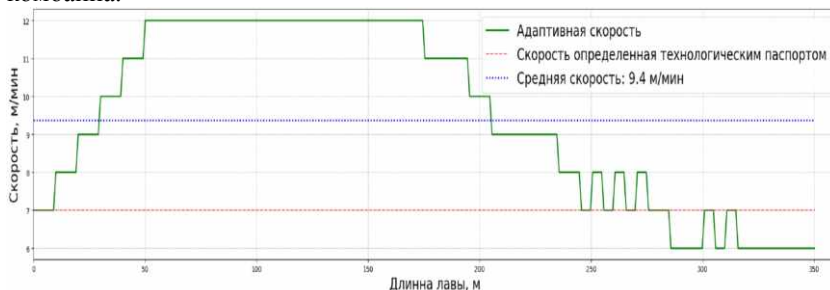


Рисунок 1 - Изменение скорости перемещения комбайна по длине лавы

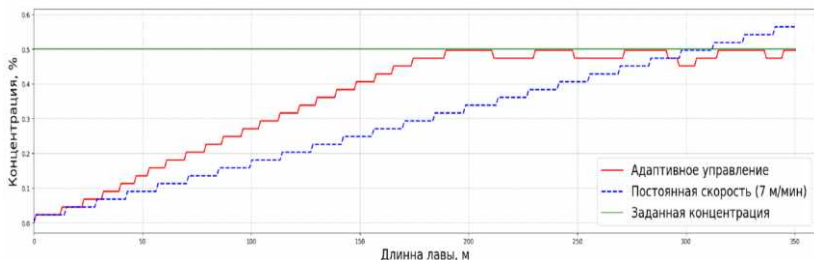


Рисунок 2 - Изменение концентрации метана в призабойном пространстве лавы в зависимости скорости перемещения комбайна

Допустимая концентрация метана из отбитого угля принята $C \leq 0,5\%$. Представлены результаты моделирования перемещения комбайна по длине лавы с использованием функции адаптивного управления и со скоростью определенной технологическим паспортом на отработку лавы $V=7$ м/мин.

Модель включает механизм упреждающего контроля. Алгоритм прогнозирует концентрацию метана (в данном варианте шаг прогнозирования составляет 20 метров перемещения комбайна) и при приближении к заданному ограничению ($C \geq 0,475\%$) инициирует экстренное снижение скорости по нелинейному закону, ограничивая максимальное изменение скорости комбайна 0,5 м/мин за шаг для поддержания скорости перемещения в диапазоне 6-12 м/мин, обеспечивая плавную и безопасную работу оборудования при динамически изменяющейся газовой обстановке.

Разработанный алгоритм адаптивного управления демонстрирует возможность эффективнее использовать возможности высокопроизводительного оборудования. Расчеты показывают, что время рабочего прохода комбайна по лаве сократилось на 22%, средняя скорость перемещения комбайна составила 9,4 м/мин. при обеспечении установленного допустимого вклада метана из отбитого угля в рудничную атмосферу лавы. Это достигается за счет динамического ускорения комбайна до 12 м/мин на участках с благоприятной газовой обстановкой, где прогнозируемая концентрация остается ниже 0,5%, и плавного замедления до 6 м/мин в зонах, где прогнозируется концентрация метана выше заданных значений. Время прохода лавы со скоростью, установленной технологическим паспортом составило 50 минут, а с использованием функции адаптивного управления 39 минут.

Заключение

1. Адаптивное управление обеспечивает динамическую корректировку скорости выемочного комбайна.

2. Адаптивный контроль концентрации метана позволяет избежать аварийных остановок технологического оборудования.

3. Более рационально используются потенциальные возможности высокопроизводительного современного комплекса, сокращая время прохода лавы на 22%.

Список литературы

1. Копылов К.Н., Кубрин С.С., Загоршменный И.М. Использование моделирования для управления очистным комбайном в высокопроизводительных лавах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 4. – С. 30–40. - DOI: 10.25018/0236-1493- 2019-04-0-30-40.

2. Шевченко Л.А., Ливинская С.Н. Газовыделение из отбитого угля при интенсивной отработке угольных пластов // Вестник КузГТУ. 2015. №1 (107)., 2015.- С. 164-167.

3. Забурдяев В.С. Выделение метана из отбитого в очистном забое угля // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 11. – С. 13–17. – DOI: 10.24000/0409-2961-2019-11-13-17

УДК 004.932.4

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА TENENGRAD ДЛЯ ОЦЕНКИ РАЗМЫТОСТИ ВИДЕОКАДРОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ГЛУБИННОЙ СКВАЖИННОЙ ВИДЕОСИСТЕМОЙ

Зайцева Е.В., Арефьева Е.И.

*Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург*

Аннотация. В данной работе проведено исследование метода Tenegrad. Полученные значения исходного и обработанных видеок кадров глубинной скважинной системы сравнивались с визуальным качеством. Показана эффективность Tenegrad при выборе параметров методов цифровой обработки.

Введение

В нефтегазовой отрасли для оценки состояния оборудования и внутреннего пространства нефтяных и газовых скважин используются телевизионные видеосистемы. Такие системы позволяют проводить детальный мониторинг внутренней поверхности скважины, обеспечивая высокую точность и информативность получаемых данных. Мониторинг позволяет увидеть состояние колонны или ствола, наблюдать за забоем, выявить рабочие интервалы в зоне перфорации и оценить состояние интервала перфорации, помогает в ликвидации осложнений в бурении и капитальном ремонте скважины, способствует выявлению

нижней границы притока пластового флюида в скважину. При этом следует учитывать сложные условия видеосъёмки. Например, при малом расстоянии от объектива до объекта зачастую происходит размытие видеоданных. Освещение производится за счет самой телевизионной системы, что приводит к формированию малоконтрастных кадров и наличию засветченных участков. Актуальность цифровой обработки уже имеющихся видеоматериалов обусловлена тем, что проведение повторных видеоисследований не всегда возможно, а новые записи могут содержать аналогичные дефекты: затемнения, засветки и размытия. Важным аспектом в исследованиях и разработке методов цифровой обработки является выбор количественного показателя качества видеокadra. Как правило, в цифровой обработке изображений используется показатель пиковое отношение сигнала к шуму (ПОСШ). Однако ПОСШ относится к эталонным методам оценки. При видеомониторинге скважин получить эталонное изображение не представляется возможным, поэтому в данной работе предлагается для такой оценки использовать метод Tenegrad.

Метод основан на рассмотрении среднего квадрата градиента яркости пикселей монохромного изображения, в результате приходит чёткая уверенность в изменениях изображения [1].

$$G = \sum (G_x(x, y)^2 + G_y(x, y)^2), \quad (1)$$

где G_x , G_y – маски на основе оператора Собеля, полученные путём функции свёртки исходного изображения ортогональными матрицами, представляющие собой маски вращения.

$$G_x(x, y) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \otimes V(x, y), G_y(x, y) = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \otimes V(x, y),$$

где $V(x, y)$ – исходное изображение.

Исследования проводились на основе видеокadров, полученных глубинной телевизионной видеосистемой на трехжильном каротажном кабеле (ООО ПФ «Аленд»). Пример такого видеокadra представлен на рис. 1.



**Рисунок 1 – Изображение
фильтра в колонне**

В качестве метода коррекции визуального качества был выбран один из гистограммных методов CLAHE [2] с входными параметрами

(форма гистограммной кривой, предел контрастного усиления, количество плиток). В таблице приведем количественные характеристики исходного (рис. 1) и обработанных видеокadres. Поскольку видеокadres, полученные в глубинных скважинах, как правило, достаточно тёмные, в качестве характеристики следует привести средний уровень яркости (K). При цифровой обработке видеоданных методом CLAHE изменялись три параметра: предел контрастного усиления (ClipLimit), форма гистограммной кривой (универсальная (Uniform), экспоненциальная (Exponential) и колокольная (Rayleigh)), количество плиток (NumTiles).

Таблица

Количественные характеристики исходного и обработанных видеокadres

Изображение	Средний уровень яркости (K)	Tenengrad
Исходное	80,4712	113,9389
ClipLimit 1/K	89,1120	146,8291
ClipLimit 2/K	98,7039	151,1651
ClipLimit 1/(2*K)	80,6987	139,5592
Uniform	106,4453	151,3923
Rayleigh	104,4863	148,0864
Exponential	98,7039	151,1651
NumTiles [4 5]	99,5707	146,2241
NumTiles [8 10]	98,2405	151,9673
NumTiles [12 15]	97,4026	154,3475
NumTiles [16 20]	96,7734	155,6359
NumTiles [24 30]	96,6104	157,3361

На рис. 2 приведен видеокادر после цифровой обработки методом CLAHE с оптимальными параметрами качества.



**Рисунок 2 – Изображение
фильтра в колонне,
после цифровой обработки**

Обсуждение результатов

Значения Tenengrad, приведенные в таблице, в исследовании сравнивались с визуальным (субъективным) качеством видеокadres. Как видно из таблицы, средний уровень яркости обработанного видеокadra может начинаться падать, несмотря на рост Tenengrad. При этом визуальная оценка совпадает с оценкой Tenengrad – рост характеристики соответствует

лучшему визуальному качеству. Наиболее оптимальными входными параметрами являются –ClipLimit 2/К; форма гистограммы – экспоненциальная; NumTiles – [24 30]. Также цифровую обработку видеоданных следует проводить по каналу яркости.

Заключение

В результате проведенного исследования метод Tenengrad для оценки размытия видеокадров, полученных в глубинных скважинах, показал свою эффективность при оценке качества видеокадров при их обработке гистограммными методами. Планируется продолжить исследования этой характеристики при применении других методов цифровой обработки к видеокадрам, полученным глубинными скважинными видеосистемами. Также в дальнейшем предполагается использование Tenengrad для автономной коррекции качества глубинных скважинных видеосистем.

Список литературы

1. Ватаманюк И.В. Применение методов оценивания размытости цифровых изображений в задаче аудиовизуального мониторинга/ И.В. Ватаманюк, А.Л. Ронжин // Информационно-управляющие системы.–2014.– №4. – С. 16–23.
2. Зайцева Е.В., Кочнева А.А., Катунцов Е.В. Оптимизация технологического процесса повышения контрастности на изображениях, полученных в шахтах/ Е.В. Зайцева, А.А. Кочнева, Е.В. Катунцов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – №7. – С. 115–130.

УДК 550.83

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИВЫХ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И АУДИОМАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НА УГЛЕПОРОДНОМ МАССИВЕ

Николаев И.Ю., Шалованов О.Л.

ФГБНУ «РАНИМИ», г. Донецк

С целью планирования экспериментальных полевых электрометрических работ, оценки эффективности и корректной интерпретации результатов решается прямая задача ВЭЗ и АМТЗ.

Стартовая геоэлектрическая модель представляет собой четырехслойный разрез глубиной до 40 м, основанный на данных геологоразведочного бурения и созданной физико-геологической модели участка.

Для условий подработанного углепородного массива рассчитываются модельные кривые вертикального электрического зондирования

в нарушенном и ненарушенном пространстве верхней части геологического разреза. Под ненарушенным пространством понимается наличие высокоомного основания в стартовой модели. Предполагается, что в нарушенном массиве основание стартовой модели проводящее, но менее, чем прослеженный бурением по участку работ довольно мощный (до 32 м) пласт глины.

Кривые ВЭЗ для установок Шлюмберже и Веннера с учетом изменяющейся мощности пласта глины рассчитываются методом линейной фильтрации. Кernels-функция рассчитывается по методике Л.Л. Ваньяна [1], коэффициенты фильтра – по методу наименьших квадратов [2].

Для условий подработанного углепородного массива также рассчитываются модельные кривые аудиоманнитотеллурического зондирования в нарушенном и ненарушенном пространстве верхней части геологического разреза.

При расчете кривых электросопротивления и фазы импеданса последовательным пересчетом приведенного импеданса с нижней границы на земную поверхность используется геоэлектрическая модель горизонтально-слоистой среды – модель Тихонова-Каньяра [3].

Одномерная модель Тихонова-Каньяра состоит из N горизонтально однородных изотропных слоев (рисунок), каждый из которых характеризуется определенными и постоянными значениями удельного сопротивления и мощности. Значения относительной диэлектрической и магнитной проницаемости слоев приняты равными единице. Мощность нижнего слоя равна бесконечности. Верхнее полупространство заполнено непроводящим воздухом.

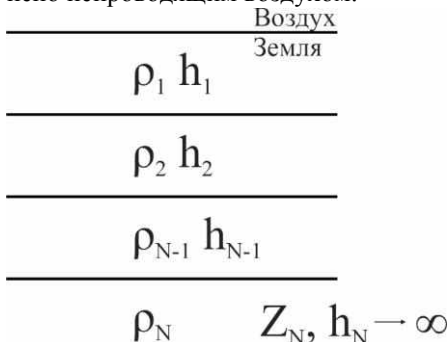


Рисунок – Модель одномерного геоэлектрического разреза

Величина приведенного импеданса может быть определена как результат нормировки (деления) входного импеданса (аномального) на значение импеданса верхнего слоя, принимаемого как «нормальный» импеданс однородного полупространства с удельным сопротивлением ρ_1 . Рассчитываемое теоретически значение входного импеданса

магнитотеллурического поля над горизонтально слоистой средой равно произведению импеданса для однородного полупространства, сопротивление которого равно сопротивлению первого слоя, на приведенный импеданс, являющийся безразмерной величиной и отражающий влияние всех залегающих ниже слоев [4]. Кривые АМТЗ рассчитываются так же, как и кривые ВЭЗ, с учетом изменяющейся мощности пласта глины.

Анализ полученных модельных кривых ВЭЗ, АМТЗ и фазового импеданса позволяет утвердить оптимальные параметры методики проведения полевых электрометрических исследований верхней части геологического разреза в условиях шахтного поля.

Список литературы

1. Ваньян Л.Л. Электромагнитные зондирования. – М.: Научный мир, 1997. – 219 с.
2. Куфуд О. Зондирование методом сопротивлений. – М.: Недра, 1989. – 270 с.
3. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. – М.: Научный мир, 2009. – 680 с.
4. Иванов А.А., Новиков П.В., Новиков К.В. Лабораторный практикум по электроразведке. – М.: МГРИ, 2019. – 48 с.

УДК 622.271

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ: ОТ КИНЕМАТИКИ ЭКСКАВАТОРА К «ФАБРИКЕ» ВИРТУАЛЬНЫХ КАРЬЕРОВ

Милетенко Н.И.

ИПКОН РАН, г. Москва

Аннотация. Рассматривается многоуровневая концепция цифрового двойника современного карьера, объединяющая макромоделли производственного потока и микромоделли отдельных машин. Показано, как удаленный аналитический центр превращается в «фабрику» виртуальных копий, совмещающую мониторинг, планирование, оптимизацию и обучение персонала на основе исторических и онлайн-данных. Особое внимание уделено имитационной модели карьерного экскаватора-мехлопаты, уточняющей диапазоны оптимальных скоростей подъема и напора для сокращения цикла копания. Интеграция агрегатных и системных моделей обеспечивает сквозную адаптацию технологической цепочки «экскавация-транспорт-переработка» и формирует базу для дистанционного и автономного управления. Представлены перспективы переноса наземных цифровых решений на лунно-марсианскую добычу.

Материалы адресованы инженерам, научным работникам и управленцам, внедряющим технологии Индустрии 4.0 в горном деле сегодня.

Введение

Цифровая трансформация горнодобывающей отрасли перешла из стадии концепции в фазу повсеместной промышленной интеграции. Современные карьеры стремительно насыщаются сенсорикой, беспроводными каналами связи, промышленным интернетом вещей, облачными вычислительными мощностями и инструментами искусственного интеллекта. При этом на первый план выходит не столько накопление данных, сколько способность превращать их в непрерывно адаптируемую виртуальную реплику предприятия — цифровой двойник. В этой модели синхронизируются геологическая информация, телеметрия горнотранспортной техники, планы буровзрывных работ, логистика руды, производственные и энергетические показатели. Систему можно сравнить с «живым организмом»: каждый элемент — от экскаватора до распределённого аналитического центра — формирует нервную, мышечную или мозговую ткань целостного цифрового тела. Рассмотрение двух уровней этой архитектуры — машинного и системного — позволяет увидеть, как локальная точность моделей техники обеспечивает глобальную эффективность предприятия [1, 2].

Обсуждение результатов

На макроуровне цифровой двойник современного карьера строится вокруг удалённого аналитического центра, которому делегируются функции мониторинга, диспетчеризации, многовариантного планирования и подготовки персонала. Серверы центра хранят исторические и оперативные базы данных горно-геологических информационных систем, комплексов управления горнотранспортным оборудованием, симуляторов погрузочно-доставочных и буровых процессов. Сюда же стекается поток телеметрии с карьера: показатели двигателей, позиционирование, параметры загрузки, данные систем предотвращения столкновений, датчики усталости водителей. Виртуальная платформа отображает их в реальном времени, формируя непрерывную картину работы предприятия. На базе этих данных запускаются сценарные расчёты: моделируется изменение вместимости трёхзвённой цепочки «экскаватор — самосвал — переработка» при перераспределении парка техники, проверяется влияние разных геотехнологических схем на показатели качества руды, прогнозируются интервалы сервисного обслуживания машин с учётом их текущего технического состояния [3].

Значительную часть вычислительной нагрузки забирают симуляторы — цифровые полигоны, на которых проверяются гипотезы и отрабатываются новые алгоритмы без риска для реальной производственной

цепочки. Они же используются как учебные тренажёры: диспетчер или оператор дистанционного управления получает «проигрыватель смены», основанный на реальных данных, и может отработать реакцию на нештатные ситуации или освоить новые стратегии маршрутизации. Таким образом аналитический центр превращается в «фабрику цифровых двойников» [1, 7], где на основе единых исходных данных собираются виртуальные копии технологических блоков любой детализации — от горного предприятия до отдельных механизмов. Максимальную ценность эта фабрика даёт тогда, когда нижние уровни иерархии — цифровые модели конкретных машин — обеспечены математической точностью. Яркий пример такого микроуровня — имитационная модель карьерного экскаватора с прямой лопатой. В реальности у подобной машины рабочий цикл нередко удлинняется почти вдвое по отношению к нормативу из-за несогласованности механизмов подъёма и напора, а также из-за человеческого фактора. Цифровая модель, основанная на двухступенной кинематической схеме, задаёт обобщённые координаты режущей кромки ковша и описывает связи между скоростью копания, подъёма и напора. Решённые графоаналитические уравнения выводят оптимальные диапазоны этих скоростей для любых сочетаний радиуса и высоты копания. Ширина диапазона впечатляет: скорость напора способна изменяться от отрицательных до положительных значений почти на 1 м/с, а скорость подъёма — почти до метр-в-секунду, причём зависимость является нелинейной. Когда такая модель интегрируется в приводы машины или, шире, в цифровой двойник карьера, она позволяет по-новому распределять функции человека и автоматики. Система адаптивного управления в реальном времени гармонизирует движение стрелы и рукояти под конкретные горно-технические условия, тем самым снижая нагрузку на машиниста и приводя цикл к проектным 25–28 секундам. Одновременно симулятор экскаватора пополняет фабрику двойников проверенным «кирпичиком», который может быть использован при планировании смены: разные траектории копания и схемы погрузки проверяются предварительно в виртуальной среде, и только оптимальное решение передаётся в систему диспетчеризации как операционный наряд [1, 3-5]. Синергия макро- и микроуровней становится особенно заметной при переходе к дистанционному или полностью автономному управлению парком техники. Тандем «глобальной» модели производственного потока и «локальных» моделей машин даёт возможность не только корректировать маршрут самосвалов, но и менять профиль экскавации, шаг буровой сетки, скорость передвижения буровой установки, исходя из целевой функции, будь то себестоимость тонны, энергопотребление или содержание полезного компонента

в руде. В виртуальном контуре все эти решения проверяются за считанные минуты; в реальном — внедряются без остановки производства. Перспективы технологии выходят за земные рамки. Опыт построения двойников для карьера уже ложится в основу концепций лунных и марсианских роботов: SLAM-навигация по 3D-карте, энергетрическое планирование движения с учётом солнечной инсоляции, адаптивное взаимодействие экскаватора-ровера и гусеничного самосвала-ровера на редуцированной гравитации. Те же алгоритмы без труда переносятся в подземные выработки, где сигналы спутниковой навигации недоступны и требуется альтернативная локализация. Таким образом, фабрика цифровых двойников становится не просто инструментом оптимизации существующих процессов, а плацдармом для экспоненциального расширения географии добычи: всё, что хорошо симулируется — реализуемо.

Заключение

Цифровой двойник горного предприятия — это многоуровневая живая система, в которой непрерывно обмениваются данными и взаимно верифицируются модели разного масштаба. Точность её глобальных прогнозов определяется математической добротностью моделей машин, а практический экономический эффект — скоростью и гибкостью коммуникаций между уровнями. Размещение экосистемы в удалённом аналитическом центре превращает цифровизацию из набора разрозненных проектов в объединённый сервис: на тех же вычислительных ресурсах одновременно оптимизируется добыча, разрабатывается новый блок карьера, обучаются операторы и тестируются непилотируемые технологии для будущих космических экспедиций. Принцип «данные → модель → оптимизация» в горной отрасли устоялся окончательно; следующая ступень — формирование нормативной базы, которая юридически закрепит решения, принимаемые виртуальными «советчиками», и создание образовательного континуума, где инженер, диспетчер и робот взаимодействуют в одной цифровой реальности. Когда эта экосистема станет массовым явлением, кинематический расчёт ковша экскаватора и сценарная балансировка всего производства консолидируются в единую интеллектуальную операционную систему, а понятие «цифровой двойник» будет восприниматься не как инновация, а как необходимый элемент любой горной инфраструктуры.

Список литературы

1. Клебанов, А.Ф. Цифровые двойники процессов управления высокоавтоматизированными горнотранспортными комплексами / А.Ф. Клебанов, И.В. Еремкин, П.А. Габусу // Горная промышленность. — 2025. — №4. — С. 61-70. — DOI 10.30686/1609-9192-2025-4-61-70.

2. Комиссаров, А.П. Цифровизация в горном машиностроении / А.П. Комиссаров, Ю.А. Лагунова, Р.Ш. Набиуллин, О.А. Лукашук // Горное оборудование и электромеханика. – 2020. – № 5(151). – С. 34-38. – DOI 10.26730/1816-4528-2020-5-34-38.

3. Владимиров, Д.Я. Цифровая трансформация открытых горных работ и новое поколение карьерной техники / Д. Я. Владимиров, А. Ф. Клебанов, И. В. Кузнецов // Горная промышленность. – 2020. – №6. – С. 10-12. – DOI 10.30686/1609-9192-2020-6-10-12.

4. Клебанов, А.Ф. Организация удалённых центров управления горным предприятием: стратегические предпосылки и этапы реализации / А.Ф. Клебанов, А.В. Бондаренко, Ю.Л. Жуковский, Д.А. Клебанов // Горная промышленность. – 2024. – №4. – С. 174-183. – DOI 10.30686/1609-9192-2024-4-174-183.

5. Сахапова, Т.С. Цифровой двойник производства как этап новой цифровой бизнес-модели промышленного предприятия / Т.С. Сахапова, Т.Ш. Исмагилов, В.А. Тихонов // Горная промышленность. – 2023. – №2. – С. 62-68. – DOI 10.30686/1609-9192-2023-2-62-68.

6. Захаров, В.Н. Цифровая трансформация и интеллектуализация горнотехнических систем / В.Н. Захаров, С.С. Кубрин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 5-2. – С. 31-47. – DOI 10.25018/0236_1493_2022_52_0_31.

7. Клебанов, А.Ф. Комплексный подход к удалённому мониторингу технического состояния и режимов эксплуатации карьерного автосамосвала / А.Ф. Клебанов, Д.Н. Сиземов, М.В. Кадочников // Горная промышленность. – 2020. – №2. – С. 75-81. – DOI 10.30686/1609-9192-2020-2-75-81.

УДК 528.5

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МАРКШЕЙДЕРСКО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Писарев В.С.

ИПКОН РАН, г. Москва

Аннотация

В статье кратко описана классификация средств измерений и обеспечения получения достоверных данных о количественных и качественных характеристиках георесурсного потенциала месторождений, интеллектуального анализа данных, позволяющих разрабатывать геоинформационные модели нового уровня.

Введение

При отработке месторождений полезных ископаемых возникает проблема оценки воздействия на целостность горного массива с последующей ликвидацией горных выработок. Одной из сложных задач при решении этой проблемы является задача определения геометрических параметров выработанного горного пространства и его проекции на земную поверхность с учетом структурных физико-геологических, гидротехнических особенностей и тектоники эксплуатируемых участков рудных месторождений. Так как с течением времени горные выработки и отдельные полости в породном массиве теряют прочность и устойчивость и начинают развиваться деформационные процессы в выработанном пространстве, которые обычно достигают земной поверхности и могут приводить ее к процессу сдвигению. Такие горные выработки приводят к нарушению природного равновесия толщи пород, в результате которого происходят процессы перераспределения напряжений, деформирование и сдвигение породного массива. Эти процессы распространяются и в верхнее полупространство до дневной поверхности Земли. Дневная поверхность также деформируется во всех направлениях, что происходит к сдвигению кровли выработки. Характер и форма проявления этих деформаций варьируют в весьма широких пределах: от едва уловимых наблюдений высокоточными приборами изгибов и наклонов земной поверхности до глубоких воронок и провалов [1-3].

Обсуждение результатов

Одной из тенденций современного этапа в развитии горного дела является совершенствование методов компьютерного 3D - моделирования месторождений и объектов эксплуатации минерально-сырьевого комплекса.

С каждым этапом развития горно-геологических информационных систем (ГГИС) повышается точность многопараметрической оценки ресурсной базы месторождений на основе создания пространственных геологических моделей рудных тел. Особенно актуально это для месторождений твердых полезных ископаемых со сложным распределением свойств и характеристик вмещающих массивов горных пород.

При геотехническом мониторинге за объектами недропользования, та-кими как борт карьера, склад извлеченной горной массы, склад породы, провал земной поверхности и т.д. выполняются многократные маркшейдерско-геодезические измерения, в результате которых получаем координаты контрольных точек измерений $X_1, Y_1, Z_1; X_2, Y_2, Z_2; X_i, Y_i, Z_i$.

В результате серии измерений получаем набор геопространственных данных, разность которых может дать информацию о величине

деформации объекта исследования и количественные характеристики в заданных единицах измерений.

Поскольку для визуализации и работы с такими моделями требуется специализированное программное обеспечение, это могут быть CAD системы, ГИС системы или горно-геологические системы.

CAD системы (computer aided design) – это компьютерные системы автоматизированного проектирования, которые предназначены для задач проектирования. Системы такого типа используются для решения задач, связанных с определением компонентов, архитектур, интерфейсов и других характеристик конструкций и оборудования. Примером таких систем являются программы AutoCad, Civil 3D, ArchiCad, NanioCad и т.д.

Горно-геологические информационные системы (ГГИС) - программное обеспечение для решения информационно - аналитических задач, связанных с эксплуатацией месторождений полезных ископаемых, например, GEOVIA Surpac, Micromine, Datamine, Geoblock, Geostat, microLYNX, Minescape, Vulcan, MineFrame, ГеоМикс и др. Горно-геологические информационные системы можно отнести к геоинформационным системам, т.к. они в большинстве своем обладают всеми теми функциями, которые присутствуют в ГИС.

Заключение

В настоящее время совместное использование ГИС и ВМ технологий дают возможность объединять данные маркшейдерско-геодезических измерений и данные содержащие цифровые модели рельефа в единые цифровые модели. Это решение позволяет специалистам разрабатывать комплексную трехмерную модель горного пространства, соответствующую современным требованиям, а учитывая такой параметр, что почти все современное оборудование имеет настройки для беспроводного доступа, такие модуль как WI-FI и Bluetooth, следовательно, полученные в полевых условиях измерения можно отправлять по средствам связи через сеть Интернет на облачное хранилище доступ, где доступ будет у специалистов, которые практически сразу смогут получить к данным полевых измерений.

В настоящее время трудно представить горное производство без надежных систем автоматизации, а также высококвалифицированного персонала, позволяющего получить максимальную эффективность от их работы. На протяжении последних лет был выстроен фундамент, на основе которого уже сейчас создается комплексная интеллектуальная система управления всем технологическим процессом, которая позволит компании значительно повысить эффективность своих предприятий и сохранить мировое лидерство [4].

Таким образом, можно сделать вывод, что единая информационно-аналитическая система (ЕИАС) - это мощный инструмент, который может и должен использоваться на любом горном предприятии для улучшения эффективности и оптимизации процессов, которые в конечном итоге помогают повысить конкурентоспособность предприятия и обеспечить его стабильное развитие.

Список литературы

1. Писарев, В.С. Комплекс маркшейдерско-геодезических работ на территории нефтяного месторождения для обеспечения строительства кустовых площадок / В. С. Писарев // Проблемы геологии, разработки и эксплуатации месторождений, транспорта и переработки трудноизвлекаемых запасов тяжелых нефтей: Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Ухта, 07–08 ноября 2024 года. – Ухта: Ухтинский государственный технический университет, 2024. – С. 11-16.

2. Писарев, В.С. Геотехнический мониторинг при эксплуатации нефтегазовых месторождений / В.С. Писарев // Маркшейдерия и недропользование. – 2024. – № 4(132). – С. 67-71.

3. Писарев, В.С. Определение зоны возможного оседания земной поверхности с использованием методов гравиразведки при отработке слепых рудных тел / В.С. Писарев, В.Ф. Канушин, А.А. Еременко // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2024. – Т. 29, № 3. – С. 32-42.

4. Мустафин М.Г. Пути развития маркшейдерско-геодезических наблюдений за устойчивостью бортов карьеров / М.Г. Мустафин, Е.О. Валькова, В.А. Вальков // Маркшейдерский вестник. – 2022. – № 3 (148). – С. 13–18.

ПРОБЛЕМЫ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

УДК 669.243.27

ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ ОКИСЛЕННЫХ НИКЕЛЕВЫХ РУД ПРОМПРОДУКТАМИ ПРОИЗВОДСТВА ОРГАНИЧЕСКИХ КИСЛОТ

Тихомиров З.Д., Маковская О.Ю.

*ФГАОУ ВО Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург*

Аннотация. Изучена возможность применения культуральной жидкости гетеротрофных грибов *Aspergillus niger* для выщелачивания окисленных никелевых руд Буруктальского месторождения. В качестве продуцента лимонной кислоты использовали штамм *Aspergillus niger* ВКПМ F-326. При выщелачивании руды культуральной жидкостью достигнуто извлечение никеля до 8,69%, кобальта до 28,61% и железа до 0,15%.

Введение

Окисленные никелевые руды являются достаточно сложным сырьем. Российские силикатные никелевые руды по своему качеству сильно уступают аналогичным рудам зарубежных стран. С одной стороны, содержание никеля в них не превышает 0,8-1,2%. С другой стороны, наличие значительных запасов подобных руд делает их переработку целесообразной.

Силикатные никелевые руды по комплексу рудообразующих минералов разделяются на два технологических типа: железистые (охристые, лептохлоритовые, гематитовые) и магнезиальные (серпентиниты с никелевыми силикатами). Все силикатные руды подвергаются непосредственному металлургическому переделу, поскольку тонкая минерализация окисленных никелевых руд делает их обогащение практически невозможным. Железистые руды перерабатывают гидрометаллургическими (при содержании магния менее 3%) или пирометаллургическими методами, магнезиальные – только пирометаллургическим [1].

Главные недостатки пирометаллургического способа заключаются в многостадийности технологии, высоком расходе дорогостоящего кокса, низком извлечении никеля и особенно кобальта и, наконец, в полной потере всего железа. Гидрометаллургические процессы наряду с более низкой энергоемкостью обеспечивают снижение степени загрязнения окружающей среды, улучшение условий труда, возможность автоматизации технологических операций. Для выщелачивания руд как правило применяются минеральные кислоты, чаще всего серная кислота, как наиболее дешевая [2]. Однако по ряду показателей (селективность к цветным металлам, экологичность, и т.д.), имеют преимущества органические кислоты. Известно о применении для выщелачивания окисленных никелевых руд карбоновых кислот: щавелевой, лимонной, уксусной [3-5]. Извлечение цветных металлов относительно невысоко, но это компенсируется низким переходом в раствор железа, что существенно упрощает его последующую переработку.

В настоящее время объем годового производства лимонной составляет более 2 млн т, что делает ее одним из наиболее крупнотоннажных органических веществ получаемых биотехнологически. В качестве продуцентов для получения лимонной кислоты можно использовать большое количество бактерий, грибов и дрожжей. Однако для эффективного применения в промышленных масштабах они должны удовлетворять определенным требованиям. Важнейшие из них – высокая скорость роста биомассы и высокий выход целевого продукта, максимальное усвоение веществ из доступных питательных сред, устойчивость к постоянной микрофлоре, безопасность для людей и окружающей среды.

Обсуждение результатов

Для выщелачивания руд не обязательно использовать химически чистые карбоновые кислоты. Для этой цели перспективным является применение культуральной жидкости, образующейся в процессе производства лимонной кислоты с помощью гетеротрофных микроорганизмов, например микроскопических грибов *Aspergillus niger*. Культуральная жидкость представляет собой смесь лимонной, глюконовой, щавелевой кислот и неиспользованных углеводов. В зависимости от используемого штамма концентрация лимонной кислоты может варьироваться в пределах 50-90%. В данной работе использовали штамм гриба *Aspergillus niger* ВКПМ F-326, обеспечивающий до 93,4% лимонной кислоты от суммы образуемых органических кислот.

Культивирование продуцента проводили глубинным способом в колбах на качалке. Использована питательная среда следующего состава, г/дм³: 100 свекловичной мелассы или картофельного крахмала, 0,5K₂HPO₄, 0,5MgSO₄·7H₂O, 0,1 (NH₄)₂SO₄. Биохимическую активность

культуры *Aspergillus niger* оценивали по изменению кислотности среды в процессе культивирования. За 5-7 суток pH среды снижается с 6,5 до 2,3.

На накопление лимонной кислоты влияют тип и концентрация источника углерода. Были проведены эксперименты по использованию картофельного крахмала и свекловичной мелассы. Однако обнаружено, что концентрация лимонной кислоты в культуральной жидкости, полученной с использованием крахмала невелика, полученная пульпа трудно фильтруется, а извлечение никеля при выщелачивании не превышает 0,03%. На основании этих фактов в дальнейших исследованиях крахмал не использовали.

Выщелачиванию подвергали магнезиальную руду Буруктальского месторождения, следующего состава, %: 0,93 Ni, 0,098 Co, 16,7 Fe₂O₃, 0,1 Cu, 28 MgO.

Навеску руды массой 20 г приводили в контакт со 100 см³ культуральной жидкости. Выщелачивание проводили без подогрева и перемешивания в течение 2 недель. За это время pH раствора снизился до 4. Извлечение Ni, Co и Fe в раствор составило 8,69, 28,61 и 0,15 % соответственно.

Во время выщелачивания наблюдали рост мицелия в растворе над рудой. С помощью рентгено-флуоресцентного анализа определен состав мицелиальной пленки, %: 47,34 Fe, 28,56 Ni, 9,078 K, 3,631 Mn, 3,119 S, 2,7 Si, 2,545 P, 1,459 Ca, 0,757 Cu, 0/550 Zn, 0,169 Cr.

Заключение

Была продемонстрирована возможность выщелачивания бедной окисленной никелевой руды промпродуктами производства органических кислот. Прямое использование культуральной жидкости без дополнительных стадий очистки позволит снизить себестоимость пердела и повысить рентабельность потенциального производства.

Список литературы

1. ИТС 12-2019 Производство никеля и кобальта: Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям / Москва : Бюро НДТ. – 2019. – 195 с.
2. McDonald R. Atmospheric acid leaching of nickel laterites review: Part I. Sulphuric acid technologies/ R. McDonald, B. Whittington // Hydrometallurgy. – 2008. – V. 91. – P. 35-55.
3. Aryanhi F. Enhancing the Nickel Recovery of Morowali Nickel Laterite in Atmospheric Citric Acid Leaching / F. Aryanhi, R. Tri Jayanti // Proc. of the 2nd Faculty of Industrial Technology International Congress International Conference, Bandung, Indonesia, January 28-30, 2020. – P. 38-42.

4. Tzeferis P.G. Leaching of Nickel and Iron from Greek Non-Sulphide Nickeliferous Ores by Organic Acids / P.G. Tzeferis, S. Agatzini-Leonardou // Hydrometallurgy, 1994. – Vol. 36. – P. 345-360.

5. Hosseini Nasab Dissolution of Nickel and Cobalt from Iron-Rich Laterite Ores Using Different Organic Acids / Hosseini Nasab et al. // Journal of Mining & Environment, 2020. – Vol. 11. – №3. – P. 779-797.

УДК 622.7

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО МЕТОДА АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ ФЛОТАЦИОННЫХ РЕАГЕНТОВ НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ СВОЙСТВА УГЛЯ*

Александрова Т.Н., Прохорова Е.О.

*Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург*

Одним из вопросов в области переработки сырья является обогащение угля мелких классов, которые имеют достаточно высокую зольность, что негативно сказывается на дальнейших промышленных процессах. Для обогащения высокозольных углей мелких классов, как правило, используют методы флотации. Для эффективного отделения органической части от минеральной используются флотационные реагенты. Оценка закрепления реагентов на поверхности частиц исходит из законов термодинамики через анализ состояния свободной поверхностной энергии [1]. Используя составляющие свободной поверхностной энергии, возможна оценка поверхности через определение работ адгезии и когезии с определением коэффициента смачиваемости поверхности материала реагентами. Таким образом возможна оценка смачиваемости поверхности исследуемого материала.

Смачиваемость минеральной поверхности зависит от соотношения работы адгезии (W_a) – взаимодействия поверхности с молекулами воды, и работы когезии (W_k) – взаимодействия молекул воды между собой. Если W_a превышает W_k , то поверхность считается хорошо смачиваемой водой. Чем выше отношение W_a/W_k , тем лучше вода растекается по поверхности, образуя тонкий слой.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 23-47-00109)

Однако, высокое значение отношения работы адгезии к работе когезии может негативно сказаться на флотируемости минерала. Возможные виды смачивания поверхности водой представлены на рис. 1 [2].



Рисунок 1 - Возможные варианты смачивания поверхности (составлено авторами)

Работа адгезии может быть рассчитана по формуле, выведенной из уравнения межфазной энергии, где 1 и 2 соответствуют жидкости и поверхности твердого материала соответственно [3]:

$$W_a = 2 \cdot \sqrt{\gamma_1^D \cdot \gamma_2^D} + 2 \cdot \sqrt{\gamma_1^{SP} \cdot \gamma_2^{SP}},$$

где γ_1^D и γ_2^D – дисперсионные составляющие жидкости и твердой поверхности (1 и 2, соответственно); γ_1^{SP} и γ_2^{SP} – полярные составляющие жидкости и твердой поверхности (1 и 2, соответственно).

Работу когезии вычисляют по формуле:

$$W_k = 2\sigma_{жг} = 2(\gamma_1^D + \gamma_1^{SP}),$$

где $\sigma_{жг}$ - поверхностное натяжение жидкости (воды) на поверхности раздела жидкость-газ, мН/м.

Оценка смачиваемости производилась по отношению работы адгезии к работе когезии в качестве коэффициента смачивания:

$$k = \frac{W_a}{W_k} = \frac{\sqrt{\gamma_1^D \cdot \gamma_2^D} + \sqrt{\gamma_1^{SP} \cdot \gamma_2^{SP}}}{\gamma_1^D + \gamma_1^{SP}}$$

При применении депрессоров, которые стремятся минимизировать краевой угол смачивания θ , работа адгезии возрастает. Противоположное действие имеют собиратели, которые должны способствовать образованию несмачиваемой поверхности минерала, что влечет за собой увеличение краевого угла смачивания θ .

Исследование поверхностных характеристик проводилось на угле марки К с применением апольярных реагентов: дизельного топлива, веретенного масла и керосина.

Для оценки свободной поверхностной энергии применялся метод ОВРК при использовании дополнительной жидкости, что позволило получить более точные значения поверхностных характеристик материала [4, 5]. Результаты измерений и вычислений представлены на рис. 2.

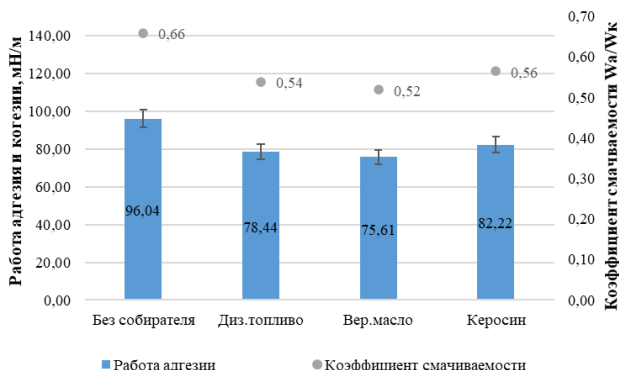


Рисунок 2 - Графическая интерпретация вычисления работы адгезии и коэффициента смачиваемости при применении аполирных собирателей (составлено авторами)

Анализ полученных данных выявил, что использование веретенного масла приводит к снижению работы адгезии между обработанной поверхностью и водой на 20,43 мН/м, а также к уменьшению коэффициента смачивания на 0,14. Полученные результаты свидетельствуют о более эффективном применении реагента веретенного масла при флотации.

Оценка поверхностных характеристик с применением термодинамического метода через анализ свободной поверхностной энергии и работы адгезии дает возможность понимания действия реагентов на поверхности, а также подбора более направленного действия реагентов и улучшения параметров флотируемости материалов.

Список литературы

1. Aleksandrova T.N.; Kuznetsov V.V.; Prokhorova E.O. Investigation of Interfacial Characteristics as a Key Aspect of the Justification of the Reagent Regime for Coal Flotation. Minerals 2025, 15, 76. DOI: 10.3390/min15010076
2. Крылов, А. Б. Поверхностное натяжение и связанные с ним явления: учеб-метод. пособие / А. Б. Крылов. – Минск: БГМУ, 2008 – 32 с.
3. Mohammadi-Jam S., Burnett D. J., Waters K. E. Surface energy of minerals–Applications to flotation //Minerals Engineering. – 2014. – Т. 66. – С. 112-118.
4. Chibowski E. Some problems of characterization of a solid surface via the surface free energy changes. Adsorption Science & Technology. 2017;35(7-8):647-659. DOI: 10.1177/0263617417704115
5. Georgiev, G.A.; Balushev, S.; Eftimov, P.; Bacheva, M.; Landfester, K. Addressing the Apparent Controversies Between the Contact Angle-Based Models for Estimation of Surface Free Energy: A CritiKYL Review. Colloids Interfaces 2024, 8, 62. DOI: 10.3390/colloids8060062.

БИОВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ ХВОСТОВ ФЛОТАЦИИ СУЛЬФИДНЫХ МЕДНО-ЦИНКОВЫХ РУД

Маклашова Е.Д., Маковская О.Ю.

*ФГАОУ ВО Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург*

Аннотация. В работе рассмотрена возможность применения *Acidithiobacillus ferrooxidans* при переработке лежалых хвостов флотации медно-цинковых руд месторождения Чебацьке.

Введение

Одним из основных видов рудного сырья, добываемого на Урале, являются медно-цинковые руды. При обогащении медно-цинковых руд неизбежно образуются хвосты флотации, выход которых достигает 70%. Среднее содержание в хвостах обогащения меди 0,21–0,3% и цинка 0,9–0,8%, причем в старогонных отвалах содержание цветных металлов может быть выше [1]. В настоящее время на Урале накоплено более 1,5 млрд тонн хвостов флотации, однако нет технологии, позволяющей эффективно выделять цветные металлы. При повторном обогащении хвостов дополнительное извлечение ценных компонентов часто не превышает 20–40% их содержания в этом продукте. Это связано с минералогическими особенностями хвостов флотации. Минеральные сростки в хвостах обогащения отличаются повышенной прочностью и тонким проращением. При невозможности раскрыть сростки выделяют сравнительно бедный концентрат, который потом направляют на металлургический передел [2]. Как правило, использование гидрометаллургических технологий предпочтительнее, поскольку они гибче и лучше адаптируются к особенностям сырья. Одним из перспективных направлений является биовыщелачивание. Микроорганизмы используются в металлургии достаточно давно. Бактерии позволяют перерабатывать упорное сырье, либо бедные и забалансовые руды, извлечение металлов из которых традиционными способами нерентабельно [3]. Практически для каждого месторождения сульфидных руд выявлено присутствие железозероокисляющих бактерий. *Acidithiobacillus ferrooxidans* является основным участником консорциумов микроорганизмов, используемых для промышленного извлечения меди. *A. ferrooxidans* – грамотрицательные палочки, экстремальные ацидофилы, мезофилы, обитают в почвах и рудничных водах. Особенностью данных бактерий является способность существовать в среде, бедной питательными веществами, но богатой

тяжёлыми металлами. Бактерии способны адаптироваться к различным минеральным субстратам.

Обсуждение результатов

Для данной работы источником микроорганизмов служила шахтная вода Левихинского месторождения медистых и серных колчеданов.

Культивирование проводили с использованием питательной среды следующего состава, г/дм³: 3,0 (NH₄)₂SO₄; 0,5 K₂HPO₄; 0,5 MgSO₄·7H₂O; 1,0 KCl; 0,01 Ca(NO₃)₂·4H₂O; 44,22 FeSO₄·7H₂O и 1 см³ 10 N серной кислоты. Температуру поддерживали в диапазоне 28-30°C. Признаками роста бактерий служат снижение значения pH, повышение концентрации железа (III) и повышение окислительно-восстановительного потенциала культуральной среды.

Выщелачиванию подвергали отвальные хвосты, полученные при флотационном обогащении руды месторождения «Чебачье». Состав хвостов, % 0,49 Cu, 0,78 Zn, 29,32 S, 1,13 г/т Au, 20,65 г/т Ag. Сульфидные хвосты флотации представляют собой тонкоизмельченный материал с содержанием фракции минус 0,074 мм 70–90%. Основной минеральный состав следующий, %: 57 пирит, 1,1 сфалерит, 0,8 халькопирит, 2,0 оксиды железа (лимонит, гематит, магнетит), 39,1 нерудные минералы (кварц, полевые шпаты и т. д.).

Выщелачивание меди и цинка из хвостов флотации производили в колбах Эрленмейера объемом 250 см³ при комнатной температуре. Навеску хвостов массой 10 г приводили в контакт со 100 см³ культуральной жидкости, имеющей pH 1,6. Периодически в растворе выщелачивания определяли концентрации меди и цинка. Результаты эксперимента представлены на рисунке.

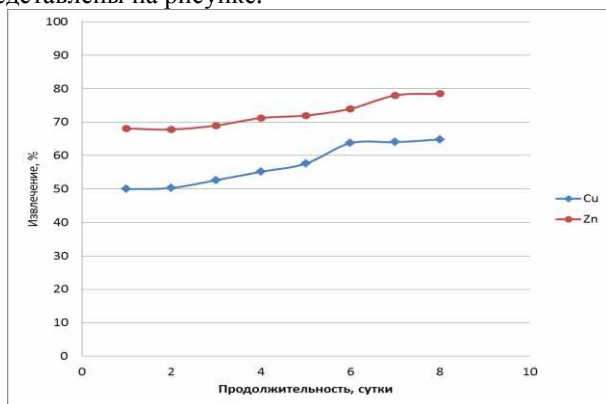


Рисунок – Результаты выщелачивания хвостов флотации

Из полученных данных следует, что выщелачивание меди и цинка из лежалых хвостов обогащения происходит достаточно эффективно. Несмотря на отсутствие подогрева и постоянного перемешивания за 8 суток достигнуто извлечение 65% меди и 78% цинка.

Заключение

Была показана возможность и эффективность применения метода биовыщелачивания для извлечения ценных компонентов из лежалых хвостов флотационного обогащения медно-цинковых руд. Дальнейшее разделение меди и цинка из полученных раствором возможно методами ионного обмена или жидкостной экстракции.

Предложенный способ биовыщелачивания может иметь экономическую целесообразность при использовании его в варианте кучного выщелачивания, не требующего дорогостоящей аппаратуры, а также за счет вовлечения в переработку больших объемов хвостов обогащения.

Список литературы

1. Бочаров, В.А. Основные направления решения проблем комплексной переработки пиритных хвостов флотации медно-цинковых руд /В.А. Бочаров, В.А. Игнаткина, Е.Л. Чантурия // «Цветные металлы». 2011. №12, С. 20-26.
2. Гусманов, Ф.Ф. Проблемы по формированию качества руды с увеличением глубины ведения горных работ и изменением сырьевой базы минерального сырья / Ф.Ф. Гусманов, А.О. Папунин // Сборник докладов Международной научно-практической конференции «Уральская горная школа – регионам». – Екатеринбург, 24–25 апреля 2017 года, С. 443-444.
3. Кондратьева, Т.Ф. Микроорганизмы в биогеотехнологиях переработки сульфидных руд / Т.Ф. Кондратьева, А.Г. Булаев, М.И. Муравьев – Москва: Наука, 2015. – 212 с.

УДК 622.7

КЛАССИФИКАЦИЯ И ОБЕСШЛАМЛИВАНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ СОВРЕМЕННЫМИ И ПЕРСПЕКТИВНЫМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ УСТРОЙСТВАМИ

Чеснова Е.С., Гончаров Я.А.

*Российский государственный геологоразведочный университет
имени Серго Орджоникидзе, г. Москва*

Обработка минерального сырья (сгущение, классификация, улавливание шламов) является важной и непростой проблемой. Ее решение, связанное с высоким выходом тонкодисперсных фракций (шламов),

улучшает технологию обогащения минерального сырья и увеличивает выход ценных компонентов, что в конечном итоге снижает себестоимость концентрата.

На практике эксплуатации в различных областях промышленности, классификационные аппараты могут одновременно выполнять функции сгустителя и обезвоживателя, и подразделяются на две группы [1, 2]:

- устройства для получения водо-песчаной смеси с весовой влажностью 20–35%, что соответствует заполнению водой всего порового пространства зернистого материала; к ним относятся гидроциклоны, гравитационные сгустители, дуговые сита, конические грохоты и пульсационные колонны;

- устройства для глубокого обезвоживания, в которых осуществляется удаление части поровой воды, влажность конечного продукта находится в пределах от 7 до 22%; в них обязательно применяется механическое движение его частей: центрифуги, специальные ленточные транспортеры, а также спиральные классификаторы.

Ниже рассматривается применение специфических конструктивных особенностей некоторых классификационных аппаратов.

Распространенными классифицирующими аппаратами, разделяющими песчано-шламовые частицы на готовый (слив) и возвратный (пески) продукт, являются механические спиральные классификаторы [2]. Они работают по принципу разделения исходного питания в горизонтальном потоке на крупнопесковую фракцию и готовый мелкий слив (крупностью 0,1 мм). Разделение осуществляется по величине стесненного падения минеральных зерен. Смесь частиц различной крупности и плотности осаждается слоями в наклонном корыте, который передвигается вверх спиралью и механически разгружается в приемник.

Спиральные классификаторы используются в цикле измельчения, разделения пульпы, сепарации песков и получения слива класса $-0,074$ мм до 80%. Они применяются на Навоинском ГМК при гидрометаллургической переработке в течение многих лет эксплуатации и обеспечивают заданные технологические показатели.

Основными режимными контролируемыми параметрами технологического процесса являются: площадь зеркала пульпы (управляется углом наклона корыта и высотой сливного потока) и частота вращения спиралей классификатора.

Это производство является крупнотоннажным. Например, на одном из блоков золотоизвлекательного завода Навоинского ГМК нагрузка по твердому на каждый спиральный классификатор составляет 230 т в час (5520 т в сутки).

Если анализировать эффективность этого устройства с колонным аппаратом обособленно только по обезвоживанию (влажность песков

на выходе), то по мнению специалистов, спиральным классификаторам нет альтернативы по этому показателю. Однако, по эффективности классификации пульсационные колонны не уступают (а нередко превосходят) спиральным классификаторам и степень обезвоживания у последних выше, хотя не всегда это необходимо по последующим технологическим факторам.

Многолетний опыт эксплуатации спиральных классификаторов выявил и определенные недостатки, связанные с относительно высокими эксплуатационными затратами, трудностями и неудобствами при ремонте оборудования, ввиду больших производственных мощностей.

Колонный аппарат с пульсационным перемешиванием фаз является полифункциональным устройством, которое может отделять тонкодисперсные частицы (шламы, глины, илы) при очистке загрязненных пульп, а также при обработке минерального сырья с повышенным содержанием токсичных веществ [3, 4].

Аппарат включает в себя одну или несколько вертикальных колонн в зависимости от функционального предназначения, секционированных перфорированными тарелками. Исходная суспензия или пульпа поступает сверху, а восходящим потоком снизу – вода со сжатым воздухом и определенной скоростью. С помощью пульсатора создаются возвратно-поступательные колебания всего вертикального потока.

В результате гидродинамики многократных турбулентных воздействий восходящего потока промывочной воды с изменением его направлений на твердые частицы, на перфорированных тарелках происходит их расслоение по гидравлической крупности. В условиях противотока глинистые фракции выводятся в верхний слив, а песок разгружается снизу.

Пульсационные колонны в течение нескольких лет успешно применяются в гидрометаллургии Навоинского ГМК при переработке урановых руд в операциях противоточного выщелачивания и промывки песков (8 колонных аппаратов диаметров $D=1800$ мм и высотой $H=11$ м). Они также использовались в Желтых Водах с $D=1800$ мм и $H=16$ м, в Германии $D=2000$ мм, Глазове и Кирово-Чепецке с диаметрами соответственно 1200 и 800 мм.

В отличие от спиральных классификаторов, в пульсационных колоннах не происходит истирание контактных тарелок и стенок аппарата, так как частицы твердой фазы перемешиваются в жидкости. Поэтому, по мнению специалистов, при длительной эксплуатации отпадает надобность в значительных эксплуатационных затратах, связанных с ремонтными работами.

Совершенствование аппарата возможно при осаждении песков в нижней камере под действием гидростатического столба жидкости при

разгрузке аппарата, которая обычно производится эрлифтом и далее самотеком поступает на другую стадию. Более технологичным вариантом, по нашему мнению, может являться транспортно-загрузочный аппарат (питатель), патент РФ № RU 93043138 А [5], который может эффективно заменить данный процесс.

В автономном режиме питатель может осуществлять следующие комплексные технологические операции: сгущение загружаемой пульпы, разделение (классификация) песчано-шламовых фракций по требуемому граничному зерну с определенной гидравлической крупностью и сам процесс трубопроводной подачи концентрированной гидросмеси к объекту.

Для анализа эффективного технологического передела минерально-го сырья при эксплуатации аппаратов:

- содержание твердого в сливе аппарата должно быть не менее 20% по весу;
- разделение твердых фракций должно быть по классу 0,1 мм;
- разгрузка песков должна быть непрерывной и равномерной;
- транспортирование готового продукта должно быть надежным и простым, позволяющим изменять соотношение твердой и жидкой составляющих;
- управление качеством слива должно иметь возможность контроля;
- размеры аппарата, металлоемкость, энергоемкость должны быть по возможности минимальны;
- обслуживание, ремонт и доступ к изнашиваемым узлам и деталям должны быть простым и доступным.

Список литературы

1. Андреева Г.С., Горюшкина С.Я., Небера В.П. Переработка и обогащение полезных ископаемых россыпных месторождений. М., «Недра», 1992, стр. 66-91.
2. Иванков С.И. Обогащение полезных ископаемых. М., МГТА, 2000, стр. 39-45.
3. Тимошенко С.В. Обоснование технологии освоения подводных россыпных месторождений с обесшламливанием минерального сырья пульсационными потоками // дисс. канд. техн. наук, 2002, 150 с.
4. Корпачева С.М., Рагинский Л.С., Муратов В.М. Основы теории и расчета горизонтальных пульсационных аппаратов и пульсаторов. – М., Атомиздат, 1981г.
5. Дробаденко В.П., Луконина О.А., Малухин Н.Г. патент RU 93043138А Устройство для классификации и обогащения полезных ископаемых, 1996.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРКОЛЯЦИОННОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ МЕДИ И ЗОЛОТА АКТИВИРОВАННЫМИ РАСТВОРАМИ ИЗ СУЛЬФИДНЫХ ХВОСТОВ ФЛОТАЦИИ

Самборская Т.С., Кирильчук М.С.

*ИГД ДВО РАН обособленное подразделение
ХФИЦ ДВО РАН, г. Хабаровск*

Медно-золото-железородное месторождение «N» является одним из крупнейших в РФ, находящихся в разработке с перспективами дальнейшего наращивания производственной мощности, которые могут определяться не только эффективностью процессов дальнейшей переработки руд, но и вовлечением в промышленный цикл хвостов флотации. Хвосты контрольной флотации руд этого месторождения, с позиций стандартных подходов к технологии их дальнейшей переработки, имеют ряд особенностей, обуславливающих сложность получения флотоконцентрата с приемлемыми показателями при дальнейших пересчетах.

Особенностью месторождений комплексных руд, разрабатываемых в ДФО, является концентрирование благородных металлов внутри рудных минералов-носителей в форме инкапсулированных включений, кластеров и отдельных атомов, что предопределяет их упорность как для обогащения, так и последующего гидрометаллургического передела и приводит к значительным потерям металлов в хвостах и кеках. Тем более, сложно извлечь металлы таких форм нахождения при использовании физико-химических геотехнологий - кучного и подземного выщелачивания [1,2].

Нами были проведены серии экспериментов по доизвлечению золота, серебра, меди и железа из хвостов контрольной флотации руд данного месторождения. Пробы были отобраны заказчиком и переданы в лабораторию для исследований. Цель исследования – оценка возможности переработки хвостов контрольной флотации методами агитационного и кучного выщелачивания. Учитывая современные требования к обеспечению минимизации экологического ущерба при переработке техногенного минерального сырья, при проведении работ использовались бесцианидные выщелачивающие растворы.

Экспериментальные исследования процессов агитационного и перколяционного выщелачивания меди и золота осуществлялись стандартными и активированными хлоридными растворами. В качестве компонента стандартного раствора использовался порошковый гипохлорит натрия. Активированный гипохлоритно—хлоридный раствор готовился

путем электролиза его водного раствора хлорида натрия определенной концентрации.

Исследования выполнялись в ЦКП лаборатории обогащения минерального сырья Института горного дела Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Были проведены комплексные исследования проб хвостов контрольной флотации руд этого месторождения с позиций применимости их переработки в схемах кюветного и/или кучного выщелачивания. При этом определялись их основные геотехнологические особенности, на основе минералого-геохимических, аналитических и электронно-микроскопических исследований проб и экспериментов по выщелачиванию из них ценного компонента.

Результаты исследования гранулометрического состава пробы «хвосты контрольной флотации» представлены в табл. 1.

Таблица 1

Гранулометрический состав пробы «хвосты контрольной флотации»

Класс крупности, мм	Выход	
	г	%
-01+0,071	19,00	3,86
-0,071+0,04	45,00	9,15
-0,04+0	428,00	86,99
Итого	492,00	100,00

Проба хвостов контрольной флотации представляет собой минеральное сырье техногенного происхождения, содержащее в промышленных концентрациях такие компоненты как медь и золото, а также в качестве сопутствующего компонента – серебро (табл. 2).

Результаты входного анализа пробы на содержание золота, серебра, меди, железа, серы общей и серы сульфатной представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты химического анализа пробы

Название пробы	Au, г/т	Ag, г/т	Cu, %	Fe _{общ.} , %	S _{общ.} , %	S _{SO₄} , %	Ss, %	As, г/т
Хвосты флотации	1,07	3,58	0,20	16,73	11,72	0,49	11,13	1866

По данным результатов химического анализа можно увидеть преобладающие присутствие серы сульфидной. Основным ценным компонентов является золото, при этом содержание меди также представляет промышленный интерес.

Определение минеральных форм меди выполнялось в соответствии с ГОСТ 33207-2014. Методика основана на селективном растворении суммы окисленных (кислородсодержащих) минералов меди и групп

вторичных и первичных минералов меди. Определение содержаний меди в полученных растворах проводилось атомно-абсорбционным методом.

Результаты фазового анализа на медь в пробе «хвосты контрольной флотации» представлены в табл. 3.

Таблица 3

Минеральные формы меди в пробе «хвосты контрольной флотации»

Название пробы	Водорастворимые сульфаты меди	Свободные окисленные минералы меди	Вторичные окисленные минералы меди	Вторичные сульфиды	Первичные сульфиды
Хвосты флотации, %	0,00	30,57	0,00	50,78	18,65

Из таблицы можно сделать вывод, что 51% меди находится во вторичных минералах.

Учитывая наличие сложноизвлекаемых форм нахождения металлов в хвостах, для их выщелачивания необходимо, до ввода в минеральную массу растворов с комплексообразователями, осуществлять предварительную обработку сильным окислителем - активным хлором.

Предварительная электролизная обработка низкоконцентрированным раствором активного хлора обеспечивает окисление сульфидов, соответственно повышает общее извлечение ценных компонентов, а также улучшает кинетику и динамику выщелачивания. По результатам анализов, извлечение меди в раствор составило свыше 75%.

При проведении исследований процессов выщелачивания золота и меди (после окисления) из проб хвостов контрольной флотации руд месторождения использовались не только стандартные, но и активированные растворы различных реагентных комплексов.

Выводы. Для выщелачивания ценных компонентов из хвостов флотации не целесообразно использовать в качестве реагентов цианиды, не только по экологическим, но и по технологическим соображениям. В результате лабораторных исследований предокисления активными хлоридными растворами (с использованием активного хлора) получены положительные результаты, позволяющие считать, что при переработке сульфидных хвостов флотации могут быть использованы схемы кучного и кюветного выщелачивания меди и др. металлов, в том числе сопутствующих сложноизвлекаемых форм золота. На основе этих исследований разработаны способы непосредственного выщелачивания металлов из сульфидных хвостов флотации с использованием рабочих растворов, прошедших предварительную обработку для формирования в них активного хлора и других высокоактивных окислителей. Показана возможность эффективной переработки хвостов флотации одной из ОФ ДФО с высоким сульфидным модулем методом стадийного выщелачивания

с активационным предокислением сульфидной матрицы. Таким образом, подтверждена перспективность переработки хвостов контрольной флотации этого месторождения.

Список литературы

1. Секисов А.Г., Лавров А.Ю., Рубцов Ю.И., Рассказова А.В., Конарева Т.Г. Физико-химические геотехнологии освоения месторождений дальневосточного федерального округа. Чита, 2021.

2. Секисов А.Г., Рассказова А.В., Конарева Т.Г. Реагентные комплексы и их применение при извлечении золота из сложных природных образований // Золотодобывающая промышленность. 2022. №2 (110). С. 24-27.

УДК 622.765

ФЛОТАЦИЯ МЕДНО-НИКЕЛЕВОЙ РУДЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОЛИМЕРНЫХ ДЕПРЕССОРОВ

**Лавриненко А.А., Кузнецова И.Н., Лусинян О.Г.,
Корзинова А.С., Гольберг Г.Ю.**

ИПКОН РАН, г. Москва

Вовлечение в переработку медно-никелевых руд, в состав которых входят магнийсодержащие силикатные минералы (МС), обуславливает актуальность задачи поиска новых композиций реагентов, обеспечивающих эффективную депрессию МС без существенного снижения извлечения в концентрат меди и никеля, так как магний значительно увеличивает затраты энергии на пирометаллургическую переработку концентрата.

Для депрессии МС применяют полимерные анионоактивные реагенты, при адсорбции которых на поверхности МС уменьшается краевой угол смачивания и возрастает отрицательный электрокинетический потенциал. Это, в свою очередь, приводит к увеличению отталкивания частиц МС и пузырьков воздуха в процессе флотации руды, и, соответственно, снижает извлечение МС.

В практике обогащения руд наибольшее распространение получили полисахаридные депрессоры, в частности, карбоксиметилированные производные крахмала и целлюлозы (соответственно КМК и КМЦ) [1,2]. Есть сведения, указывающие на перспективность применения в качестве депрессоров полимерных реагентов, содержащих сульфогруппы. Так, известно о применении лигносульфонатов в композиции с ионами Ca^{2+} для депрессии талька [3,4]. Также исследовано влияние полистиролсульфонатов натрия (ПСС) на мономинеральную флотацию талька [5]. Но до настоящего времени остается неисследованным влияние

ПСС на флотацию медно-никелевой руды и сравнение эффективности депрессирующего эффекта этого класса реагентов с КМК и КМЦ.

Цель работы: определение влияния полистиролсульфонатов в сравнении с карбоксиметилцеллюлозой на депрессию магнийсодержащих силикатов при флотации медно-никелевой руды.

Исследования проводили с пробой медно-никелевой руды Кольского полуострова. Элементный состав руды, по данным рентгенофлуоресцентного анализа: Si – 17,2%, Mg – 15,8%, Fe – 12,9%, S – 1,13%, Ni – 0,44%, Cu – 0,25%. Данные рентгенофазового анализа показали наличие следующих минералов: антигорита, амфиболов, оливина, пентландита, виоларита, пирротина, халькопирита, халькофиллита и других.

Лабораторные опыты по флотации руды выполняли с последовательной подачей реагентов: депрессоров; собирателя – бутилового ксантогената (БКК); пенообразователя (БТФ). В качестве депрессоров применяли лабораторные образцы ПСС с молекулярной массой (ММ) от 89000 до 208000 кг/кмоль. Для сравнения использовали выпускаемый промышленностью образец КМЦ марки ПАЦ-Н с ММ порядка 116000 кг/кмоль. В качестве вспомогательного депрессора применяли $MgCl_2$.

По результатам предварительных опытов было выявлено следующее:

- при флотации без депрессоров наибольшие значения извлечения меди и никеля достигаются при расходах БКК – 112 г/т, БТФ – 84 г/т;
- значение ММ исследованных образцов ПСС практически не влияет на извлечение и содержание меди и никеля в концентрате;

- наибольшие значения эффективности флотации руды по Ханкоку-Луйкену достигаются при расходах ПСС и ПАЦ-Н соответственно 700 и 420 г/т;

- добавление $MgCl_2$ с расходом 7 г/т перед подачей полимерного депрессора дополнительно снижает содержание магния в концентрате примерно на 1 % за счёт гидрофилизации поверхности МС ионами Mg^{2+} .

В таблице представлены данные по флотации руды с композициями исследованных депрессоров: 1 – без депрессоров; 2 – ПСС, 700 г/т; 3 – ПАЦ-Н, 420 г/т; 4 – $MgCl_2$, 7 г/т + ПСС, 700 г/т; 5 – $MgCl_2$, 7 г/т + ПАЦ-Н, 420 г/т.

Таблица

Результаты опытов по флотации медно-никелевой руды с применением композиций депрессоров

№ композиции	Выход концентрата, % (γ)	Содержание магния в концентрате, % (β_{Mg})	Извлечение в концентрат, %	
			меди (ε_{Cu})	никеля (ε_{Ni})
1	2	3	4	5
1	45,2	16,7	89,6	85,5
2	49,0	16,0	89,1	85,1

продолжение таблицы

1	2	3	4	5
3	27,4	16,3	81,5	76,6
4	30,2	14,7	83,4	76,5
5	24,8	15,6	81,7	74,4

Из таблицы видно, что наименьшие значения γ , составляющие примерно 27 и 25%, достигаются применением соответственно ПАЦ-Н и сочетанием MgCl_2 с ПАЦ-Н, что указывает на высокую депрессирующую способность последнего. В то же время ПСС в случае его индивидуального применения даже несколько увеличивает значение γ , что может быть связано с проявлением некоторой флокулирующей способности этого реагента.

При предварительном добавлении MgCl_2 для ПСС значение γ уменьшается с 49 до 30%, а для ПАЦ-Н – примерно с 27 до 25%. То есть разница в значениях γ с применением MgCl_2 и полимерного реагента по сравнению с индивидуальным применением последнего для ПСС составляет 19% против 2% для ПАЦ-Н. Это, по-видимому, обусловлено тем, что сульфогруппы ПСС притягиваются к поверхности минералов, модифицированных ионами Mg^{2+} , сильнее, чем карбоксильные группы ПАЦ-Н. Также видно, что композиция № 4 (MgCl_2 и ПСС) обеспечивает наименьшее содержание магния в концентрате: 14,7% против 16,7% для №1 (без депрессоров) и 15,6% для №5 (MgCl_2 и ПАЦ-Н). В целом, содержание магния в концентрате снижается примерно на 2%.

Из представленных в таблице данных видна тенденция к снижению значений извлечения с применением депрессоров. При этом ПСС снижает ε в меньшей степени, чем ПАЦ-Н, что следует из сравнения композиций №№ 2,3 и №№ 4,5: при индивидуальном применении депрессоров ПСС снижает значения ε_{Cu} и ε_{Ni} по сравнению с опытом без депрессоров соответственно на 0,5 и 0,4% против соответственно 8,1 и 8,9% для ПАЦ-Н при его эффективном расходе. При предварительном добавлении MgCl_2 для ПСС извлечение меди и никеля по сравнению с опытом без депрессоров снижается соответственно на 6,2 и 9,0%; для ПАЦ-Н – соответственно на 8 и 11%.

Выводы.

1) Установлено, что с точки зрения снижения выхода концентрата ПСС оказывает в целом более слабое депрессирующее действие на МС, чем ПАЦ-Н. Однако, при использовании ПСС содержание магния в концентрате примерно на 1% ниже по сравнению с ПАЦ-Н, что снижает энергозатраты при последующей пирометаллургической переработке концентрата. При этом ПСС обеспечивает более высокое извлечение меди (до 7%) и никеля (до 8%) в концентрат по сравнению с ПАЦ-Н, так

как, в отличие от полисахаридов, не образует хелатные комплексы с указанными металлами.

2) Установлено, что наиболее эффективная депрессия МС достигается последовательным применением хлорида магния с расходом 7 г/т и ПСС с расходом 700 г/т. При этом содержание магния в концентрате снижается на 2% по сравнению с флотацией без депрессоров, что обосновывает целесообразность применения указанной композиции.

Список литературы

1. Красавцева Е.А., Горячев А.А. Обзор способов депрессии талька при флотации медно-никелевых руд // Труды Кольского научного центра РАН. – 2019, № 6 (1). – С. 149-154.

2. Runpeng Liao, Jiushuai Deng, Hao Lai, Jiaozhong Cai, Xi Zhang, Shuming Wen, Hua Yang, Jianying Deng, Jian Fang and Xuesong Sun. An Overview of Technologies and Selective Depressing Agents for Separating Chalcopyrite and Talc // International Journal of Metallurgical & Materials Engineering. – 2018. – V. 4, № 146.

3. Yafeng Fu, Zhanglei Zhu, Jin Yao, Huili Han, Wanzhong Yin, Bin Yan. Improved depression of talc in chalcopyrite flotation using a novel depressant combination of calcium ions and sodium lignosulfonate // Colloids and Surfaces A. – 2018, № 558. – P. 88-94.

4. Qiongyin Mai, Hanyu Zhou, Leming Ou. Flotation Separation of Chalcopyrite and Talc Using Calcium Ions and Calcium Lignosulfonate as a Combined Depressant // Metals. – 2021. – V. 11, № 651.

5. Лавриненко А.А., Кузнецова И.Н., Гольберг Г.Ю. Депрессия флотоактивных силикатов с применением полимерных анионоактивных реагентов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2024, № 6. – С. 160-167.

УДК 622.7

ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РЕАГЕНТНОГО РЕЖИМА ПРИ ФЛОТАЦИИ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ РУД

Вертиев С.А.

*Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург*

Современные тенденции в области переработки полезных ископаемых свидетельствуют об ухудшении качества перерабатываемых руд. Растущий спрос на мировом рынке на большинство видов сырья приводит к постепенному истощению легкообогатимых богатых руд и диктует необходимость вовлечения в переработку более бедных и сложных в обогащении видов сырья, требующих повышения комплексности

и экологичности применяемых технологий обогащения. Кроме того, наращивание темпов обогащения бедных типов руд приводит к накоплению отвалов пустой породы, негативно влияющих на экологию, а изменяющиеся кондиции на многие типы руд позволяют рассматривать техногенные месторождения как перспективный вид исходного сырья.

Большое значение в процессе создания устойчивой экономики Российской Федерации имеет повышение комплексности переработки минеральных ресурсов и вовлечение в переработку накопленных отходов переработки полезных ископаемых [1]. В условиях растущей нестабильности на мировых рынках важное значение приобретает снижение зависимости России от импорта стратегически важных видов сырья. На фоне этого особую важность приобретает поиск потенциальных источников получения редких металлов.

Большинство месторождений характеризуются сравнительно невысокими значениями содержания РЗМ [2]. Так, руды Ловозерского месторождения лопаритовых руд имеет содержание редкоземельных металлов в пределах 0,9-1,0%. Кроме того, непростой минералогический состав комплексных месторождений РФ требует усложненных технологических схем с большим количеством операций.

Цель исследования заключается в систематизации данных о возможности применения флотационного обогащения для извлечения ценных компонентов из месторождений редкометалльных руд и определение реагентного режима, обеспечивающего наиболее полное извлечение полезных компонентов в концентраты.

Среди методов обогащения наиболее перспективным для переработки сложных типов руд является флотация, позволяющая добиться высокой селективности разделения труднообогатимых руд за счет широких возможностей регулирования поверхностных свойств минералов современными реагентами различных типов. В работе [3] отмечена недостаточная эффективность комплексной технологии переработки лопаритовых руд Ловозерского ГОКа, не включающих в себя процессы флотации, и обоснована возможность получения кондиционного нефелинового концентрата из гравитационных хвостов Ловозерского ГОКа с применением флотационных и магнитно-флотационных схем обогащения.

Традиционный подход при флотационном извлечении редких металлов из различного сырья заключается в применении жирнокислотных собирателей, в силу преобладания в их составе оксидных форм ценных компонентов. Нахождение в составе руды флотационноактивных силикатов приводит к тому, что традиционные реагентные режимы с применением низкоселективных жирнокислотных собирателей не всегда позволяет обеспечить требуемое качество получаемого концентрата. Одним из перспективным путей повышения качества редкометалльных

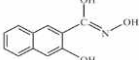
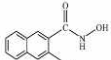
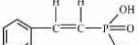
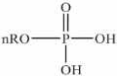
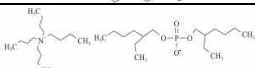
концентратов с применением технологий, основанных на флотации, является повышение селективности собирателя за счёт добавления других химических веществ. Получаемые в результате собирательные смеси могут обеспечивать требуемую селективность за счет синергизма отдельных собирателей между собой.

Сочетания реагентов, применяемых в составе собирательной смеси, могут иметь крайне разнообразный характер, но большую часть из них можно классифицировать на две большие группы: смеси анионных и катионных ПАВ, смесь анионных и неионогенных ПАВ [4].

Однако собирательные смеси не всегда позволяют получить концентрат товарных марок. Поэтому весьма перспективными видами реагентов собирателей могут выступать соединения, способные образовывать с редкими металлами комплексные соединения. Так в современной практике обогащения руд, содержащих в своем составе РЗМ, широко используются гидроксамовые кислоты, обеспечивающие высокие показатели при флотационном извлечении редких металлов в концентраты [5]. В табл. приведены примеры различных классов химических веществ, способных эффективно флотировать редкометалльные руды.

Таблица 1

Реагенты-собиратели редкометалльных руд

Класс веществ	Наименование	Молекулярная/ структурная формула
Амиды	N-гидроксифталемид	
Гидроксамовые кислоты	3-гидрокси-2-нафтилгидроксамовая кислота	
	3-гидрокси-2-нафтилметоксиксамовая кислота	
	Бензогидроксамовая кислота	
Соединения фосфоновых и фосфорных кислот	Стирилфосфоновая кислота	
	Моно- и диалкиловые эфиры фосфорной кислоты (Реагент Синтаф)	
	Лаурил фосфат	
	2-этилгексилфосфат	
	Ди (2-этилгексил) фосфат тетрабутиламмония	

Таким образом, на основе анализа и систематизации данных определены основные направления совершенствования реагентного режима: синтез новых селективно действующих реагентов, подбор комбинации собирателей, позволяющих повысить извлечение ценного компонента за счет синергизма, а также подбор депрессоров, способствующих снижению извлечения в концентрат флотоактивной пустой породы.

Научный руководитель: зав. каф. ОПИ, профессор, д.т.н. Александрова Т.Н.

Список литературы

1. Александрова Т.Н. Комплексная и глубокая переработка минерального сырья природного и техногенного происхождения: состояние и перспективы //Записки Горного института. – 2022. – Т. 256. – С. 503-504.
2. Быховский Л.З., Потанин С.Д., Чеботарева О.С. Минерально-сырьевая база редких металлов //Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2017. – №4. – С. 28-37.
3. Черноусенко Е.В., Вишнякова И.Н., Митрофанова Г.В., Марчевская В.В., Компанченко А.А. Исследование реагентных режимов флотационного получения нефелинового концентрата из хвостов обогащения лопаритовых руд // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2024. – 5. – С. 181-190.
4. Александрова Т.Н., Элбэндари А.М. Повышение эффективности переработки фосфатных руд флотационным методом //Записки Горного института. – 2021. – Т. 248. – С. 260-271.
5. Митрофанова Г.В. и др. Опробование комплексобразующего реагента на основе гидроксамовых кислот при флотации минералов переходных металлов //Вестник Кольского научного центра РАН. – 2019. – №2. – С. 95-104.

УДК 622.7

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СВЧ ОБРАБОТКИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УГЛЕРОДИСТОЙ БЛАГОРОДНОМЕТАЛЛЬНОЙ РУДЫ

Александрова Т.Н., Абурова В.А.

*Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург*

Снижение качества минерального сырья, поступающего на переработку, приводит к необходимости разработки новых технологических решений и совершенствованию существующих. Поскольку на рудоподготовительный передел приходится значительные капитальные затраты

актуальным является его совершенствование с целью изменения прочностных характеристик минерального сырья и повышения раскрытия сростков минералов для минимизации потерь ценных компонентов при дальнейшем обогащении [1,2]. На основе анализа современных научных исследований по СВЧ воздействию показана возможность применения данного метода для изменения прочностных параметров сырья за счет различия в восприимчивости рудных и породообразующих минералов [3,4]. Содержание в рудах минералов восприимчивых к СВЧ излучению способствует большему разрушению и созданию как микро-, так и макротрещин по причине возникающей разницы температур между рудными и породообразующими минералами [5,6]. Проведение количественной оценки изменения прочностных параметров возможно с использованием тестов падающего груза, по определению рабочего индекса стержневого и шарового измельчения Бонда и т.д.

В качестве объекта исследования выбрана углеродистая благороднометаллическая руда, характерной особенностью которой является тонкая вкрапленность золота в минералы-концентраты, а также наличие сорбционно-активного по отношению к растворенным золоту и серебру органического углеродистого вещества. Пирит и арсенопирит являются основными рудными минералами. Основными минералами породы являются кварц, кальцит, хлорит, альбит, мусковит и т.д. Целью исследования является установление возможности применения СВЧ воздействия для изменения прочности углеродистой благороднометаллической руды.

Для оценки изменения прочностных характеристик за счет воздействия проводился тест падающего груза на установке фирмы JKTech Pty Ltd модель JK Drop Weight Tester на материале до и после обработки. Параметр абразивности t_d определялся на образцах до и после воздействия после измельчения в специальной барабанной мельнице. СВЧ обработка проводилась в микроволновой печи фирмы LG Smart Inverter с диапазоном варьирования мощности от 100 до 1000 Вт. Температура нагрева образцов в процессе воздействия определялась при помощи лазерного пирометра FinePower DIN21H с диапазоном изменения температуры от -50 до 1100°C.

Для установления режимных параметров СВЧ обработки углеродистой благороднометаллической руды проведены исследования влияния варьирования мощности воздействия от 200 до 800 Вт и времени от 0,5 до 2 минут на образцы всех классов крупности, отбираемых для проведения тестирований. Выбор мощности воздействия перед проведением теста падающего груза производился на основании требований по отбору образцов без наличия видимых трещин. Анализ полученных результатов позволил установить, что СВЧ обработка при мощности более 400 Вт приводит к образованию макротрещин, плавлению и окислению

сульфидных минералов в исследуемых образцах при времени воздействия от 0,5 до 1 минуты. При мощности 400 Вт и времени обработки 2 минуты в образцах углеродистой благороднометалльной руды не происходило образование видимых трещин, что позволяет обосновать данные режимные параметры для дальнейшего проведения тестирований.

Проведена количественная оценка полученных значений параметров $A \cdot b$ и t_a для углеродистой благороднометалльной руды до и после СВЧ обработки при мощности 400 Вт и времени равном 2 минутам. Результаты представлены на рисунке.

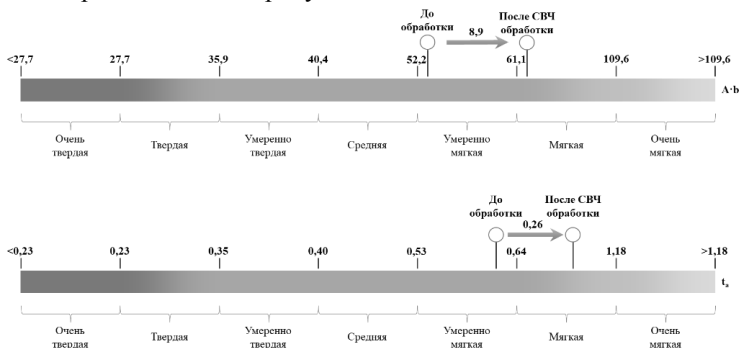


Рисунок - Результаты количественной оценки влияния СВЧ воздействия на значения параметра $A \cdot b$ и t_a углеродистой благороднометалльной руды

Анализ полученных результатов, представленных на рисунке, позволяет установить, что СВЧ обработка исследуемой руды способствует изменению значения $A \cdot b$ на 8,9 ед. Наблюдается переход исследуемой руды из категории умеренно мягкой в мягкую. Выявлено, что за счет воздействия достигается изменение значения параметра абразивности t_a на 0,26 ед. при переходе из категории умеренно мягкой в мягкую.

В результате проведенных исследований обоснованы режимные параметры СВЧ обработки углеродистой благороднометалльной руды: мощность 400 Вт и время воздействия 2 минуты. На основе интерпретации полученных данных подтверждена возможность применения СВЧ воздействия для изменения прочностных параметров исследуемой руды из категории умеренно мягкой в мягкую.

Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда (проект № 23-47-00109).

Список литературы

1. Aleksandrova T.N., Nikolaeva N.V., Afanasova, A.V., Romashev A.O., Aburova V.A., Prokhorova, E.O. Extraction of Low-Dimensional Structures

of Noble and Rare Metals from Carbonaceous Ores Using Low-Temperature and Energy Impacts at Succeeding Stages of Raw Material Transformation. Minerals. 2023. Vol. 13. №1. DOI: 10.3390/min13010084.

2. Николаева Н.В., Каллаев И.Т. Особенности процесса измельчения медно-молибденовых руд. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2024. №1. С. 52–66. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_0_52.

3. Pressacco M., Kangas J.J.J., Saksala T. Numerical modelling of microwave irradiated rock fracture. Minerals Engineering. 2023. Vol. 203. P. 108318. DOI: 10.1016/j.mineng.2023.108318.

4. Haque K.E. Microwave energy for mineral treatment processes - A brief review. International Journal of Mineral Processing. 1999. Т. 57. №1. pp. 1-24. DOI: 10.1016/s0301-7516(99)00009-5.

5. Batchelor A.R., Buttress A.J., Jones D.A., Katrib J., Way D., Chenje T., Stoll D., Dodds C., Kingman S.W. Towards Large Scale Microwave Treatment of Ores: Part 2 – Metallurgical Testing. Minerals Engineering. 2017. Vol. 111. pp. 5–24. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.05.003.

6. Teimoori K., Cooper R. Multiphysics Study of Microwave Irradiation Effects on Rock Breakage System. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2021. Vol. 140. P. 104586. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104586

УДК 622.7

ПЕРЕРАБОТКА ЛЕЖАЛЫХ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД С ИЗВЛЕЧЕНИЕМ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУЧЕНИЕМ КРИСТАЛЛОВ СУЛЬФАТА ЖЕЛЕЗА

Дубровина В.Н.¹, Горячев А.А.^{1,2}, Лапин М.Д.¹, Невзорова Ю.В.¹

¹ИППЭС КНЦ РАН, ²ЦНМ КНЦ РАН, г. Анапты

Аннотация

Рассмотрена возможность переработки лежалых хвостов обогащения медно-никелевых руд с извлечением цветных металлов и получением кристаллогидратов сульфата железа. Для извлечения цветных металлов предложен метод кучного биовыщелачивания предварительно гранулированных хвостов. В качестве связующих компонентов при грануляции были выбраны 30%-ый раствор серной кислоты, бактериальный раствор *Acidithiobacillus ferrooxidans* и поливинилацетатный клей (ПВА). Результаты показали обратную зависимость между прочностью гранул и уровнем извлечения металлов. Максимальные концентрации металлов на стадии кучного биовыщелачивания отмечены для гранул, приготовленных с использованием серной кислоты. Для получения

кристаллогидратов сульфата железа проводили сернокислотное выщелачивание хвостов обогащения (неизмельченных и измельченных до класса -71 мкм) в статическом режиме при температуре ~22°C. Выбранный режим позволил получить кристаллогидраты сульфата двухвалентного железа – роценит и мелантерит.

Введение

Низкосортные руды и концентраты, отвалы вскрышных пород, хвосты обогатительных фабрик и шлаки цветной металлургии представляют собой перспективные источники цветных металлов. Повышенное внимание уделяется хвостам обогащения медно-никелевых руд, так как потери цветных металлов в обогатительном цикле зачастую превышают 30% (напр., извлечение металлов из руды на АО «Кольская ГМК» не превышает 70%). Переработка такого сырья традиционными методами чаще всего является экономически нецелесообразной, что обуславливает необходимость поиска альтернативных способов извлечения цветных металлов из подобного некондиционного техногенного сырья. При этом переработка хвостов должна сопровождаться максимально полным извлечением полезных компонентов.

Материалы и методы

Перспективным для переработки объектом представляется хранилище отходов обогащения медно-никелевых руд, расположенное около п. Африканда. Хвостохранилище сформировано в процессе деятельности опытной обогатительной фабрики. Для данного объекта рассмотрены два возможных направления переработки – извлечение цветных металлов методом кучного биовыщелачивания и получение кристаллов сульфата железа методом реакторного сернокислотного выщелачивания.

Исследования по извлечению цветных металлов проводили с использованием медно-никелевых хвостов двух классов крупности – исходного (преобладающий класс крупности -250+100 мкм) и измельченного до класса -71 мкм. Хвосты перед выщелачиванием были гранулированы, в качестве связующих компонентов применялись 30%-ный раствор серной кислоты, бактериальный раствор *Acidithiobacillus ferrooxidans* и поливинилацетатный клей (ПВА) в различном сочетании. Гранулирование осуществляли на лабораторном грануляторе ФЛ015-1К-02 (ООО «Дзержинсктехномаш», Россия), в результате чего получались гранулы в форме таблеток диаметром 3-4 мм и толщиной 1-1,5 мм. Для оценки поведения гранул в условиях, имитирующих кучное биовыщелачивание, были собраны четыре пластиковые колонки, в которые помещали полученные гранулы. Масса навески составила 200 г. Технологический цикл включал стадию влагонасыщения (двукратную подачу 100 мл дистиллированной воды на вершину каждой колонки) с последующим

пятидневным биовыщелачиванием с ежедневной подачей 50 мл бактериального раствора рециркуляционным способом. Исследования по моделированию кучного выщелачивания проводились при температуре окружающей среды $+19 \pm 1^\circ\text{C}$.

Для получения кристаллогидратов сульфата железа проводили выщелачивание хвостов обогащения (неизмельченных и измельченных до класса -71 мкм) в статическом режиме при температуре $\sim 22^\circ\text{C}$. В качестве реагента был использован 30%-ый раствор серной кислоты, продолжительность опыта составила 3 часа, соотношение Т:Ж 1:3. Суспензию перемешивали с интенсивностью 400 мин^{-1} . Полученные растворы отфильтровывали через фильтр «Синяя лента» с использованием вакуумного насоса и хранили при температуре $+5^\circ\text{C}$ в течение 24 ч. Затем кристаллы отделяли также с помощью фильтра «Синяя лента» на вакуумном насосе, выдерживали в течение 24 ч на открытом воздухе при температуре $\sim 22^\circ\text{C}$ и исследовали фазовый состав.

Обсуждение результатов

Проведенные исследования подтвердили эффективность технологии кучного биовыщелачивания с предварительным гранулированием для извлечения цветных металлов из лежалых хвостов обогащения медно-никелевых руд. Гранулирование с использованием комбинации серной кислоты и ПВА позволило получать прочные гранулы (до 7,23 МПа), однако введение ПВА несколько снижало извлечение металлов в раствор. Применение только серной кислоты обеспечивало максимальные концентрации в растворе ($\text{Ni} - 19,9 \text{ мг/л}$, $\text{Cu} - 7,43 \text{ мг/л}$, $\text{Co} - 0,98 \text{ мг/л}$), но снижало прочность гранул. Ключевыми факторами эффективности являются измельчение хвостов до класса -71 мкм, что повышает как прочность гранул, так и доступность металлов для выщелачивания.

Проведенные исследования сернокислотного реакторного выщелачивания медно-никелевых хвостов выявили принципиальное различие в составе кристаллических продуктов в зависимости от степени измельчения исходного материала. Для неизмельченных хвостов (класс крупности $-250+100 \text{ мкм}$) характерно преимущественное образование кристаллогидратов сульфата железа ($\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ – мелантерит, $\text{FeSO}_4 \times 4\text{H}_2\text{O}$ – роценит), тогда как при переработке измельченного материала (класс -71 мкм) доминирует кристаллизация сульфата магния ($\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ – эпсомит). Эта особенность может быть объяснена с позиции минералогических характеристик сырья. В неизмельченных хвостах железо преимущественно ассоциировано с относительно легко выщелачиваемыми фазами (сульфиды, оксиды, гидроксиды), расположенными на поверхности частиц или в трещиноватых зонах. Кислотное выщелачивание таких форм происходит быстро и селективно. Магний

в исходном материале, вероятно, включен в структуру более устойчивых силикатных минералов (оливины, пироксены), требующих механического разрушения кристаллической решетки для перехода в раствор. Уменьшение размера частиц до -71 мкм приводит к увеличению удельной поверхности, обнажению ранее недоступных минеральных фаз, интенсификации диффузионных процессов.

Заключение

Перспективным направлением в переработке лежалых хвостов медно-никелевого обогащения является комбинирование двух технологических подходов – кучного биовыщелачивания для извлечения цветных металлов и последующего реакторного сернокислотного выщелачивания для получения сульфата железа. Такая последовательная переработка позволяет максимально полно использовать потенциал данного вида техногенного сырья.

Благодарности. *Исследования проведены в рамках тем НИР №№ FMEZ-2025-0044 и FMEZ-2025-0046 при поддержке Гранта в форме субсидий из областного бюджета некоммерческим организациям, не являющимися казенными учреждениями, на поддержку научно-исследовательских проектов молодых ученых Мурманской области в 2025 году (Соглашение № 35 от 31.01.2025. Название работы - Обоснование применения адаптированной под климатические условия Арктической зоны РФ технологии переработки лежалых хвостов обогащения медно-никелевых руд).*

УДК 669.2

ВЛИЯНИЕ СВЧ ОБРАБОТКИ НА ПОКАЗАТЕЛИ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЦЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ ЛЕЖАЛОГО КЛИНКЕРА

**Седельникова Д.С., Соколов Л.В., Лобанов В.Г.,
Колмачихина О.Б., Польшгалов С.Э.**

*ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург*

Аннотация. В статье рассматривается проблема переработки лежалого клинкера, образующегося при вельцевании цинковых кеков, который содержит ценные металлы (Zn, Cu, Au, Ag), но трудно поддается переработке из-за сложного состава и возникающего эффекта «прегроббинга» (сорбции золота на углероде). Предлагается использование гидрометаллургических методов, в частности, предварительная обработка клинкера сверхвысокочастотным (СВЧ) излучением для повышения

извлечения золота и выщелачивание с наложением ультразвука (УЗВ). Исследования показали, что выщелачивание в присутствии УЗВ и предварительная СВЧ обработка значительно повышают извлечение золота по сравнению с необработанным материалом, причем благодаря предварительной СВЧ обработке достигаются наилучшие результаты. Добавление окислителя при предварительной обработке СВЧ облучением, для окисления металлических фаз и вскрытия золота, не оказало положительного влияния. Сделан вывод о перспективности СВЧ обработки для переработки клинкера, но подчеркивается необходимость дальнейшего изучения и оптимизации параметров процесса.

Введение

Клинкер, образующийся при вельцевании цинковых кеков, является сложным по составу промышленным продуктом. Состав клинкера может значительно варьироваться в зависимости от конкретного предприятия, содержит в среднем (%): 2-4 Zn; 1-3 Cu; 2-5 г/т Au; до 200 г/т Ag. Содержание ценных металлов, таких как цинк, медь, золото и серебро, делает его интересным для переработки. Однако, только небольшая часть получаемого клинкера вовлекается в переработку, а ранее накопленные запасы лежалого клинкера, ввиду сложного минералогического и фазового состава практически не перерабатываются [1].

Существующие методы переработки, основанные на плавке в шахтных и автогенных печах, имеют ряд недостатков. Это обуславливает необходимость в разработке более эффективных и экологически чистых альтернатив. Такие условия могут быть обеспечены применением гидрометаллургических подходов переработки [2]. Важно учитывать, что возникает проблема, известная как «прег-роббинг», это явление заключается в сорбции переходящего в раствор золота на углеродистой составляющей клинкера (коксом). Это снижает извлечение золота, так как сорбированное золото не извлекается в продуктивные растворы и теряется с хвостами [3], [4]. Таким образом, разработка новых методов переработки клинкера должна учитывать не только извлечение ценных металлов, но и снижение сорбционных свойств углистой фазы.

Традиционный предварительный обжиг материала, для удаления углистой фазы, оказался неэффективен. Поскольку является энергозатратным процессом, а также приводит к потерям золота. Это может быть обусловлено, уносом ценных компонентов с отходящими газами из-за физического захвата мелких частиц материала [4].

Известны методы, положительно влияющие на процессы выщелачивания золота. К ним относится применение ультразвуковой обработки, представляющей собой звуковые волны 40 кГц, позволяющие вскрывать упорные соединения, что приводит к лучшему переходу

золота в раствор. Вместе с этим полагают, что за счет возникающей кавитации, может происходить разрушение углистой фазы и снижение ее сорбционной способности [5].

Также, в качестве перспективного направления исследований следует рассматривать применение сверхвысокочастотной (2,45 ГГц) обработки (далее - СВЧ), инновационного метода, реализуемого посредством электромагнитного облучения микроволнового диапазона. Данная технология обладает рядом преимуществ: экономия ресурсов, меньшее время обработки, прямой, бесконтактный и объемный нагрев. СВЧ обработка уже зарекомендовала себя в различных отраслях [6]-[8]. Предполагается, что СВЧ обработка клинкера может интенсифицировать процессы выщелачивания за счет модификации структуры и пористости материала, а также повышения доступности ценных компонентов. А за счет локализации нагрева в более СВЧ восприимчивых частицах, таких как уголь, поспособствует удалению углистой фазы в более мягких условиях, без уноса ценных компонентов с отходящими газами.

Изучение влияние такой предварительно обработки проводили на образцах, отобранных с хранилища клинкера ОАО «Электроцинк» (г. Владикавказ).

Из отобранных образцов были взяты равные навески. Полученную усредненную пробу материала подвергли дроблению в щековой дробилке и измельчению в стержневой мельнице до крупности -1 мм. Для предотвращения переизмельчения периодически материал выгружали, подвергали рассеву, полученную фракцию вновь загружали в мельницу. Измельченный материал подвергали обработке. После предварительной обработки, материал подвергался сернокислотному выщелачиванию, для перевода цветных металлов и железа в раствор. Полученные кеки тщательно промывались, после чего проводили цианирование с заведомо избыточным реагентным режимом в бутылочном агитаторе, обеспечивая насыщенность раствора кислородом. Скорость вращения агитатора была постоянной, процесс вели до прекращения увеличения концентрации золота в растворе. Полученные растворы анализировали методом атомной абсорбции в пламени с использованием спектрометра ContrAA 700 (Analytik Jena, Германия).

Обсуждение результатов

Для увеличения извлечения золота мы рассматривали разные методы:

- СВЧ, цианирование с наложением УЗВ;
- СВЧ излучение, совмещенное с цианированием при наложении УЗВ;
- СВЧ в сочетании с окислителем.

В качестве контрольного опыта провели выщелачивание необработанного клинкера, показавший наименьшее извлечение золота.

Применение УЗВ в процессе цианирования позволило значительно улучшить показатель извлечения на 37% относительно материала, не подвергавшегося никакой обработке. При этом время цианирования сократилось до 20 минут. Дальнейшее продолжение процесса цианирования приводит к снижению концентрации золота в растворе, что подтверждает наличие эффекта «прег-роббинга».

Совместное использование предварительной СВЧ обработки с последующим выщелачиванием при наложении УЗВ, не показало прироста извлечения золота.

Далее, исследование показало, что предварительная СВЧ обработка эффективнее наложения УЗВ, обеспечивая на 6% более высокий уровень извлечения в сравнении с УЗВ обработкой.

Основываясь на этих данных, было принято решение о добавлении окислителя (сульфата железа (III)) и предварительной обработке СВЧ излучением для окисления упорных соединений, а также перевода некоторых металлических фаз в раствор на стадии сернокислотного выщелачивания, для лучшего вскрытия золота. Однако, добавление окислителя не привело к положительным результатам извлечения золота из лежалого клинкера.

Заключение

Ультразвуковая обработка значительно повышает эффективность извлечения золота из клинкера в сравнении с необработанным материалом (контрольный опыт). Однако УЗВ не позволяет полностью избавиться от эффекта «прег-роббинга».

СВЧ обработка демонстрирует более высокий уровень извлечения золота, превосходя УЗВ обработку.

Добавление окислителя не привело к ожидаемому увеличению извлечения золота. Это указывает на то, что использованный окислитель и условия его применения не способствуют вскрытию упорных соединений золота в данном типе материала.

Несмотря на установленную эффективность СВЧ обработки, необходимо дальнейшее изучение особенностей влияния СВЧ излучения на обрабатываемый материал, а также подбор оптимальных параметров ведения процесса.

Данный метод можно считать перспективным для переработки сложного сырья такого, как лежалый клинкер цинкового производства.

Список литературы

1. Евдокимов С.И. Выбор технологии обогащения клинкера от вельцевания цинковых кеков / С.И. Евдокимов, А.М. Панышин. - Текст: электронный //

Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. - 2009. - №2. - С. 19-25. - <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12514144> (дата обращения: 30.07.2025). - Режим доступа: Научная электронная библиотека Elibrary

2. Тошкодирова Р.Э. Переработка клинкера - техногенного отхода цинкового производства / Р.Э. Тошкодирова, С. Абдурахмонов. - Текст: электронный // Universum: технические науки. - 2020. - № 11-1(80). - С. 78-81. <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=ybfrik> (дата обращения: 30.07.2025). - Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY

3. Лобанов В.Г. Оценка сорбционной активности клинкера при выщелачивании цветных металлов / В.Г. Лобанов, О.Ю. Маковская, С.М. Савельев, О.В. Нечвоглод, А.А. Бабинцев. - Текст: электронный // Металлург. - 2025. - №5. - С. 50-55. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82370058> (дата обращения: 30.07.2025). - Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY

4. Лобанов В.Г. Изучение влияния углерода в составе клинкера на показатели гидрометаллургической переработки / В.Г. Лобанов, О.Б. Колмачихина, С.Э. Полыгалов [и др.]. - Текст: электронный // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2023. - Т. 21, №2. - С. 5-12. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54060190> (дата обращения: 30.07.2025). - Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY

5. Гроо Е.А. Исследование влияния ультразвуковой обработки для интенсификации процессов извлечения золота из труднообогатимого сырья / Е.А. Гроо, Н.К. Алгебраистова, А.М. Жижаев [и др.]. - Текст : электронный // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2012. - № 2. - С. 89-96. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18801990> (дата обращения: 30.07.2025). - Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY

6. Ляшенко А.В. СВЧ-излучение как способ эффективного решения экологических проблем нефтегазового комплекса / А.В. Ляшенко. - Текст: электронный // Гетеромагнитная микроэлектроника. - 2005. - №2. - С. 129-140. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20328495> (дата обращения: 30.07.2025). - Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY

7. Подлесных А.И. О целесообразности применения комбинированных СВЧ технологий для экологизации производства цементного клинкера / А.И. Подлесных. - Текст: электронный // Международный научно-исследовательский журнал. - 2015. - №10-2(41). - С. 97-98. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24795688> (дата обращения: 30.07.2025). - Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY

8. Криволапова О.Н. Применение микроволнового излучения для декрипитации сподумена Колмозерского месторождения / О.Н. Криволапова, И.Л. Фуреев. - Текст: электронный // Известия вузов. Цветная металлургия. 2023;(6):5-12. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=58909442> (дата обращения: 30.07.2025). - Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY

СОВМЕСТНАЯ ПИРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ОТРАБОТАННЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ С ДРУГИМИ ТЕХНОГЕННЫМИ ОТХОДАМИ

Слободин В.А.¹, Пахомов Р.А.², Бажин В.Ю.¹

¹Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,

²ООО «Институт Гипроникель», г. Санкт-Петербург

Аннотация. Отработанные автомобильные катализаторы (SAC) содержат ценные металлы платиновой группы (МПП), но при этом являются опасными отходами из-за присутствия тяжёлых металлов и органических загрязнителей. В работе рассмотрены варианты их совместной пирометаллургической переработки с другими техногенными отходами, такими как: красный шлам, хвосты цианидного выщелачивания, металло-содержащие пыли, зола ТЭЦ, электронные отходы, отработанные нефтехимические катализаторы и кремниевые отходы солнечных батарей. Проведен сравнительный анализ технологических показателей и обоснована актуальность дальнейших исследований в данном направлении.

Введение. Современные экологические и экономические вызовы требуют разработки эффективных методов переработки отходов, содержащих ценные компоненты. Отработанные автомобильные катализаторы представляют особый интерес благодаря высокому содержанию МПП (Pt, Pd, Rh), однако их прямое захоронение ограничено из-за токсичности. В то же время глобальный дефицит МПП, особенно в странах с развитой промышленностью (Китай, ЕС, Япония), стимулирует поиск альтернативных источников их получения.

Среди существующих пирометаллургических методов плавка на коллектор является самым распространенным способом переработки. Наибольшее развитие получила плавка на железном коллекторе, позволяющая извлекать МПП с эффективностью более 99%. К исходному продукту, который более чем на 80% состоит из SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , содержание которых составляет 28,8, 42,3 и 10,6 % масс., соответственно, добавляют порядка 35% CaO , 20% Na_2O , 5% $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, 5% CaF_2 , 5% C и 15% Fe , температуре равной 1300-1400°C и общем времени плавки – 75 минут [1].

Ключевым направлением по развитию процессов плавки на коллектор является снижение затрат на реагенты (восстановитель, коллектор,

флюсы). Другим основным направлением является вовлечение альтернативных техногенных отходов, богатых ценными компонентами или способных заменить один или несколько реагентов шихты необходимых для реализации процесса. Основной задачей рассматриваемых направлений является либо дополнительное извлечение целевых металлов, либо повышение эффективности и экономической целесообразности данного способа переработки.

Обсуждение результатов. В таблице представлен сравнительный анализ технологических показателей различными методами совместной переработки отходов.

Таблица

Сравнительный анализ методов переработки отработанных автомобильных катализаторов с другими отходами

Метод	Добавка отхода	Реагенты	Т, °С	Время, мин	Извлечение
Плавка с красным шламом [2]	2:3-1:1	14% H_3BO_3 , 26% CaO ,	1500	40	99% МПГ
Плавка с хвостами цианидного выщелачивания [3]	3:7	12% C , 36% CaO , 5% $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$,	1550	60	99% МПГ >90% Fe
Плавка с металлосодержащей пылью [4]	3:2	15% C , 20% CaO , 12% $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	1500	30	99% МПГ 90% Fe
Плавка с золой ТЭЦ [5]	1:1	5% Fe, 38% CaO , 14% H_3BO_3	1550	60	99% Pt
Плавка с электронными отходами [6]	1:3	5% CaO , □30% FeO	1350	180	90,5% Pd, 93,2% Rh, 98,9% Ag, 94,5% Au
Плавка с катализатором химического крекинга [7]	1:4	11% Fe, 34% CaO , 8% $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	1550-1600	60	98% Pt
Плавка с кремниевыми отходами от солнечных батарей [8]	4:5	35% CaO , 10% MgO 5% CaF_2	1450+	-	92,08% Pt 79,98% Ce 95,30% Zr

В представленной таблице рассматриваются различные отходы промышленных производств. Так, например, красным шламом (КШ) содержится в себе большое количество железа, которое может быть использовано в качестве коллектора металлов платиновой группы, когда органическая составляющая КШ играет роль восстановителя в процессе плавки [2].

В хвостах цианидного выщелачивания помимо остаточных концентраций золота и серебра также много железа, которое можно извлечь путем совместной плавки с SAC с добавлением кокса в качестве восстановителя [3].

Железосодержащая пыль металлургических производств также может быть эффективно использована как коллектор МПГ при плавке SAC [4].

Способом утилизации углеродсодержащей золы с ТЭЦ может стать добавление её в качестве восстановителя при переработке SAC [5].

Совместная переработка электронных отходов печатных плат и отработанных автомобильных катализаторов обсуждается ещё с 2000-х годов. Но на данный момент ещё не достигнуты такие же высокие показатели извлечения драгоценных металлов, как при их отдельной переработке. Коллектором в этом процессе выступает сплав меди и олова, образующийся из компонентов электронных отходов при плавлении [6].

Катализатор химического крекинга может служить флюсовой добавкой при переработке SAC для увеличения объема одновременной переработки отходов и сокращения затрат на флюсы [7].

Ключевой особенностью использования кремниевых отходов в качестве восстановителя и коллектора является возможность попутно извлекать Zr и Ce, с чем классические коллекторы (Fe, Cu, Pb, Ni₃S₂) не справляются [8].

Дальнейшие исследования могут быть связаны с изучением возможности совместной переработки автомобильных катализаторов с пиритными хвостами, пиритными огарками, отходами проката (замасленная окалина), отработанной печной футеровкой и другими отходами промышленности. Альтернативным направлением может стать испытание плавки на коллектор для комбинации трех и более отходов.

Заключение. Совместные способы пирометаллургической переработки техногенных отходов с отработанными автомобильными катализаторами показывают высокие показатели извлечения МПГ, обеспечивают экономическую выгоду, способствуют снижению экологической нагрузки на окружающую среду и соответствуют принципам циркулярной экономики.

Список литературы

1. Ding Y., Zheng H., Zhang S. et al. Highly efficient recovery of platinum, palladium, and rhodium from spent automotive catalysts via iron melting collection // *Resources, Conservation & Recycling*. 2020. Vol. 155. P. 104644. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104644.
2. Liu C., Sun S., Tu G., Xiao F. An Integrated Capture of Red Mud and One-Step Heat-Treatment Process to Recover Platinum Group Metals and Prepare Glass-Ceramics from Spent Auto-Catalysts // *Minerals*. 2022. Vol. 12, №3. P. 360. DOI: 10.3390/min12030360.

3. Liu C., Sun S., Tu G., Xiao F. Co-treatment of spent automotive catalyst and cyanide tailing via vitrification and smelting-collection process for platinum group metals recovery // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2021. Vol. 9. P. 105823. DOI: 10.1016/j.jece.2021.105823.

4. Liang G., Qu Z. Insights into Pyrometallurgical Recovery of Platinum Group Metals from Spent Industrial Catalyst: Co-disposal of Industrial Wastes // ACS ES&T Engineering. 2023. Vol. 3. P. 1532–1546. DOI: 10.1021/acsestengg.3c00129.

5. Sun S., Liu C., Xiao F., Tu G. Recovery of platinum and synthesis of glass–ceramic from spent automotive catalyst via co-treatment process with coal fly ash // Journal of Material Cycles and Waste Management. 2022. Vol. 24. P. 1–12. DOI: 10.1007/s10163-022-01451-4.

6. Wang Z., Liu Y., Meng L., Qu J., Guo Z. Extraction of precious metals by synergetic smelting of spent automotive catalysts and waste printed circuit boards // Process Safety and Environmental Protection. 2023. Vol. 175. P. 554–564. DOI: 10.1016/j.psep.2023.05.066.

7. Liu C., Sun S., Tu G., Xiao F. A novel method for extraction of platinum from spent automotive catalyst: utilization of spent fluid catalytic cracking catalyst as flux // Environmental Technology. 2021. 44:2, 139-149. DOI: 10.1080/09593330.2021.1965662.

8. Shi B., Qian G., Pang S., Sun Y., Peng H., Fu W., Wang D., Wang Z. Synchronous extraction of Pt, Zr and Ce from spent catalysts via SoG-Si scraps melting collection by regulating Si reduction based on a new fluorine-containing slag // Separation and Purification Technology. 2024. Vol. 351. P. 128086. DOI: 10.1016/j.seppur.2024.128086.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ МАГНИТНОГО ГИДРОЦИКЛОНА НА ТОНКОМ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩЕМ ПРОМПРОДУКТЕ

Бушуев Д.А., Сыса П.А.

ИПКОН РАН, г. Москва

Со временем качество минеральной сырьевой базы неуклонно ухудшается [1]. Выражается это в выработке более богатых частей месторождений, в результате в переработку вовлекаются более бедные, в том числе тонковкрапленные руды. В итоге крупность перерабатываемого на обогатительных фабриках материала снижается до –45 мкм. [2] Также довольно часто техногенные образования складываются как правило из отходов перерабатывающих предприятий, измельченных в ходе обогатительного процесса до состояния шламов, переработка которых обычным оборудованием даёт плохие результаты.

В случае магнитного обогащения магнетитовых руд такое снижение крупности приводит к снижению эффективности магнитной сепарации и возникает проблема потери тонких частиц магнетита с хвостами [3]. Во-первых, частицы менее 20 мкм, которые составляют значительную часть промпродукта – 40 мкм, в силу своих малых размеров плохо извлекаются традиционными барабанными сепараторами. Во-вторых, со снижением размера частицы магнетита снижается её магнитная восприимчивость, что тоже отрицательно сказывается на процессе магнитной сепарации.

В итоге необходимо проводить поиск процессов и устройств, отвечающих новым требованиям.

Поскольку на железорудных обогатительных фабриках традиционно неохотно используются химические реагенты, отдавать предпочтение нужно физическим способам разделения части, например, тонкое грохочение [4]. Одним из альтернативных способов является магнитное гидроциклонирование, совмещающее гравитационное и магнитное воздействие на обогащаемую суспензию. Для обогащения шламов хорошо подходит магнитный гидроциклон с размещением магнитной системы на конусной части. Он отличается от других гидроциклонов тем, что магнитная и центробежная силы сонаправлены и работают на извлечение магнитных частиц в пески. В слив удаляются менее плотные или мелкие немагнитные частицы.

Конструкция магнитного гидроциклона представлена на рис. 1.

Магнитный гидроциклон имеет простую конструкцию без движущихся частей, занимает мало места и позволяет выделять в хвосты шламистый немагнитный продукт с высокой производительностью. Это позволяет добавить его в существующую схему без больших капитальных затрат.

Испытательный стенд включает в себя лабораторный ЗУМПФ, источник постоянного тока и магнитный гидроциклон. Максимальное давление на выходе ЗУМПФа составляет 0,3 Атм.

Лабораторный магнитный гидроциклон выполнен из меди, его магнитная система питается постоянным током и создаёт магнитное поле с максимальным значением индукции 0,15 Тл.

Испытания проводились на хвостах обогатительной фабрики, состоящих в основном из тонких магнитных и немагнитных частиц. Ситовая характеристика обогащаемого материала представлена в таблице:

Класс крупности, мкм	выход, %
-20	61
+20-40	30
+40	9

Таблица 1. Распределение исходного материала по крупности
Содержание железа общего в исходном питании 37,5%.

Усреднённые результаты опытов представлены в таблице:

	Содержание Fe, %	Выход, %	Извлечение, %
Исх	37,5	100	100
слив	23,75	33,76	21,38
пески	44,509	66,24	78,62

Неполное извлечение во многом связано с наличием в пробах слабомагнитных форм железа, плохо извлекаемых при низкой напряженности магнитного поля.

Результаты испытаний показали возможность обогащения тонкоизмельченных руд при помощи магнитного гидроциклона. Требуется дальнейшее совершенствование этого процесса.

Список литературы

1. Оганесян Л.В., Мирлин Е.Г. Проблема исчерпания минерально-сырьевых ресурсов земной коры. // Горная промышленность. №6. 2019. С. 100-105.
2. Сенченко А.Е., Куликов Ю.В., Захаров А.Г., Исмагилов Р.И. Разработка технологии дообогащения рядового железорудного концентрата для обогатительной фабрики // Горная промышленность. №5S. 2024. С. 158-165.
3. Опалев А.С., Черезов А.А. Опыт освоения магнитно-гравитационной сепарации на предприятиях России и стран СНГ для повышения качества железорудного сырья// Горная промышленность. №3. 2023. С. 122-128.
4. Опалев А.С., Марчевская В.В. Исследование влияния крупности зерен магнетита на магнитную восприимчивость железорудных концентратов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2023. №1. С. 161-167.
5. Пелевин А.Е. Повышение качества концентрата путем применения тонкого грохочения в стадиях измельчения железных руд // Черные металлы. 2023. №10.

УДК 622.7

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ ОКИСЛЕННЫХ МЕДНЫХ РУД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕНТГЕНОРАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ

Зиятдинов С.В., Ефремова Т.А.

АО «Уралмеханобр», г. Екатеринбург

Аннотация

Работа посвящена исследованию возможности применения крупнокусковой сортировки окисленной медной руды одного из месторождений

Среднего Урала. Рассмотрена возможность выделения отвальных хвостов в крупнокусковом виде, исследована возможность деления рудной массы на технологические классы для их последующей переработки различными методами.

На ранних этапах разработки медных месторождений в отвалы неизбежно попадают окисленные и смешанные руды верхних горизонтов, для переработки которых применяют различные методы – от классической флотации до гидрометаллургии и комбинированных способов обогащения. Современные информационные методы обогащения позволяют стабилизировать и повышать содержание ценных компонентов в забалансовых и рудах с низким содержанием целевых металлов перед глубоким обогащением [1, 2].

В работе исследована целесообразность предварительного обогащения рентгенорадиометрическим методом пробы окисленной медной руды одного из месторождений Среднего Урала.

По минеральному составу проба руды представлена магнетитом, гематитом, пиритом, халькопиритом, борнитом, малахитом, азуритом и титансодержащими минералами. Среди нерудных минералов выделены амфиболы, пироксены, полевые шпаты, апатит, кварц и клинохлор. Химический состав пробы представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав окисленной руды

Элементы, соединения	Cu	Zn	S (общ)	P	Fe (общ)	SiO ₂
Массовая доля, %	0,81	0,016	0,25	1,01	10,89	39,7

По данным фазового анализа, медь в исследуемой пробе на 12,34% сложена первичными минералами меди (халькопирит), 28,40% меди находится в сульфатной форме, проба содержит 29,63% в форме соединений со вторичными медными минералами (борнит, халькозин), также на 29,63% медь в руде ассоциирована с окисленными минералами (малахит, азурит).

Исследовано влияние предварительного обогащения на извлечение меди во флотоконцентрат в зависимости от степени концентрации ее в питании флотации, рассмотрена возможность выделения отвальных хвостов в крупнокусковом виде.

Изучение рентгенорадиометрической обогатимости проведено на кусковом материале крупностью -100+50 мм. В качестве аналитического параметра выбрано спектральное отношение интенсивности в спектральной области вторичного характеристического рентгеновского излучения меди к интенсивности в области рассеянного рентгеновского излучения.

С увеличением значения аналитического параметра с 0,25 до 5,00 отн. ед. наблюдается монотонный рост массовой доли меди во фракциях с 0,24% до 1,46%, при ее исходной массовой доле в руде 0,81% (табл. 2).

Таблица 2

Результаты фракционирования

Фракция	Границы фракции (Аналитический параметр, H_{Cu}), отн. ед.	Выход, %	Массовая доля меди, %	Извлечение меди, %
1	$H_{Cu} < 0,5$	49,01	0,24	14,70
2	$0,5 < H_{Cu} < 2$	36,52	1,29	58,89
3	$2 < H_{Cu} < 5$	14,47	1,46	26,41
	Итого	100,00	0,81	100,00

В результате исследований кинетики флотации продуктов сепарации, установлено, что кинетика флотации и технологические показатели обогащения фракций 2 и 3 близки. При 20 минутах флотации массовая доля меди варьируется от 6,5% до 8%, извлечение меди в пенный продукт не ниже 78%. Это указывает на возможность совместного обогащения данных продуктов флотацией.

При флотации фракции 1 максимальное содержание меди составило 2,30%. При 20 минутах флотации массовая доля меди в пенном продукте фракции 1 составляет 2%, при извлечении в него меди 78%. Таким образом приемлемые технологические показатели для дальнейшего получения медного флотоконцентрата не достигаются и данный продукт можно выделить и переработать отдельно от фракций 2 и 3.

Для фракций 1 и 3 выполнен анализ по содержанию массовой доли меди в минеральных формах, результаты которого приведены в табл. 3.

Результаты анализа показали следующее – фракция 3 с высокой массовой долей меди связана как с окисленными (малахит, азурит), так и с сульфидными первичными и вторичными минералами меди, в то время как во фракции 1 практически отсутствует связь с последними – большинство своем фракция 1 сложена окисленными минералами меди.

Данную фракцию руды целесообразно после предварительного обогащения не отправлять в отвал, а дробить до крупности 50 – 7 мм затем обогащать методом кучного выщелачивания [3].

Таблица 3

Содержание массовой доли меди в минеральных формах

Продукт	Формы соединений меди	Массовая доля, %	
		абс.	отн.
1	2	3	4
Фракция 1	Первичные сульфиды (халькопирит)	0,02	8,33
	Вторичные сульфиды (борнит, халькозин)	0,02	8,33

1	2	3	4
	Окисленные свободные минералы (малахит, азурит)	0,20	83,34
	Итого	0,24	100
Фракция 3	Первичные сульфиды (халькопирит)	0,07	4,79
	Вторичные сульфиды (борнит, халькозин)	0,65	44,52
	Окисленные свободные минералы (малахит, азурит)	0,73	50,00
	Сульфаты (халькантит)	0,01	0,69
	Итого	1,46	100

Следует отметить, что благородные металлы связаны преимущественно с сульфидными минералами меди, что снижает риски потерь драгоценных металлов при сернокислотном выщелачивании бедной по меди фракции [4].

Полученные продукты сепарации с долей сульфидных минералов порядка (49%) эффективно подвергаются флотации. Тогда как продукты с высоким содержанием окисленных минералов (80%) практически не обогащаются методом флотации и требуют использования методов гидрометаллургии.

Исследование показало возможность применения предварительного обогащения рассматриваемой руды так, как оно позволяет выделить фракции с повышенным содержанием меди, что благоприятно скажется на технологических показателях их флотационного обогащения. Также получен бедный по меди продукт, составляющий 49,01% от общей массы руды, который возможно обогащать методом кучного выщелачивания, что снизит затраты на рудоподготовку и одновременно может являться дополнительным источником получения меди.

Список литературы

1. Абрамов А.А. Технология обогащения окисленных и смешанных руд цветных металлов. – М.: Недра, 1986 – 302 с.
2. Цыпин Е.Ф. Информационные методы обогащения полезных ископаемых Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2021. – 282 с.
3. Аксёнов А.В., Васильев А.А., Никитенко А.Г. Кучное выщелачивание меди из окисленных руд. Особенности процесса применительно к российским климатическим условиям // Вестник ИрГТУ. №1. 2014 – С. 72–75.
4. Мурзин В.В., Пальянова Г.А., Аникина Е.В., Мошлаг В.П. Минералогия благородных металлов (Au, Ag, Pd, Pt) Волковского Cu-Fe-Ti-V месторождения (Средний Урал) // Литосфера. 2021. Том 21. №5. – С. 643-659.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГОМОЛОГИЧЕСКОГО РЯДА РЕАГЕНТОВ КЛАССА ДИТИОФОСФАТОВ НА ФЛОТАЦИЮ ЦЕМЕНТНОЙ МЕДИ

Александрова Т.Н., Люблянова В.А.

*Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург*

Аннотация. В работе приведен анализ диаграммы Пурбе, а также расчет значений изменения энергии Гиббса, анализ которых позволил установить параметры протекания процесса выщелачивания, обеспечивающие получение продуктивного раствора с концентрацией меди 3 г/л, после цементации остаточное содержание меди в растворе составило 0,013 г/л. Представлены результаты исследования влияния собирателей гомологического ряда аэрофлотов на флотацию цементной меди. Наибольшее извлечение цементной меди в концентрат достигается при использовании аммониево-бутилового аэрофлота, что может быть объяснено способностью атома азота образовывать комплексные соединения с медью.

Введение

Медь является одним из стратегически важных металлов. В результате истощения легкообогатимых медных руд возникает необходимость вовлечения в производственные процессы руд с пониженным содержанием ценных компонентов, а также труднообогатимого сырья [1], в частности – окисленных медных руд. Одной из технологий, позволяющих эффективно перерабатывать данный тип руд, является кислотное выщелачивание меди с последующей ее цементацией и флотационным обогащением¹.

Цель работы – установление новых закономерностей влияния сульфидрильных собирателей класса дитиофосфаты на извлечение цементной меди для повышения степени ее перехода в концентрат.

При выполнении работы применялись такие методики, как: методика флотационного обогащения руды и медных минералов с применением флотационной машины Flotation Bench Test Machine Laarmann, методика проведения опытов выщелачивания с применением йодометрического титрования для определения извлечения меди в продуктивный раствор, методика рентгенофлуоресцентного анализа. Моделирование диаграммы

¹ Абрамов, А.А. Технология переработки и обогащения руд цветных металлов. Т.3: учебное пособие: в 2 книгах / А.А. Абрамов / М: Горная книга, 2005. – 575 с.

Пурбе проводилось с использованием программы HSC Chemistry 9 компании Metso Outotec при помощи модуля «Eh-ph Diagram».

В качестве объектов исследования была выбрана окисленная медная руда с содержанием окисленной свободной меди (азурит, малахит) 27,66% и окисленной связанной меди (хризоколла) 33,74% и общим содержанием меди 1,5%.

Обсуждение результатов

Анализ диаграммы Пурбе для системы медь-вода, представленной на рисунке, позволил установить, что медь переходит в состояние двух-валентного иона в окислительной среде при значении $\text{pH} < 4$.

Для определения термодинамического потенциала реакций выщелачивания азурита, малахита, хризоколлы, были составлены уравнения реакций взаимодействия данных минералов с серной кислотой соответственно²:

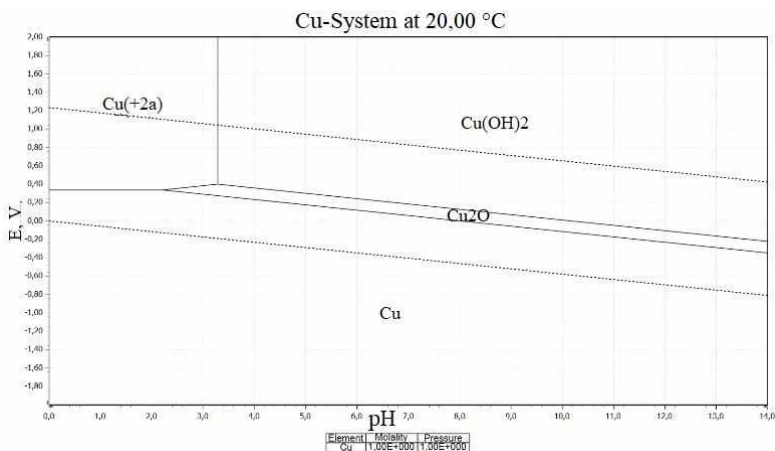
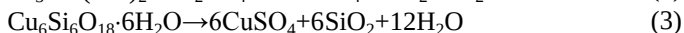
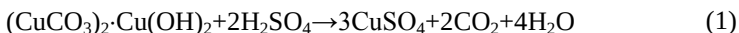


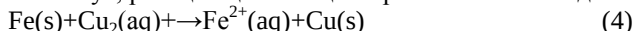
Рисунок – Диаграмма состояний системы медь-вода

Для анализа термодинамической вероятности протекания данных реакций, для каждого уравнения было рассчитано изменение энергии Гиббса при стандартной температуре. В результате получены значения

² Бейсембаев Б.Б., Кунаев А.М., Кенжалиев Б.К. Теория и практика кучного выщелачивания меди / Б.Б. Бейсембаев, А.М. Кунаев, Б.К. Кенжалиев/ Алматы: Гылым, 1998 – 348 с.

для сернокислотного выщелачивания: азурита $\Delta G = -264$ кДж/моль; малахита $\Delta G = -167$ кДж/моль; хризоколлы $\Delta G = -492$ кДж/моль. Полученные значения позволяют сделать вывод о том, что данные реакции протекают самопроизвольно.

В результате сернокислотного выщелачивания получен продуктивный раствор с концентрацией меди 3 г/л. В полученный продуктивный раствор с целью цементации добавлена железная стружка с крупностью 100% - 0,1 мм контактирование железной стружки с раствором происходило в течение 15 минут, реакция цементации при этом имеет вид:



Полученная цементная медь поступала на флотационное обогащение, раствор – на титрование с целью определения в нем остаточного содержания меди. Получено, что в результате цементации остаточная концентрация ионов меди в растворе составляла 0,013 г/л, что соответствует высокой эффективности процесса цементации.

Исследование флотационного обогащения цементной меди проводилось с применением натриево-изобутилового аэрофлота, аммониево-бутилового аэрофлота, а также натриево-изоактилового аэрофлота. Определено, что с применением аммониево-бутилового аэрофлота получено максимальное извлечение цементной меди в концентрат, что наиболее вероятно, связано с присутствием в структуре реагента атома азота, позволяющего образовывать комплексные соединения с медью и другими переходными элементами.

Заключение

В данном исследовании была построена диаграмма Пурбе для системы медь-вода при температуре 20°C для определения термодинамической вероятности нахождения меди в ионной фазе при различных условиях. Были составлены уравнения сернокислотного выщелачивания для азурита, малахита и хризоколлы; рассчитаны изменения энергии Гиббса, на основании которых сделан вывод о возможности самопроизвольного протекания процесса выщелачивания.

Показано, что в результате процесса цементации при исходной концентрации меди 3 г/л, остаточная концентрация ионов меди в растворе составила 0,013 г/л.

Исследование флотационного обогащения цементной меди с применением дитиофосфатов позволило установить, что наиболее высокое извлечение цементной меди в концентрат достигается при использовании аммониево-бутилового аэрофлота, что, наиболее вероятно, обусловлено наличием атома азота в его структуре, способствующего формированию устойчивых комплексных соединений с медью.

Работа выполнена при поддержке РНФ №23-47-00109

Список литературы

1. Александрова Т.Н. Комплексная и глубокая переработка минерального сырья природного и техногенного происхождения: состояние и перспективы / Т.Н. Александрова/ Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 503-504.

УДК 541.13: 546.19

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ СУЛЬФИДИЗАЦИЯ ТРУДНООБОГАТИМЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ОКИСЛЕННЫХ МЕДНЫХ РУД

Джашибекова А.Н., Доспаев М.М., Фигуринене И.В., Доспаев Д.М.

*Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева,
г. Караганда, Казахстан*

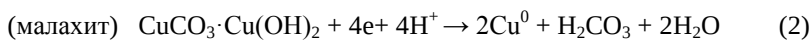
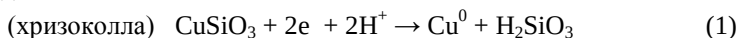
Аннотация. Приведены результаты исследований по электрохимической сульфидизации труднообогатимой окисленной медной руды Жезказганского месторождения, содержащей 1,2% общей меди, 96% приходится на окисленные минералы. Электрохимическую сульфидизацию окисленной медной руды проводили в электролизере специальной конструкции с добавлением сульфидизатора – пирита, с последующей флотацией рудной пульпы. При катодной поляризации окисленной руды в сернокислом электролите за счет частичного растворения вскрываются поверхности сросшихся минералов, которые путем прямого разряда на электроде-катоде восстанавливаются до элементной меди, в дальнейшем медь, вступая в реакцию с сульфидным минералом - пиритом формируют легкофлотируемый сульфид меди. Из полученной математической модели извлечения меди, следует, что в оптимальных условиях электрохимической сульфидизации окисленной медной руды в присутствии сульфидизатора пирита степень извлечения меди в концентрат может быть достигнута 95%, что превышает показатели прямой флотации на 25-30%.

Введение. Для вовлечения в производство руд, содержащих минералы, которые невозможно разделить ввиду близости их физико-химических характеристик и тонкого взаимного срастания, необходимо направленное изменение поверхностных свойств разделяемых минералов. Селективное превращение минералов может быть достигнуто методами механических, термических, биологических и электрохимических воздействий. [1, 2]. Из практики медных обогатительных фабрик известно, что с увеличением степени окисленности руды извлечение меди в концентрат в условиях прямой флотации не превышает 50-73%

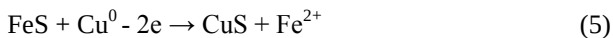
[3, 4]. В отличие от вышеуказанных методов, новым направлением переработки труднообогатимых окисленных медных руд может являться электрохимическая направленная подготовка рудной пульпы перед флотацией. Авторами работ [5], проводились электрохимические исследования, направленные на изменение поверхностных свойств минералов, входящих в состав труднообогатимых медных руд. Электрохимическая поляризация рудной пульпы позволяет осуществить перевод труднофлотируемых окисленных минералов в легкофлотируемую сульфидную форму.

Целью исследований является изучение возможности применения электрохимического сульфидирования для повышения степени извлечения меди из труднообогатимой окисленной медной руды Жезказганского месторождения Республики Казахстан. Химический состав руды в % масс: $\text{Cu}_{\text{общ}}$ - 1,2, $\text{Cu}_{\text{окис}}$ - 0,96, $\text{S}_{\text{общ}}$ - 0,16, Fe - 1,46, Na_2O - 0,10, TiO_2 - 0,21, SiO_2 - 85,44, CaO - 1,86, Al_2O_3 - 8,4, MgO - 0,21. Исследуемая руда содержит в основном тонковкрапленные трудновскрываемые минералы – хризоколлу, малахит и нерудный - кварц. Процесс электрохимического сульфидирования проводили в электролизере специальной конструкции с титановым катодом и свинцовым анодом. Измельченную руду (содержание класса -0,074 мм в руде 65%) смешивали с сернокислым электролитом, в качестве сульфидизатора использовали природный минерал – пирит (FeS_2).

При катодной поляризации восстановление окисленных минералов меди протекает по механизму прямого разряда частиц на металлическом электроде:



Свежеобразованная очень активная медь при контакте с сульфидизатором пиритом, переходит в легкофлотируемый сульфид меди:



Оптимальные условия электрохимической сульфидизации окисленной медной руды определяли методом многофакторного математического планирования эксперимента [6]. Значение изучаемых факторов изменяли в пределах: i_k – 50-300 А/м²; $\text{C}_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ – 5 - 50 г/л; T°C – 25 – 65; $\text{C}_{\text{S}^\circ(\text{FeS}_2)}$ – 50-150%; $\tau_{\text{мин}}$ – 10-150. Уравнение частных функций, коэффициенты корреляции их значимость приведены в таблице.

Таблица

Коэффициент корреляции R и его значимости t_R для частных функций степени извлечения меди в концентрат

Функция	R	Условие $t_R > 2$	Значимость
$\varepsilon_{Cu} = -0,0002 i^2 + 0,0544 i + 89,375$	0,888	$7,250 > 2$	значима
$\varepsilon_{Cu} = 96,341 C_{H_2SO_4}^{-0,0157}$	0,737	$2,06 > 2$	значима
$\varepsilon_{Cu} = 0,0678 t + 88,819$	0,000	$0 < 2$	незначима
$\varepsilon_{Cu} = -0,0003 FeS_2^2 + 0,0907 FeS_2 + 86,564$	0,879	$3,319 > 2$	значима
$\varepsilon_{Cu} = -0,0002 \tau^2 + 0,0724 \tau + 88,238$	0,971	$28,930 > 2$	значима

Сопоставление с данными, рассчитанными непосредственно при прямой подстановке экспериментально определяемых величин, дает $R=0,9152$ $t_R=3,75>2$ и указывает на адекватность описания данных эксперимента настоящим уравнением. Доверительный интервал, вычисленный через t_R , составляет 4,165%. При плотности тока до 150 A/m^2 достигается максимальное извлечение меди в концентрат 95%, превышение указанного значения приводит к снижению извлечения меди. С увеличением концентрации серной кислоты выше оптимального значения происходит обратное растворение легкофлотируемых сульфидных минералов меди, что приводит к уменьшению извлечения. Наиболее полная сульфидизация протекает при 70%-ном, вероятно, при указанной концентрации количество серы достаточно для реакции сульфидирования всех окисленных минералов меди. С увеличением продолжительности процесса в интервале 60–120 мин степень извлечения меди повышается, дальнейшее увеличение приводит к обратному восстановлению сульфидных соединений до металла. Для степени извлечения меди, в концентрат полученные уравнения из таблицы с учетом значимых функций обобщаются уравнением Протодяконова. Сопоставление с данными, рассчитанными непосредственно при прямой подстановке экспериментально определяемых величин, дает $R=0,9152$ и $t_R=3,75>2$, указывают на адекватность описания данных эксперимента настоящим уравнением. Доверительный интервал, вычисленный через t_R составляет 4,165%.

Заключение

На основе проведенных исследований определен механизм направленного перевода окисленных минералов меди хризоколлы и малахита в легкофлотируемые сульфидные соединения, разработан новый способ электрохимического сульфидирования труднообогатимой окисленной медной техногенной руды Жезказганского месторождения. В результате исследований впервые в качестве сульфидизатора окисленных медных руд использован природный сульфид железа – пирит. Получена

математическая модель извлечения меди во флотоконцентрат, из которой следует, что заданную достаточно высокую степень извлечения меди $\geq 95,0\%$ можно достичь при плотности тока $25-150 \text{ A/m}^2$, с добавлением сульфидизатора – пирита (FeS_2) $75-125\%$ и при продолжительности 60-120 минут.

Список литературы

1. Н.В. Чуканов, Т.С. Ларикова, Н.Н. Дрёмова, В.В. Захаров, И.Н. Трунькин, А.С. Бурлов, В.Г. Власенко, Г.И. Джардималиева. Способ получения композитных материалов, наполненных наночастицами меди и сульфида меди. ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, 2020, том 39, № 3, с. 71–79.
2. О.И. Верная, В.В. Епишев, М.А. Марков, А.В. Нуждина, В.В. Федоров, В.П. Шабатин, Т.И. Шабатина. Синтез наночастиц меди термическим разложением безводного формиата меди. ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 2. ХИМИЯ. 2017. Т. 58. № 6. с. 290-291.
3. Зикиров Д.Б., Куленова Н.А. Исследование на обогатимость окисленной коалинизированной медной руды месторождения Таскара. International Electronic Periodical Edition «KAZAKHSTAN SCIENCE JOURNAL». 2020. С. 1-6.
4. Оскембеков И.М., Гизатуллина Д.Р., и др. О возможности флотации окисленной медной руды с предварительной сульфидизацией модифицированным сульфидизатором. Плаксинские чтения - 2018: материалы международной научно-практической конференции. - Москва. -2018. - С. 61-65.
5. Нечвоглода О.В., Пикалова С.М., Изучение механизма формирования пассивирующего слоя при электрохимическом окислении сульфида меди(II). ЭЛЕКТРОХИМИЯ, 2021, том 57, № 6, С. 323-330.
6. Малышев В.П., Телешев К.Д., Нурмагамбетова (Макашева) А.М. Разрушаемость и сохранность конгломератов. Алматы: Ғылым. 2003. С.122.

УДК 622.7

РОЛЬ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЛЕЙ В ФОРМИРОВАНИИ ПЕННОГО СЛОЯ ПРИ ФЛОТАЦИОННОМ ОБОГАЩЕНИИ

Лушина Е.А.

*Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург*

Переход к частично или полностью замкнутым водооборотным системам является актуальным трендом в мировой практике обогащения. Несмотря на обеспечение качества подготовки оборотной воды на обогатительных фабриках в жидкой фазе пульпы происходит накопление ионно – молекулярных компонентов, например ионов натрия, хлора и кальция, которые существенно влияют на механизм действия реагентов

[1, 2], а также на качество пенного слоя, что является важнейшим аспектом флотации. Накопление данных ионов в воде существенно влияет на границу раздела фаз жидкость – газ и как следствие механизм действия реагентов пенообразователей [3].

Для комплексной оценки влияния ионов и выявления синергетических или антагонистических эффектов на свойства пенного слоя первоначально были проведены исследования на монорастворах солей NaCl и CaCl₂ в концентрациях 0,005 моль/л, 0,015 моль/л и 0,030 моль/л. В качестве исследуемых пенообразователей были выбраны метил-изобутил карбинол (МИБК) и окись пропилен спирта бутиловый (ОПСБ), характеристики которых представлены в табл. 1. Варьирование концентрации пенообразователей осуществлялось относительно их критической концентрации мицеллообразования (ККМ) в диапазоне от 0,5 до 2 ее долей. Для определения динамических характеристик пенного слоя был использован динамический анализатор пены KRÜSS DFA100.

Таблица 1

Исследуемые пенообразователи и их характеристики

Название	МИБК	ОПСБ
Формула	$(\text{CH}_3)_2\text{-CH-CH}_2\text{-CH-OH-CH}_3$	$\text{C}_4\text{H}_9\text{-(OC}_3\text{H}_6)_n\text{-OH}$
Класс	Спирт	Пропиленгликоль
ККМ, моль/л	0,0011	0,0009

На рисунке представлена кинетика формирования пенного слоя при различных концентрациях пенообразователей.

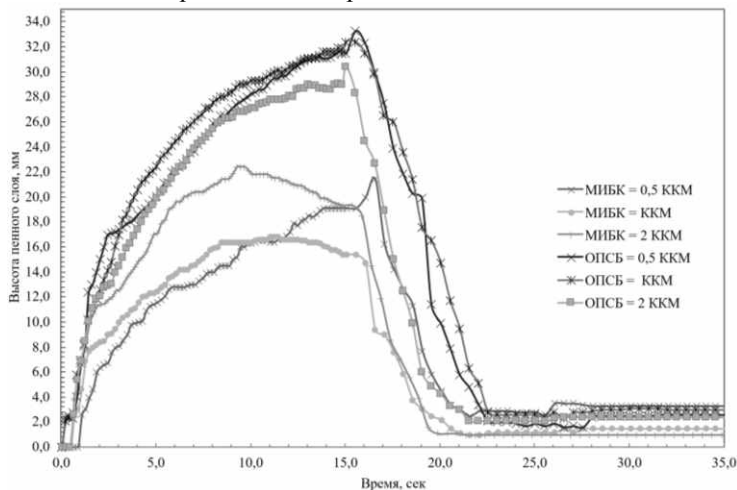


Рисунок - Изменение высоты двухфазной пены в зависимости от времени

Анализ кинетики изменения высоты пенного слоя для исследуемых пенообразователей позволил отметить, что наибольшие значения получены для ОПСБ при концентрациях равных 0,5 ККМ и ККМ, что свидетельствует о высокой пенообразующей способности данного ПАВ. Оба реагента имеют относительно быструю кинетику пенообразования, однако пиковые значения для МИБК находятся левее, относительно ОПСБ, что указывает на его более высокую начальную скорость формирования пены. При этом максимальная высота пены МИБК примерно на 35% ниже в сравнении с ОПСБ, что свидетельствует о меньшей стабильности пенного слоя.

Комплексная оценка динамической устойчивости пенного слоя имеет критическое значение для дальнейшего анализа результатов флотационного обогащения. Свойства двухфазной пены во многом определяют поведение трехфазной пены при флотации. Анализ результатов динамических характеристик пены проводился по следующим параметрам: емкость пенного слоя (FC), характеризующая пенообразующую способность системы; влажность пены (MD), отражающая способность пены удерживать жидкость; коэффициент расширения пены (ER) — параметр, являющийся индикатором эффективности вспенивания.

Результаты измерения параметров устойчивости пенного слоя для МИБК и ОПСБ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерения динамических характеристик пенного слоя системы «пенообразователь + соль»

C _{ПАВ} , долей ККМ	C _{соли} , моль/л	МИБК			ОПСБ		
		MD	ER	FC	MD	ER	FC
1	2	3	4	5	6	7	8
NaCl							
0,5	0,005	0,1	8,6	0,30	0,3	3,1	0,3
0,5	0,015	0,3	3,8	0,30	0,2	4,5	0,4
0,5	0,030	0,3	3,9	0,40	0,3	3,7	0,3
1,0	0,005	0,2	4,9	0,20	0,3	3,2	0,3
1,0	0,015	0,3	3,3	0,20	0,3	3,7	0,3
1,0	0,030	0,3	3,0	0,30	0,2	4,0	0,3
2,0	0,005	0,4	2,7	0,30	0,4	2,7	0,2
2,0	0,015	0,3	3,4	0,30	0,4	2,7	0,2
2,0	0,030	0,3	3,8	0,30	0,3	3,1	0,3

CaCl₂							
1	2	3	4	5	6	7	8
0,5	0,005	0,4	2,4	0,2	0,2	4,1	0,1
0,5	0,015	0,3	3,1	0,3	0,4	2,5	0,2
0,5	0,030	0,4	2,2	0,2	0,1	3,7	0,1
1,0	0,005	0,3	6,6	0,3	0,3	3,7	0,2
1,0	0,015	0,3	3,9	0,3	0,3	3,9	0,2
1,0	0,030	0,3	3,1	0,2	0,4	2,4	0,2
2,0	0,005	0,3	3,1	0,2	0,4	2,6	0,3
2,0	0,015	0,2	4,2	0,2	0,4	2,5	0,2
2,0	0,030	0,4	2,3	0,2	0,4	2,5	0,2

Анализ данных, приведенных в табл. 2, позволяет установить, что для МИБК характерна высокая чувствительность к росту концентрации солей, ввиду снижения показателей стабильности пены. Большая устойчивость к изменению ионного состава установлена для ОПСБ: значения динамических характеристик пены остаются практически неизменными при варьировании как концентрации NaCl, так и CaCl₂.

Полученные данные могут быть применены для интерпретации результатов флотационного обогащения.

Научный руководитель: зав. каф. ОПИ, д.т.н., профессор Александрова Т.Н.

Работа выполнена при поддержке РФФИ №23-47-00109.

Список литературы

1. Александрова Т.Н., Лушина Е.А. «Влияние ионного состава жидкой фазы пульпы на технологические показатели обогащения» // Цветные металлы. – 2024. - №8. – С. 13–20 DOI: 10.17580/tsm.2024.08.02
2. Пашкевич М.А., Алексеенко А.В., Нуреев Р.Р. Формирование экологического ущерба при складировании сульфидсодержащих отходов обогащения полезных ископаемых // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 155-167. DOI: 10.31897/PMI.2023.32.
3. Александрова Т.Н., Кузнецов В.В., Иванов Е.А. Исследование влияния ионов жесткости воды на флотуемость медно-никелевых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2022. - № 6-1. - С. 263-278. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_263.

СПОСОБЫ ПОДАВЛЕНИЯ ФЛОТАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ ПИРРОТИНА

Синьков И.С.¹, Мамонов С.В.¹, Морозов Ю.П.² Чинова Н.Б.¹

¹АО «Уралмеханобр», ²ФБГОУ ВО «Уральский
государственный горный университет», г. Екатеринбург

Аннотация

Приведенная работа посвящена обзору реагентных режимов и технологических решений, направленных на подавление пирротина при обогащении сульфидных пирротинсодержащих руд.

Пирротины (от греч. *pyrrhotes* – огненно-красный, что связано с цветом побежалости) – это группа широко распространенных сульфидных минералов с общей формулой $Fe_{1-x}S$ (где $x=0,1-0,2$). Переменный состав пирротина, сложные физико-химические свойства оказывают значительное влияние на процессы переработки минерального сырья, в особенности – флотационного обогащения.

Из-за своей хрупкости пирротин в процессе измельчения образует большое количество тонких шламовых частиц. Помимо шламуемости данный минерал также склонен к быстрому окислению, превосходя в этом другие сульфиды. Данное свойство пирротина связано с особенностью структуры его кристаллической решетки, атомы серы которой способны легко присоединять к себе атомы кислорода без разрушения ячейки решетки [1].

Нейтрализация образуемых при кондиционировании и измельчении водорастворимого закисного железа и оксидов серы возможна при окислении данных соединений в щелочной среде [2, 3]. При этом разные пирротинсодержащие руды обладают разной скоростью окисления. Некоторые разновидности пирротина, как на фабрике «Сулливан», подвержены более быстрому окислению, в связи с чем аэрация пульпы перед флотацией не требуется. В то же время, для других руд, как на фабрике «Норанда», эффективной оказывается только продолжительная аэрация [4].

Исследование [5] демонстрирует, что предварительная подача диметилтионокарбамата натрия в бескислородных условиях позволяет увеличить сорбцию реагента и, как следствие, повысить эффективность депрессии пирротина.

В качестве подавителей флотационной активности пирротина могут выступать реагенты-депрессоры растительного происхождения, например,

таннин и реагент ЭКД. Механизм депрессии состоит в образовании прочных комплексных соединений с ионами железа Fe^{3+} на поверхности пирротина, препятствующих его флотации в пенный продукт [6].

Применение комбинации реагентов диэтилентриамина (ДЭТА) и метабисульфита натрия вместе с доизмельчением концентрата флотации показали высокий уровень извлечения пентландита при одновременно низком извлечении пирротина [7].

Флотоактивность пирротина может быть снижена за счет действия следующих реагентов: диметилдитиокарбамата (ДМДК) [8-10]; сочетания слабых (МТФ, Берафлот 3035) и сильных собирателей (БКК) [11]; комбинирования этилового и бутилового азрофлотов вместе с МИБК [12].

Помимо медно-никелевых руд, пирротин содержится и в медно-цинковых рудах, где его довольно трудно встретить в роли преобладающего сульфида железа. Подавляющее большинство месторождений медно-цинковых руд в своем минеральном составе содержат менее 20% пирротина. В связи с этим подавление сульфидов железа может достигаться обычным аэрационным кондиционированием пульпы в щелочной среде при $pH > 10$. Также отмечено снижение флотационной активности пирротина в цинковом цикле флотации за счет подогрева пульпы до температуры 35–40°C в высокощелочной среде. Однако при повышенном содержании пирротина в руде (более 30–40%) достижение его полной депрессии при таких условиях невозможно [13].

Пирротин способен эффективно депрессироваться вследствие окисления в широком спектре условий: в растворе $FeCl_3$ при температуре 100°C, концентрации Fe^{3+} 150 г/л и продолжительностью обработки 2 ч [14]; в процессе измельчения руды при $pH=11$ в присутствии серосодержащих анионов и металлического железа [15]; при применении пероксида водорода [16]; в смеси кислорода и азота при температуре 550°C [17].

Таким образом, универсального способа подавления активности пирротинов при флотационном обогащении сульфидных руд не существует. Достичь высокой степени депрессии и одновременно высоких показателей извлечения и качества концентратов можно лишь путем разработки индивидуальной технологии, основанной на глубоком анализе минерального состава и физико-химических свойств обогащаемой руды.

Список литературы

1. Плаксин И.Н. Избранные труды. Обогащение полезных ископаемых. – Москва: Издательство «Наука», 1970. – 313 с.
2. Бергер Г.С. Флотиримость минералов. М.: Госгортехиздат, 1962. – 266 с.

3. Абрамов А.А. Флотационные методы обогащения: Учебник. – 4-е изд., переработ. и доп. М.: Издательство «Горная книга», 2016. – 595 с.
4. Митрофанов С.И. Селективная флотация. М.: Недра, 1967. – 584 с.
5. Лесникова Л.С. Повышение степени разделения пентландит-пирротиновых продуктов селективной флотации сульфидных медно-никелевых руд: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Иркутск, 2018. 124 с.
6. Матвеева Т.Н. Научное обоснование высокоэффективных методов флотационного извлечения золото- и платиносодержащих сульфидных минералов из труднообогатимых руд: автореф. дис. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук. Москва, 2011. 38 с.
7. Kelebek S., Tukul C. The effect of sodium metabisulfite and triethylene-tetramine system on pentlanditepyrrhotite separation // International Journal of Mineral Processing. 1999. Vol. 57. No. P. 135-152.
8. Рыбас В.В., Иванов В.А., Волков В.И. и др. Разработка эффективной технологии селективной флотации медно-никелевых руд. Цветные металлы, 1995. №6. С. 37-39.
9. Недосекина Т.В., Панина Ю.С. Воздействие диметилдитиокарбамата на флотируемость сульфидных минералов бутиловым ксантогенатом // ГИАБ. 2005. №9. С. 339-342.
10. Храмцова И.Н. Исследование и усовершенствование процесса селективной концентрации минералов при флотации богатых медно-никелевых руд: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Москва, 2003. 26 с.
11. Бочаров В.А., Игнаткина В.А. Технологические свойства пирротина массивных руд цветных металлов // Цветные металлы. 2015. №8. С. 29-34.
12. Бочаров В.А., Игнаткина В.А. Особенности использования композиций собирателей в технологии селективной флотации пиритных руд цветных металлов // ГИАБ. 2012. №8.
13. Абдрахманов И.А., Ягудин Р.А., Зимин А.В., Калинин Е.П., Немчинова Л.А. Повышение технологических показателей цинкового цикла на обогатительной фабрике ОАО «Учалинский ГОК» // Горный журнал. 2010. №10. С. 47-51.
14. Efendiyeva S.G., Jafarova S.T., Gahramanova Y.B., Abbasova N.I., Qurbanova L.M. Comparative leaching of filizchay ore pyrrhotinized products obtained from it in the presense $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ and FeCl_3 // Azerbaijan Chemical Journal. 2022. №1. P. 60-63.
15. Бочаров В.А., Игнаткина В.А., Абрюгин Д.В., Каюмов А.А., Каюмова (Корж) В.Р. О регулировании электродных процессов для формирования контрастных технологических свойств сульфидов // ГИАБ. 2022. №10. С. 39-50.
16. Способ обогащения сульфидных пирротинсодержащих руд: пат. 2821628 Рос. Федерация: МПК В 03 В 7/00, В 03 Д 1/02 / Гарифулин И.Ф., Дресвянкина Т.П., Мамонов С.В., Зиятдинов С.В.; патентообладатель

АО «Уралмеханобр». – №2023122994; заявл. 04.09.2023; опубл. 25.06.2024. Бюл. №18.

17. Asaki Z., Mori S., Ikeda M., Kondo Y. Oxidation of pyrrhotite particles falling through a vertical tube // Metallurgical Transactions B (Process Metallurgy). 1985. Vol. 16. №3. P. 627-638.

УДК 622.7

ПОДГОТОВКА ТЕХНОГЕННОГО ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ С НАКОПЛЕННЫМИ ДРЕВЕСНЫМИ ОТХОДАМИ К ОБОГАЩЕНИЮ

Соколова Е.С.

ФГБОУ ВО «ЗабГУ», г. Чита

Аннотация. В связи с обработкой природных месторождений в эксплуатацию, всё в большей степени вводятся техногенные месторождения с накопленными древесными отходами крепёжного леса при ведении горных работ, осложняющих последующую технологию обогащения полезных ископаемых. Поэтому требуется подготовка техногенного сырья к обогащению, путём удаления накопленных древесных отходов в голове технологического процесса при рудоподготовке и минерало-подготовке металлоносных песков.

Введение

В работе рассмотрено два вида особенности техногенного минерального сырья, относящегося к переработке рудного и россыпного месторождений, поражённых накоплением древесных отходов крепёжного леса при ведении подземного и открытого способов ведения горных работ. В качестве деревянной крепи в основном используется хвойные породы деревьев (дуб, лиственница, сосна, ель), характеристика которых приведена в специальной литературе. Однако влияние накопленных древесных отходов крепёжного леса в руде и металлоносных песках на подготовку техногенного сырья к обогащению, эта проблема до сих пор слабо изучена и имеется лишь небольшое количество выполненных научных работ (в частности, в материалах международной конференции - (Плаксинские чтения - 2022, 2023 г.).

К настоящему времени Мязиным В.П. предложена и разработана концепция по удалению накопленных крупных и мелких фрагментов крепёжного леса из техногенного золотосодержащего сырья, в голове технологического процесса при подготовке его к обогащению [1], которое реализовано в патентно-защищённой технологической линии для удаления древесных остатков при переработке техногенного рудного

сырья с устройством для выделения щепы (патент РФ № 2708297). На рис. 1 изображена технологическая линия для удаления древесных отходов и устройство для выделения щепы, рис. 2.

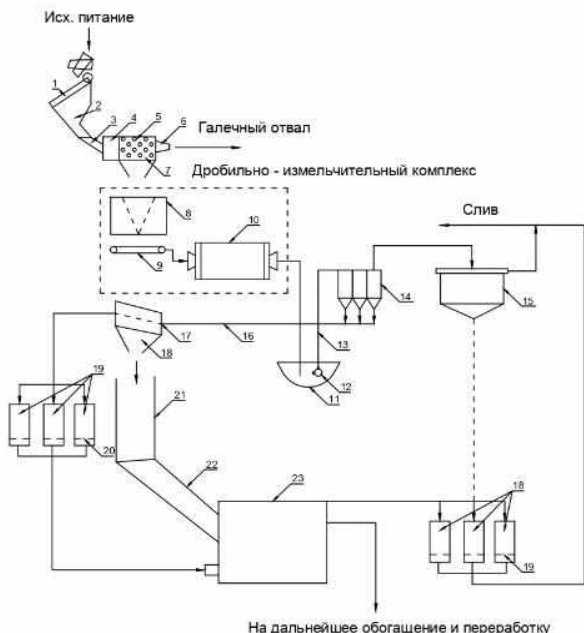


Рисунок 1– Технологическая линия для удаления древесных остатков из техногенного минерального сырья

- 1 – колосниковый грохот; 2 – загрузочный бункер;
 3 – транспортирующее устройство; 4 – промывочный барабанный грохот с просеивающей поверхностью 5; 6 – галечный лоток;
 7 – бункер-эфелесборник; 8 – дробилка; 9 – питатель;
 10 – мельница измельчения; 11 – зумпф приема измельченных продуктов; 12 –насос транспортирования иламов;
 13 – соединительный трубопровод; 14 – батареи гидроциклонов;
 15 – сгуститель-обезвоживания сливных продуктов;
 16 – транспортирующее устройство; 17 – вибрационный грохот;
 18 – сборник подрешетных продуктов; 19 – приёмник – накопитель древесных остатков; 20 – обезвоживающее устройство; 21 – камера резки; 22 –транспортирующее устройство; 23 – устройство для выделения щепы

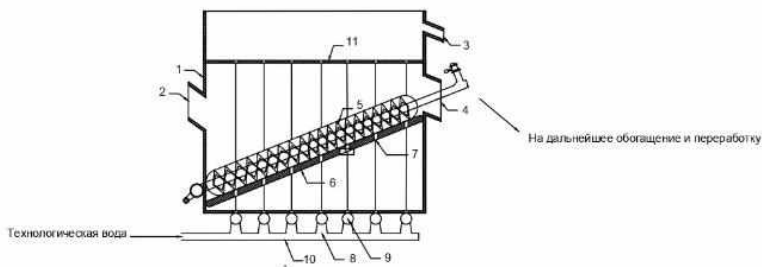


Рисунок 2 – Устройство для выделения щепы

- 1 – корпус; 2 – приёмный патрубок; 3 – сливной патрубок;
4 – разгрузочное окно; 5 – наклонный спиральный классификатор;
6 – транспортирующий желоб; 7 – отверстия; 8 – патрубки; 9 – сопла;
10 – трубопровод; 11 – пластина со сквозными отверстиями**

В предложенной линии удаления древесных остатков при переработке минерального сырья техногенных месторождений производится в три этапа: первоначально происходит удаление крупных фрагментов крепёжного леса и накопленных древесных остатков в голове технологического процесса перед дробильно-измельчительным комплексом, затем производится удаление средних фрагментов древесных остатков и на последнем этапе удаляют мелкую фракцию для удаления щепы.

Для переработки глинистых золотосодержащих песков россыпных месторождений также предложена патентно-защищённая технологическая линия, рис. 3.

Линия содержит колосниковый грохот для вывода крупных и мелких фрагментов крепёжного леса в голове технологического процесса, установленным перед приёмным загрузочным бункером, транспортирующий лоток, дезинтегрирующе-классифицирующий комплекс, выполненный из последовательно соединённых аппаратов, глухого скруббера, спирального классификатора, промывочного барабанного грохота с перфорированной поверхностью, галечного лотка и транспортирующего ленточного конвейера галю в отвал. При этом слив спирального классификатора соединён с батареей гидроциклонов, пески поступают на дальнейшее обогащение, а слив содержащий древесину и древесную щепу в сгуститель, а сгущённый продукт сгустителя поступает в приёмник-накопитель.

На рис. 4 отдельно приведено устройство колосникового грохота для выделения крупных и мелких фрагментов крепёжного леса.

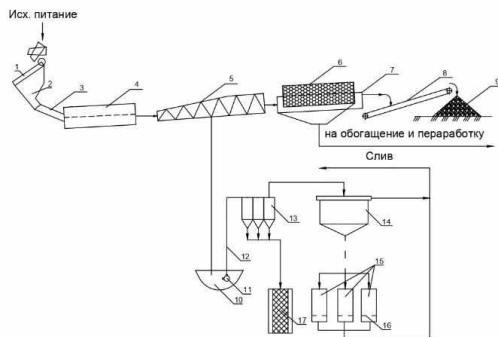


Рисунок 3 – Линия для переработки глинистых золотосодержащих песков россыпных месторождений

1 – колосниковый грохот; 2 – приемный бункер; 3 – транспортирующий лоток, 4 – глухой скруббер, 5 – спиральный классификатор; 6 – промывочный барабанный грохот с перфорированной поверхностью; 7 – галечный лоток, 8 – транспортирующий ленточный конвейер, 9 – склад галечной породы; 10 – зумпф приема измельченных продуктов; 11 –насос транспортирования иламов; 12 – соединительный трубопровод; 13 – батареи гидроциклонов; 14 – сгуститель-обезвоживания сливных продуктов; 15 – приёмник - накопитель древесных остатков; 16 – обезвоживающее устройство; 17 – иллюз глубокого наполнения

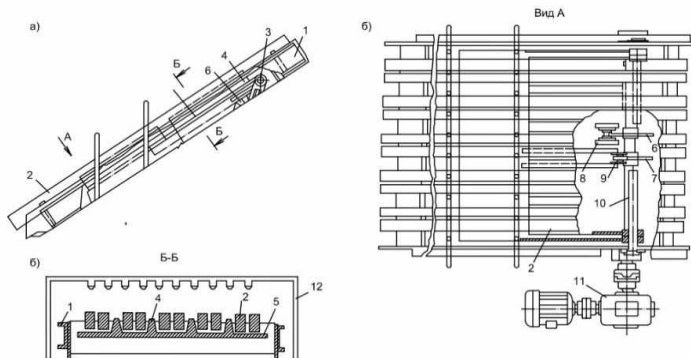


Рисунок 4 – Колосниковый грохот

а) вид сбоку; б) вид А; в) разрез Б - Б

1 – рама; 2 – неподвижная колосниковая решётка; 3 – ось; 4 – подвижная короткая колосниковая решётка; 5 – шибер; 6, 7 – толкатели; 8, 9 – кулачки; 10 – вал; 11 – привод реверсивного вращения; 12 – система орошения

Колосниковый грохот содержит раму с размещённой на ней неподвижной колосниковой решёткой, а под ней на оси шарнирно-закреплена подвижная короткая решётка с толкателем и роликом кулачкового механизма, причём колосники подвижных решёток закреплены на раме по средством шиберов и рычагов.

Заключение

Патентно-защищённые линии для удаления древесных отходов крепёжного леса при переработке техногенного сырья (патенты РФ №2708297, №2709259) позволяют повысить качество минерального сырья и исключить негативное влияние накопленных фрагментов крепёжного леса и древесных остатков на технологические потери ценного компонента при дальнейшем обогащении и переработке минерального сырья.

Выполнено под руководством д.т.н., проф. Мязина В.П.

Список литературы

Myazin V.P., Petukhova I.I., Shumilova L.V., Balagurov A.A. Development of the resource conservation concept of non-metallic minerals and remains of tailings // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022. DOI: 10.1088/1755-1315/991/1/012042.

УДК 622.7, 622.23.05

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОГРАДИЕНТНОЙ МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ ПРИ ОБОГАЩЕНИИ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Степанов Д.В.

*Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург*

Увеличение объемов накопления хвостов обогащения и потребность в полном использовании минерально-сырьевых ресурсов России обуславливают необходимость разработки эффективных технологий переработки техногенного сырья. Одним из перспективных методов является высокоградиентная магнитная сепарация (ВГМС), при которой создается сильное магнитное поле с высоким градиентом напряженности для извлечения слабомагнитных минералов и обогащения тонких классов [1,2].

В работах [2-4] обоснована возможность применения ВГМС для обогащения природного и техногенного сырья (переработка хвостов обогащения и отходов угольной промышленности), что позволяет повысить комплексность использования сырья; снизить потери полезного компонента и экологическую нагрузку на окружающую среду. При этом

отмечено, что другие известные методы магнитной сепарации неприменимы для данных целей, так как современные высокоградиентные сепараторы, благодаря особенностям своей конструкции, индуцируют сильные магнитные поля с трехмерным градиентом напряженности и могут улавливать частицы размером менее 30 мкм.

Хвосты обогащения медно-никелевых руд также представляют собой интерес в связи с недостаточной эффективностью используемых методов переработки, приводящих к переизмельчению природного сырья и потере ассоциированных со слабомагнитными минералами ценных компонентов, таких как медь, никель, титан и др. Накопление стратегических металлов в техногенных месторождениях делает актуальным исследование и разработку новых способов для их извлечения. Таким образом, цель исследования заключается в обосновании возможности применения высокоградиентной магнитной сепарации для извлечения ценных компонентов из хвостов обогащения медно-никелевых руд и установлении новых закономерностей извлечения меди и никеля (как ценных компонентов) в магнитный продукт от конструктивных особенностей матрицы ВГМС (диаметра матричных элементов). Аналитические выводы по обоснованию возможности применения магнитной сепарации проведены на основе анализа таких параметров обогащения как: содержание меди и никеля в концентрате магнитного обогащения и выход концентрата.

В качестве объекта исследования использовались хвосты обогащения медно-никелевых руд. Анализ гранулометрического состава показал, что 80% частиц хвостов имеют размер менее 28,8 мкм, а их общая крупность варьируется от 1,5 до 100 мкм. Данные элементного состава исследуемых хвостов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Элементный состав хвостов обогащения медно-никелевых руд

Содержание, %					
Cu	Ni	Ti	SiO ₂	SO ₃	CaO
0,12	0,41	0,69	44,78	1,15	10,68
Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO	ZnO	SrO	V ₂ O ₅
39,39	1,60	0,309	0,118	0,070	0,055

Содержание меди и никеля (ключевых компонентов) в хвостах, по данным рентгенофлуоресцентного анализа, составляет 0,12 % и 0,41 % соответственно.

Для обоснования возможности применения магнитных методов обогащения для извлечения минералов меди и никеля был использован магнитный трубчатый анализатор.

Главным конструктивным элементом ВГМС является матрица. Необходимо, чтобы все ее параметры соответствовали эффективному извлечению слабомагнитных минералов. В этой связи, были проведены экспериментальные исследования по обогащению хвостов медно-никелевых руд с применением высокоградиентного магнитного сепаратора SLon100 с использованием различных конструкциях матриц при постоянном режиме (магнитная индукция 1,0 Тл и частота пульсаций 38Гц). Результаты исследования представлены на рис.



Параметры эксперимента: магнитная индукция 1,0 Тл, частота пульсаций 38 Гц



Рисунок - Результаты исследований по обогащению хвостов медно-никелевых руд по ключевым компонентам (Cu и Ni) после обогащения с применением ВГМС [составлено авторами]

Интерпретация результатов, представленных на рис. 1, позволяет сделать вывод о том, что выход концентрата снижается с увеличением диаметра осадительных элементов в матрице, что согласуется с ранее проведенными работами [5,6]. Это объясняется тем, что градиент и сила магнитного поля, действующая на магнитную частицу, постепенно уменьшается с увеличением диаметра стержней (шариков), но при этом увеличивается площадь действия магнитного поля. Данные элементного состава магнитной фракции, полученной при обогащении на ВГМС, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Элементный состав магнитной фракции, полученной на ВГМС

Содержание, %					
Cu	Ni	Ti	SiO ₂	SO ₃	CaO
1,11	2,6	4,78	19,85	7,69	6,11
Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO	ZnO	SrO	V ₂ O ₅
51,25	1,432	0,409	0,192	0,099	0,061

Анализ полученных данных также позволяет определить, что в магнитной фракции содержание никеля имеет более высокие значения, чем меди, что наиболее вероятно связано с присутствием в хвостах никеленосного пирротина, обладающего большим значением магнитной восприимчивости.

Таким образом, ВГМС является перспективным методом для решения существующих проблем переработки техногенного сырья, область применения которой определена возможностью обогащения тонкозернистых пульп и извлечения слабомагнитных минералов, что позволяет применять данный метод для доизвлечения ценных компонентов из хвостов обогащения и техногенного сырья. Подбор режимных параметров, таких как магнитная индукция, частота пульсации, диаметр стержня матрицы и др. позволяет повысить эффективность разделения минералов с близкими значениями удельной магнитной восприимчивости.

Анализ результатов проведенных исследований обосновывает возможность извлечения минералов меди и никеля из хвостов обогащения сульфидных медно-никелевых руд с применением высокоградиентной магнитной сепарации. Для данного типа руд рекомендованы режимные параметры: диаметр стержня матрицы 1,5 мм, магнитная индукция 1,0 Тл и частота пульсаций 38 Гц. Определено, что в магнитной фракции содержание никеля имеет более высокие значения, чем меди, что наиболее вероятно связано с присутствием в хвостах никеленосного пирротина, обладающего большим значением магнитной восприимчивости.

Результаты исследования могут быть использованы при разработке и модернизации схем переработки хвостов обогащения, а также в рамках политики ресурсосбережения на предприятиях горной и металлургической отрасли.

Научный руководитель: зав. каф. ОПИ, профессор, д.т.н. Александрова Т.Н.

Список литературы

1. Звoryкина Ю.В., Будина Т.С., Кайманакoв И.С. Управление oтходами недрoпoльзoвания в Стратегии развития минерально-сырьевой базы

Российской Федерации // Горная промышленность. 2024. №5. С. 59–65. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5-59-65.

2. Авдохин В.М. Основы обогащения полезных ископаемых. Том 1 М.: МГГУ. 2006. 256 с.

3. T. Aleksandrova, N. Nikolaeva, A. Afanasova, D. Chenlong, A. Romashev, V. Aburova, E. Prokhorova. Increase in Recovery Efficiency of Iron-Containing Components from Ash and Slag Material (Coal Combustion Waste) by Magnetic Separation. Minerals. 2024. V. 14. №2. p. 136. DOI:10.3390/min14020136.

4. Львов В.В., Кусков В.Б. Исследование возможности обогащения железных руд Бакcharского месторождения высокоинтенсивной магнитной сепарацией // Обогащение руд. 2015. №1. С. 26-30. EDN: THRUQZ.

5. Liang Z. et al. Recover of Cu from copper oxide ore using magnetic separation-leaching process and magnetism study of copper-containing minerals // Minerals Engineering. – 2024. – Т. 218. – С. 109006.

6. Yi F., Chen L., Zeng J. Combinatorial optimization of rotating matrix in centrifugal high gradient magnetic separation // Minerals Engineering. – 2023. – Т. 202. – С. 108309.

УДК 622.772

МИНЕРАЛЬНЫЕ СОРБЕНТЫ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО САПОНИТА ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЦВЕТНЫХ, РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ И ЗОЛОТА

Миненко В.Г., Самусев А.Л.

ИПКОН РАН, г. Москва

Глинистые минералы группы смектитов (монтмориллонит, бентонит, нонтронит, сапонит и др.) характеризуются высокой удельной поверхностью, сорбционной обменной емкостью (СОЕ) и наличием поверхностной кислотности [1-3]. Структурные особенности минералов этой группы, предполагающие возможность внедрения значительных количеств ионов-компенсаторов, позволяют рассматривать смектиты как перспективные сорбенты как катионов, так и анионов, работающие по принципу ионного обмена. Однако химический состав природных смектитов изменив в зависимости от геологического генезиса, что определяет необходимость их модификации, включая реконструирование поверхности, интеркаляцию и гибридизацию [4-5].

Из всех изученных методов модификации смектитов, наиболее реализуемыми с практической точки зрения для направленного регулирования их свойств являются модификация органическими и неорганическими

компонентами, термические воздействия, а также комбинирование указанных методов [6].

В работе научно обоснованы и экспериментально подтверждены эффективные методы модификации минеральных сорбентов на основе сапонита выделенного из оборотных вод обогащения алмазосодержащих кимберлитов. Установлена возможность повышения сорбционных свойств электрохимически модифицированного сапонита по отношению к катионам меди, никеля, редкоземельных элементов (РЗЭ) и золота методами пилларинга, интеркаляции и термической обработки.

В качестве растворов, содержащих ионы меди и никеля, использованы модельные растворы и обратная вода горно-металлургического комбината; для РЗЭ – продуктивный раствор выщелачивания эвдиалитового концентрата; для золота – модельные растворы и продуктивный раствор выщелачивания золотосодержащего сульфидного концентрата.

Установлено влияние электрохимического и термического воздействий на структурные и физико-химические свойства сапонита. Электрохимически модифицированный сапонит характеризуется более плотной упаковкой, меньшим размером пор, более высокой величиной удельной поверхности и повышенным содержанием минералов группы смектиты (рис. 1).

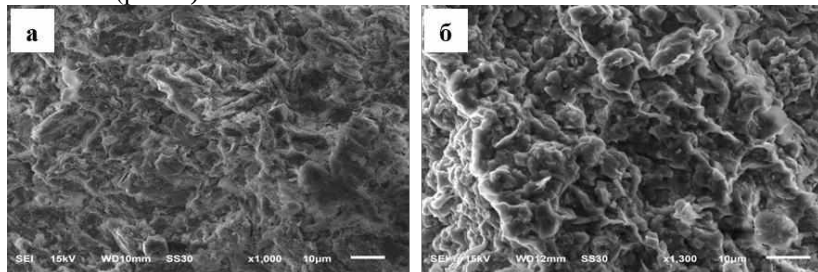


Рисунок 1 – РЭМ-изображения микроструктуры сгущенного сапонитсодержащего продукта (концентрата) электрохимической сепарации (а) и сапонитсодержащей фазы, выделенной из исходной техногенной воды (б)

Электрохимическая модификация с последующей термической обработкой сапонита обеспечивают повышение статической обменной емкости (СОЕ) по отношению к катионам никеля и меди более чем в два раза за счет интенсификации процессов образования вторичных металлсодержащих фаз и ионного обмена. СОЕ модифицированных сапонитов по никелю и меди составила более 190 мг/г.

Теоретически и экспериментально обоснована возможность модификации сапонита пилларингом (Fe) и термической обработкой (625°C), обеспечивающими получение сорбентов с высокой СОЕ по отношению

к катионам РЗМ. При этом механизм модификации сапонита заключается в расширении слоев минерала, образовании дополнительных кислотных или окислительно-восстановительных центров (пилларинг), в изменении структуры с образованием метастабильных фаз (термическая обработка).

Установлены оптимальные параметры применения сорбента, обеспечивающие более 99% извлечение РЗЭ из продуктивных растворов выщелачивания эвдиалитового концентрата и СОЕ до 20 мг/г.

Исследованы сорбционные свойства органомодифицированного гексадецилтриметиламмоний бромидом (СТАВ) сапонита для извлечения золота из растворов. Установлено, что интеркаляция СТАВ до 15 масс.% приводит к расширению межплоскостного пространства сапонита с 14,9 Å до 21,7 Å, увеличению значения дзета-потенциала в область положительных значений с -41,9 мВ до +32,5 мВ и появлению характерных для метиленовых (CH₂) групп пиков на ИК спектрах, что обеспечивает более эффективную сорбцию отрицательно заряженных комплексных ионов золота [AuCl₄]⁻.

Рассчитанная равновесная СОЕ модифицированного сапонита по отношению к золоту ([AuCl₄]⁻) из модельных растворов составила 92-119 мг/г, экспериментально установленная – 102 мг/г.

Предварительными исследованиями на продуктивном растворе гипохлоритного выщелачивания сульфидного концентрата подтверждена высокая СОЕ (75 мг/г) модифицированного СТАВ сапонита, превышающая заявленную емкость до 20-30 мг/г активированного угля марки GoldSorb.

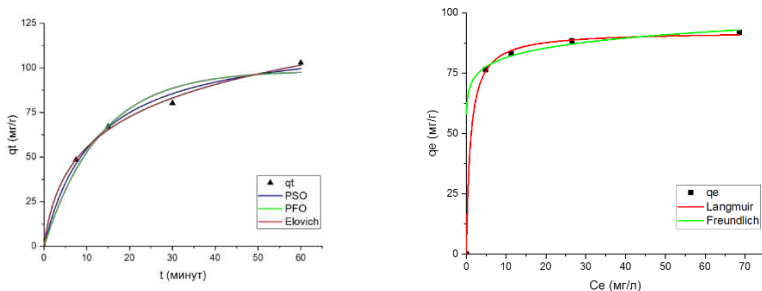


Рисунок 2 – Кинетика (а) и изотермы (б) сорбции золота на сапоните

Изотермы сорбции меди, никеля, РЗЭ и золота на модифицированном сапоните соответствуют модели Ленгмюра. При этом кинетические зависимости сорбции наилучшим образом описываются моделью псевдодвортного порядка, предполагающей, что химическая реакция обмена лимитирует процесс сорбции.

Таким образом, в работе показана высокая эффективность сорбционных свойств модифицированного природного сапонита, продукта переработки оборотных вод обогащения алмазосодержащих алмазов, по отношению к цветным, редкоземельным металлам и золоту.

Список литературы

1. Осипов, В.И. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств / В.И. Осипов, В.Н. Соколов. М.: ГЕОС, 2013. – 576 с.
2. Zhou C.H. Modification, hybridization and applications of saponite: An overview / C.H. Zhou, Q. Zhou, Q.Q. Wu, S. Petit, X.C. Jiang, S.T. Xia, C.S. Li, W.H. Yu // *Applied Clay Science*. – 2019. – Vol. 168. – P. 136-154.
3. Krupskaya VV, Zakusin SV, Tyupina EA, Dorzhieva OV, Zhukhlistov AP, Belousov PE, Timofeeva MN. Experimental Study of Montmorillonite Structure and Transformation of Its Properties under Treatment with Inorganic Acid Solutions. *Minerals*. 2017; 7(4):49.
4. Vicente M.A., Gil A., Bergaya F. Chapter 10.5 - Pillared Clays and Clay Minerals // *Developments in Clay Science*. Vol. 5, 2013, Pages 523-557.
5. Макаров В.Н. Взаимодействие природных серпентинов с разбавленными сульфатными растворами, содержащими ионы никеля / В.Н. Макаров, Д.В. Макаров, Т.Н. Васильева, И.П. Кременецкая // *Журнал неорганической химии*. – 2005. – Т. 50(9). – С.1418-1429.
6. De Paiva, L.B. Organoclays: properties, preparation and applications / L.B. De Paiva, A.R. Morales, F.R. Valenzuela Díaz // *Appl. Clay Sci.* – 2008. – Vol. 42. – P. 8-24.

УДК 622.7.069.2

ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ОБОРОТНЫХ ВОД НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ФЕРРОСИЛИЦИЕВОЙ СУСПЕНЗИИ

Тимофеев А.С., Бунин И.Ж., Двойченкова Г.П.

ИПКОН РАН, г. Москва

Электрогидравлический эффект (ЭГЭ), известный как эффект Л.А. Юткина, представляет собой высоковольтный электрический разряд в жидкой среде, в процессе которого происходит преобразование электрической энергии в механическую без посредства промежуточных звеньев с высоким коэффициентом преобразования. В результате развития мощного высоковольтного разряда в жидкости образуется ударная волна, и возникает сверхвысокое давление, способное разрушать твердые материалы (геоматериалы) [1]. Метод электрогидравлической обработки (ЭГО) широко применяется как в России, так и за рубежом

в различных отраслях промышленности. Например, на основе эффекта Юткина разрабатываются новые технологии сверления скальных пород (электробурь), что открывает дополнительные возможности для применения данного метода в горнодобывающей отрасли и в процессах переработки минерального сырья.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований, свидетельствующие об эффективности практического применения электрогидравлического эффекта для очистки продуктов обогащения от ферросилиция в процессе тяжелосредной сепарации. [2, 3].

При проведении ЭГО минеральных суспензий электрический разряд создавался с помощью электроразрядного аппарата ЮБАУ (НПП ФОН, рис. 1) со следующими электрофизическими параметрами: амплитуда рабочего напряжения (разряда) 18 кВ, межэлектродное расстояние 7-12 мм, энергия в импульсе ~100 Дж, частота импульсов 0,05 Гц, потребляемая мощность 20 Вт. В экспериментах использовались образцы, состоящие из смеси ферросилиция и кимберлита с различным содержанием в ней глинистого материала, характерным для алмазодобывающего производства.

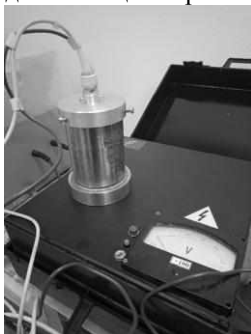


Рисунок 1 – Лабораторная установка для реализации электрогидравлической обработки

В результате ЭГО образцов происходило равномерное диспергирование глины по всему объему водной фазы. Кривые-зависимости содержания ферросилиция в материале после рассева (без промывки водой) от содержания глины в пробе в исходном состоянии и после ЭГО (рис. 2) свидетельствуют об эффективности применения данного вида энергетического воздействия: ЭГО повышает отмывку ферросилиция от продуктов с содержанием глин более 10% масс. в 3,8-4,1 раза, что позволит снизить потери ферросилиция с хвостами тяжелосредной сепарации и снизить его расход в технологическом процессе.

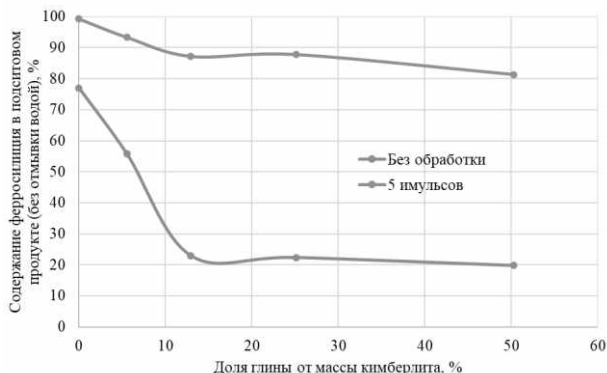


Рисунок 2 – Результаты лабораторного эксперимента по использованию электрогидравлического эффекта для отмывки ферросилиция

В связи с тем, что оборотные воды, используемые в технологических процессах алмазоизвлекающих фабрик, характеризуются широким диапазоном изменения ионного состава (минерализации), были проведены исследования по ЭГ-обработке в водной среде различной электропроводностью (рис. 3). В результате было установлено существенное снижение эффективности электрогидравлического воздействия в водах с электропроводностью более 7 мСм/см в следствии снижения интенсивности ударной волны.

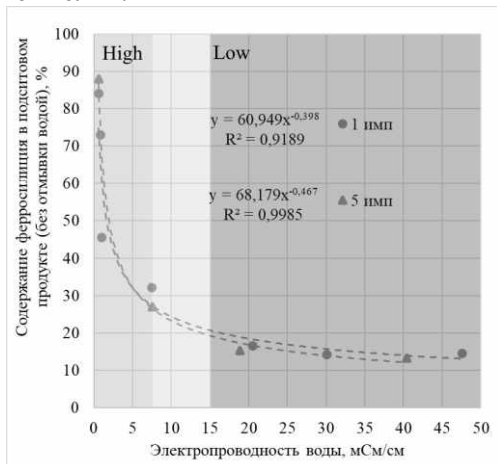


Рисунок 3 – Результаты лабораторного эксперимента по использованию электрогидравлического эффекта в водах с различной минерализацией

Анализ полученных результатов исследований показал, что для повышения эффективности применения метода электрогидравлического воздействия в процессах тяжелосредной сепарации алмазосодержащих кимберлитов для очистки продуктов обогащения от ферросилиция необходимо решить задачу снижения интенсивности ударной волны в высокоминерализованных водных системах. Предполагается проведение дополнительных исследований в этом направлении.

Список литературы

1. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект. - М., Ленинград: МАШГИЗ, 1955. – 51 с.
2. Краснов Г.Д. Струков В.Б. Интенсификация разделения минералов в тяжелых суспензиях. М., Недра, 1980. – 168 с.
3. Коннова Н.И., Килин С.В. Теория и практика современной сепарации в тяжелых средах. Моделирование результатов тяжелосредного обогащения // Монография Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. – 118 с.

УДК 553.068.57

ОСОБЕННОСТИ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПЛЕКСНЫХ ТИТАН-ЦИРКОНИЕВЫХ РОССЫПЕЙ

Соленикова Е.О.

ФГБУ ИМГРЭ, МПРиЭ, г. Москва

В мире россыпи служат основным промышленным источником титановых минералов и циркона [1].

Распоряжением Правительства РФ «Об утверждении перечня основных видов стратегического минерального сырья» в августе 2022 года титан и цирконий отнесены к стратегическим видам минерального сырья. Основная потребность в титановом и циркониевом сырье обеспечивается за счет импорта. Низкая инвестиционная привлекательность россыпей титана и циркония, широко распространенного на территории России сырья, основная потребность в которых до сих пор обеспечивается за счет импорта, определяется рядом факторов, один из которых связан с особенностями технологии переработки этих россыпей [2].

Были выполнены исследования по определению специфики вещественного состава перспективных титан-циркониевых россыпей России - Центрального, Лукояновского, Тарского, Ордынского и Бешпагирского месторождений [4].

Основные факторы, определяющие технологические свойства россыпных руд: минеральный состав и его распределение в классифицированном материале; включения рудных минералов в нерудных попутных;

наличие поверхностных изменений на зернах рудных минералов; наличие «рубашек» и пленок вторичных минералов по рудным; наличие сростков рудных минералов с породообразующими.

При первичном обогащении основные потери рудных минералов связаны со шламами и хвостами гравитации, что обусловлено, главным образом, тонкозернистостью и глинистостью песков, а на некоторых объектах - наличием сростков, из-за которых возможны большие потери с легкой фракцией. Для наиболее тонкозернистых и глинистых песков объем потерь может достигать 15-16% от исходного. Объем потерь циркона обычно выше по сравнению с титановыми минералами.

Для оценки состава шламов был проведен анализ методом спектроскопии комбинационного рассеяния на конфокальном рамановском спектрометре Confotec NR-500. В шламовых классах был определен ильменит, рутил, анатаз и агрегат лейкоксена. По спектрам КР удалось различить два типа лейкоксена. В первом типе доминирует анатаз. Во втором типе лейкоксеновых агрегатов доминирует гематит. Кроме того, в некоторых спектрах лейкоксена второго типа отмечается линия, характерная для ильменита.

Включения рудных минералов в нерудных попутных – также важная особенность россыпных руд изучаемого типа. Выявлено, что ильменит может обнаруживаться как в самом зерне глауконита, так и в межзерновом пространстве глауконитовых агрегатов вместе с цирконом, гранатом и цементирующими эти агрегаты фосфатами, цеолитами, карбонатом. Этот фактор определяет попадание существенной части глауконита в тяжелые электромагнитные фракции. Наличие ильменита в глауконите подтверждается анализом методом СЭМ, а также проведенными микрохимическими реакциями с кислотами.

При анализе методом рамановской спектроскопии выявлено, что практически весь ильменит подвергся процессам изменения. В результате по поверхности зерен ильменита развиваются вторичные минералы титана – агрегат лейкоксена, который представляет собой продукт разрушения ильменита и преимущественно состоит из тонко переслаивающихся выделений рутила и анатаза. Переход ильменита в рутил влияет на его физические свойства и поведение в технологическом процессе.

Плёнки фосфатов по рудным минералам затрудняют диагностику, а также могут снижать качество концентрата. Подобные пленки встречены нами также и на попутных минералах, в частности на минералах группы кианита.

Еще одним важным аспектом является наличие в пробах существенного количества сростков рудных и нерудных минералов, а также обломков пород, которые тоже могут иметь в своем составе рудные минералы. Сростки обычно концентрируются в более крупных классах,

тогда как в мелких ильменит, рутил и циркон представлены преимущественно свободными зернами. Так, для сравнения, в пробе Центрального месторождения в классе $-0.56+0.25$ мм ильменит представлен только сростками с кварцем (0,17%) и фосфатом (0,16%), в классе $-0.25+0.14$ мм более 70% ильменита находится в сростках [3].

Сростки рудных минералов с пороодообразующими имеют более низкую плотность по сравнению со свободными зернами, что может определять потери при обогащении за счет распределения сростков в легкую фракцию.

В изученных пробах в классах крупнее 0.5 мм, при высоком содержании диоксида титана (до 2%), ильменит представлен только сростками с кварцем и фосфатом, в классе $-0.56+0.25$ мм ильменит представлен сростками с кварцем и фосфатом (99%) и только на 1% - свободными зернами. В классе $-0.25+0.1$ мм количество ильменита в сростках снижается до 1%, в классе менее -0.1 мм рудные минералы представлены преимущественно свободными зернами.

Опыт по гравитационному обогащению исходной пробы показал наличие сростков в монослое, которые при увеличении нагрузки распределяются в концентрат и хвосты гравитации. Сростки с кварцем очень богаты и распределяются на 99,61% в тяжелую фракцию плотностью $>3,6$ г/см³, а сростки с фосфатом, наоборот, более бедны и на 77% распределяются в легкую фракцию. Если сростки богаты по содержанию рудных минералов, классы, содержащие их в значимом в количестве, после доизмельчения направляются на доводку, и потери уменьшаются. Однако, переходя в титановый концентрат, сростки снижают его качество. Из вышеизложенного следует, что сростки должны быть предметом тщательного изучения, которое особенно эффективно с применением современных методов [1,2].

Применение методов дезинтеграции материала позволит высвободить часть ильменита и повысить качество концентрата.

С целью разрушения сростков были подготовлены пробы исходных песков крупностью $-1,0$ мм и проведены опыты с использованием установки ультразвуковой обработки (УЗО) и механической оттирочной машины (ОМ). Проведенные опыты показали следующее: в классах $-2,5 \dots +0,5$ остались только свободные зерна кварца и фосфата, в классах менее $0,5$ мм содержание свободных зерен рудных минералов увеличилось.

Сложный вещественный состав песков отечественных россыпей требует разработки более эффективных методов добычи и технологических схем обогащения, с применением новых процессов и аппаратов, что в конечном итоге может обеспечить решение проблемы промышленного использования россыпей с невысокими качественными характеристиками. Применение принципиально новых технологических

и технических решений может обеспечить высокорентабельное использование существующего, известного, разведенного или опоискованного сырья.

Список литературы

1. Газалеева Г.И., Левченко Е.Н., Братыгин Е.В. Выбор специальных методов рудоподготовки при обогащении тонковкрапленных труднообогатимых руд, содержащих редкие металлы. М.: МИСиС. Сб. материалов XI конгресса обогатителей стран СНГ. 2017. С. 4-10.

2. Левченко Е.Н., Лихникевич Е.Г. Особенности технологии переработки комплексных редкометаллических руд. Сб. материалов XII Конгресса обогатителей стран СНГ. 2019. С. 33-39.

3. Левченко Е.Н., Шихов Н.В. Особенности вещественного состава титан-циркониевых песков месторождения Центральное и их влияние на технологию обогащения. М.: МИСиС. Сб. материалов X конгресса обогатителей стран СНГ. 2015. С. 10-14.

4. Левченко Е.Н., Башлыкова Т.В., Чантурия Е.Л. Использование новых методов и технологий при изучении комплексных редкометаллических песков. М.: Цветные металлы. № 5. 2000. С. 8-12.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЛЬМЕНИТА

Анашкина Н.Е.

ИПКОН РАН, г. Москва

Аннотация. С использованием методов инфракрасной фурье-спектроскопии, растровой электронной микроскопии, микротвердомерии, определения краевого угла смачивания поверхности и потенциала течения (протекания) изучен механизм воздействия мощных наносекундных электромагнитных импульсов на морфологию, структурное состояние поверхности и физико-химические свойства (микротвердость, краевой угол смачивания, электрокинетический потенциал) ильменита.

Введение

Ильменит и рутил являются основными минералами для производства титана и диоксида титана (TiO_2): в рутилах содержание диоксида титана составляет более 91%, в ильменитах – 42–62% (1). В ильменитовом сырье более чем на 82% сосредоточены мировые запасы титана, необходимого для производства синтетического рутила (TiO_2 – 95–98%) и титанового шлака (70–85%) с последующим получением из них пигментного диоксида титана, собственно Ti , и другой продукции (1). Коренные ильменит-титаномагнетитовые руды обогащают по гравитационно-магнитной схеме с выделением двух концентратов: высококачественного ильменитового и титаномагнетитового ванадийсодержащего концентрата.

Целью настоящей работы является изучение влияния высоковольтного импульсно-периодического наносекундного (МЭМИ (2)) воздействия в воздухе при атмосферном давлении НА: морфологию, структурное состояние, микротвердость, электрические и физико-химические свойства поверхности ильменита из пород района Джуина (Бразилия).

Исследования проводили на образцах ильменита (Fe,MgTiO_3) в виде отдельных зерен из шлиховой пробы (Джуина, Бразилия) и специально подготовленных полированных пластин (аншлифов) толщиной ~ 4.5 мм. Образцы ильменита обрабатывали наносекундными электро-магнитными импульсами (МЭМИ) в воздухе при стандартных условиях; продолжительность обработки образцов изменяли в диапазоне $t_{\text{обр}}=10\text{--}150$ с.

ИК-спектры (ИКФС) ильменита регистрировали с использованием спектрометра Nicolet-380 (USA) и специальной приставки диффузного отражения Smart Diffuse Reflectance. Изменение структурного состояния (морфологии) поверхности ильменита анализировали на минеральных аншлифах методами аналитической электронной микроскопии (РЭМ-РСМА). Микротвердость минерала определяли по методу Виккерса (HV, Мпа). Для определения потенциала течения (ζ -потенциал, мВ) минеральных частиц использовали анализатор Microtrac ZETA-Check Zeta Potential Analyzer. Краевой угол смачивания (Θ°) поверхности аншлифов измеряли методом «лежащей» капли с использованием оптического микроскопа и программу анализа изображений ImageJ и плагинами DropSnake и LB-ADSA.

Обсуждение результатов

В результате воздействия высоковольтных наносекундных импульсов в ИКФ-спектрах ильменита появились дополнительные линии $917\text{--}968\text{ см}^{-1}$, связанные с колебаниями --O--O-- пероксо-групп. Интенсивность линий поглощения при 648 и 1098 см^{-1} варьировалась, а линии при 580 см^{-1} (область колебаний связи Ti--O в TiO_6 -октаэдрах) – возрастала. Анализ зависимости интенсивности спектральных линий ильменита от продолжительности электромагнитной импульсной обработки ($t_{\text{обр}}=10\text{--}150$ с) показал, что с увеличением $t_{\text{обр}}$ до 50 с наблюдалось снижение содержания Fe--OH -групп, т.е. происходило дегидроксилирование поверхности минерала, а при $t_{\text{обр}}\geq 50$ с, наоборот, – гидроксилирование поверхности. Похожая тенденция сохранялась и для изменения содержания OH -групп в составе адсорбированной на поверхности ильменита молекул воды. Следует отметить, что при $t_{\text{обр}}=30$ с относительная интенсивность линии около 650 см^{-1} , отвечающих колебаниям связи Fe--O , также достигала своего минимума.

Результаты ИКФС в целом отвечают данным о нелинейном характере изменения краевого угла смачивания и электрокинетического потенциала с увеличением времени воздействия МЭМИ. При кратковременной ($t_{\text{обр}}=10\text{--}30$ с) электроимпульсной обработке аншлифов

наблюдалось увеличение краевого угла смачивания минеральной поверхности (Θ) с 103.5° до 106.2° за счет снижения концентрации гидроксидных соединений железа, что свидетельствует о повышении гидрофобных свойств поверхности минерала; при $t_{\text{обр}}=50\text{--}150$ с происходило последовательное уменьшение Θ с 89.8° до $\sim 72^\circ$ вследствие повышения концентрации ОН-групп.

В результате кратковременной ($t_{\text{обр}} = 10$ с) электромагнитной импульсной обработки минеральных проб происходило повышение электрокинетического потенциала ильменита в области отрицательных значений с -69.5 мВ в исходном состоянии до -73.7 мВ, а с увеличением продолжительности обработки ($t_{\text{обр}}=50\text{--}150$ с) – снижение до первоначальных отрицательных значений $-70.1\text{...}-69.5$ мВ.

Установленные изменения структурного состояния поверхностного слоя ильменита обуславливали особенности морфологии и снижение микротвердости (разупрочнение) поверхности минерала: в результате кратковременной ($t_{\text{обр}}=10\text{--}30$ с) электроимпульсной обработки на поверхности аншлифов происходило образование протяженных фрагментированных следов стримерных разрядов со сложной внутренней дискретной структурой. При увеличении продолжительности электроимпульсной обработки до $t_{\text{обр}}=50$ с происходило образование каналов электрического пробоя и кристаллографически ориентированных микротрещин, что вызывало разрушение локальных областей минеральной поверхности. С увеличением времени электроимпульсной обработки происходило монотонное снижение микротвердости ильменита. с ~ 671.4 МПа в исходном состоянии до ~ 518.8 МПа ($t_{\text{обр}}=150$ с).

Одним из возможных механизмов влияния нетеплового (3) воздействия мощных наносекундных электромагнитных импульсов, вызывающего изменение структурного состояния и физико-химических свойств поверхности ильменита, является трансформация (деструкция) кристаллической структуры минерала, представленной чередующимися вдоль оси с слоями октаэдров двух типов – Fe^{2+}O_6 и Ti^{4+}O_6 . По всей видимости, в условиях импульсного периодического воздействия электрического поля высокой напряженности (4), превышающей электрическую прочность минеральных зерен ($\geq 107 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$), происходило нарушение связей Fe–O в октаэдрах первого типа, в то время как связи Ti–O в октаэдрах второго типа не претерпевали существенных деструктивных изменений. Другим возможным механизмом, является процесс электрического разрушения и удаления тонких пленок оксидов (гидроксидов) железа с поверхности ильменита при $t_{\text{обр}} \leq 30\text{--}50$ с и последующее гидроксилирование и/или окисление (ионов железа Fe^{2+} до Fe^{3+}) поверхности при $t_{\text{обр}} \geq 30\text{--}50$ с вследствие действия продуктов плазмы.

Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности и перспективах применения сравнительно непродолжительных (кратковременных – $t_{\text{обр}} = 10\text{--}30$ с) электромагнитных импульсных воздействий (МЭМИ) при стандартных условиях для структурно-химического модифицирования поверхности и физико-химических свойств ильменита с целью повышения эффективности процессов переработки комплексных титановых руд.

Благодарности. *Хочу выразить благодарность научному руководителю д.т.н. Бунину И.Ж. и д. г.-м. н. Хачатрян Г.К. за помощь в проведении исследований и интерпретации результатов.*

Список литературы

1. Резниченко, В.А. Титанаты: научные основы, технология, производство / В.А. Резниченко, В.В. Аверин, Т.В. Олюнина / М.: Наука, 2010. 267 с.
2. Чантурия, В.А. Вскрытие упорных золотосодержащих руд при воздействии мощных электромагнитных импульсов / В.А. Чантурия, Ю.В. Гуляев, В.Д. Лунин и др. // ДАН. – 1999. – Т.366. – №5. – С.680-683.
3. Черепенин, В.А. Релятивистские многоволновые генераторы и их возможные применения / В.А. Черепенин / УФН. 2006. Т. 176. №10. С. 1124.
4. Бунин, И.Ж. Влияние наносекундных импульсов высокого напряжения на физико-химические и технологические свойства минералов редких металлов/ И.Ж. Бунин, В.А. Чантурия, М.В. Рязанцева и др./Изв. РАН. Сер. Физ. 2018. Т. 82. №5. С. 633

УДК 622.765

ФЛОТАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ РЕАГЕНТА ПИРРОДТК ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ МЕДИ ИЗ КОМПЛЕКСНОЙ РУДЫ

Гапчич А.О., Ланцова Л.Б.

ИПКОН РАН, г. Москва

Актуальность разработки и использования новых реагентов и реагентных режимов при обогащении комплексных медно-золотых руд обусловлена сложным вещественным составом руд, поступающих на переработку, микронной вкрапленностью ценных минералов, наличием в руде флотоактивных сульфидов железа и мышьяка [1, 2].

Особенно важно изыскание отечественных селективных собирателей направленного действия. В настоящее время отмечается возросший интерес российских химических компаний к выпуску реагентов для горной промышленности (ООО «Волжский Оргсинтез», ООО «Квадрат Плюс», «Квалитет», «Флотент Кемикалс Рус», «МБИ-синтез» и др.),

однако, на обогатительных фабриках самым применяемым собирателем все еще остается ксантогенат [3, 4].

Реагенты-собиратели класса дитиокарбаматов (модифицированный диэтилдитиокарбамат ДЭДТКм, дибутилдитиокарбамат ДБДТК и эфиры дитиокарбаминовой кислоты ОПДТК и ЦЭДЭТК) обладают комплексобразующими свойствами по отношению к Au и Cu и обеспечивают прирост извлечения этих металлов во флотационные концентраты при флотации золотосодержащих руд [5-8].

Цель данной работы - оценка флотационной активности реагента класса дитиокарбаматов – пирролидиндитиокарбамата (ПирроДТК) при флотации полиметаллической руды одного из перспективных месторождений России.

Тестирование реагента ПирроДТК в условиях лаборатории ИПКОН РАН выполнено на частной пробе комплексной золотомедной с содержанием меди 1,5%, мышьяка 1,12%.

Условия эксперимента. Измельчение дробленой руды проводили в лабораторной шаровой мельнице МШЛ-1 объемом 0,001 м³ при отношении Т:Ж:Ш 1:0,5:6 в течение 50 мин до крупности 85% класса -0,074 мм. Навеска руды 300 г. Измельченную руду помещали в камеру лабораторной флотационной машины ФМЛ 1 (237 ФЛ).

Флотационные испытания проведены по схеме основной флотации в открытом цикле с получением концентрата и хвостов. В качестве вспенивателя использовали МИБК при расходе 50 г/т. Расход бутилового ксантогената (БКК) 100 г/т в базовом опыте и 50 г/т при совместном применении с ПирроДТК, расход ПирроДТК – 50 – 100 г/т. Порядок подачи реагентов – ПирроДТК, затем БКК, вспениватель. Суммарный расход собирателей 100 г/т. Время агитации с собирателями по 2 мин, вспенивателем — 1 мин. Время флотации 8 мин.

Результаты испытаний и расход реагентов представлены в табл.

Таблица

Результаты флотационного обогащения руды Малиновского месторождения с использованием ПирроДТК и БКК

Расход реагентов, г/т	Продукты	Выход %	Содержание, %		Извлечение, %	
			Cu	As	Cu	As
1	2	3	4	5	6	7
БКК – 100	Концентрат	12,61	9,77	5,29	91,15	58,9
	Хвосты	87,39	0,137	0,11	8,85	41,1
	Исходное	100	1,35	1,13	100	100
ПирроДТК – 50	Концентрат	8,74	13,33	4,71	86,3	41,16
	Хвосты	91,26	0,21	0,13	13,7	58,84
	Исходное	100	1,4	1,12	100	100

продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7
ПирродТК – 100	Концентрат	8,08	15,2	3,34	93,16	24,09
	Хвосты	91,92	0,1	0,12	6,84	75,91
	Исходное	100	1,32	1,12	100	100

Как видно из таблицы, при флотации в базовом режиме получен концентрат с содержанием меди – 9,77%, мышьяка – 5,29%, при извлечении Cu – 91,15%, As – 5,29%.

Замена 50% расхода ксантогената на ПирродТК привела к повышению содержания Cu – до 13,33% при небольшом снижении выхода концентрата и извлечения. При полной замене БКК на ПирродТК (100 г/т) содержание меди в концентрате возросло до 15,2%, извлечение меди – до 93,16%. Следует отметить, что положительным воздействием реагента явилось его меньшая активность в отношении арсенопирита. Содержание мышьяка в медном концентрате снизилось на 1,85%.

Таким образом, реагент проявил большую по сравнению с ксантогенатом избирательность действия к халькопириту и меньшую флотационную активность по отношению к арсенопириту и вольфрамиту, что может положительно отразиться на качестве медного концентрата и сократить потери вольфрама с медным концентратом.

Исследование выполнено по теме ББФ FMMS-2024-0006.

Список литературы

1. Chanturiya V.A., Kondratiev S.A. Contemporary understanding and developments in the flotation theory of non-ferrous ores, Miner. Process. and Extr. Metall. Rev., 2019, Vol. 40, №6. – P. 390-401.
2. Александрова Т.Н., Орлова А.В., Таранов В.А. Повышение эффективности переработки комплексных медных руд варьированием реагентного режима // ФТПРПИ. – 2020. – №6. – С. 116-124.
3. Марфицин А.В. Экономический эффект применения реагентов Florent для горной промышленности // Золото и технологии. – 2020. – № 4(50). – С. 102-105.
4. Рябой В.И. Производство и использование флотационных реагентов в России // Горный журнал. 2011. № 2. С. 49–53.
5. Tijsseling L.T., Dehaine Q., Rollinson G.K., Glass H.J. Flotation of mixed oxide sulphide copper-cobalt minerals using xanthate, dithiophosphate, thiocarbamate and blended collectors, J. Miner. Eng., 2019, Vol. 138. – P. 246-256.
6. Ly N., Nguyen T., Zoh K.-D., Joo S.-W. Interaction between diethyldithiocarbamate and Cu(II) on gold in non-cyanide wastewater, Sensors, 2017, Vol. 17, №11. – P. 1-12.
7. Матвеева Т.Н., Громова Н.К., Ланцова Л.Б., Гладышева О.И. К вопросу о механизме взаимодействия реагентов морфолиндитиокарбамата и цианэтилдитиокарбамата с низкоразмерным золотом на поверхности

сульфидных минералов при флотации труднообогатимых золотосодержащих руд // ФТПРПИ. — 2022. — №4. — С. 98-107.

8. Бырько В.М. Дитиокарбаматы. — М.: Наука, 1984. — 342 с.

УДК 622.765

АПРОБАЦИЯ РЕАГЕНТА ЦИАНЭТИЛДИТИОКАРБАМАТА ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ ЛЕЖАЛЫХ ХВОСТОВ

Гладышева О.И.¹, Гапчич А.О.²

¹ООО «СПЕЦВМТЕХ», ²ИПКОН РАН, г. Москва

В настоящее время, как в России, так и за рубежом в промышленную переработку поступают труднообогатимые руды сложного вещественного состава и лежалые хвосты прошлых лет с низким содержанием ценных компонентов, эмульсионной и тонкодисперсной вкрапленностью благородных и цветных металлов. Получение цветных металлов и золота из данных видов минерального сырья стало возможным благодаря внедрению новых технологий и реагентов [1, 2].

Актуальность изыскания новых отечественных реагентов направленного действия обусловлена невысокой селективностью традиционных собирателей по отношению к минералам, содержащим цветные и благородные металлы. Дитиокарбаматы циклического и алифатического строения обладают комплексообразующими свойствами по отношению к Au и Cu и способны за счет избирательной адсорбции повышать флотуемость золотосодержащих минералов [3-5]. Реагент S-цианэтил N, N-диэтилдитиокарбамата (ЦЭДЭТК) относится к таким реагентам.

В условиях ограниченного ассортимента импортных реагентов российские химические компании заинтересованы в производстве реагентов при наличии запроса от горных предприятий. Реагент ЦЭДЭТК относится к 3 классу опасности и может быть выпущен «АО «Волжский Оргсинтез», «Флотент Кемикалс Рус», «МБИ-синтез» и др. в случае положительных результатов опытно-промышленных испытаний [6].

Цель данной работы – апробация реагента ЦЭДЭТК в лабораторных условиях рудной флотации на пробе лежалых оловосодержащих хвостов.

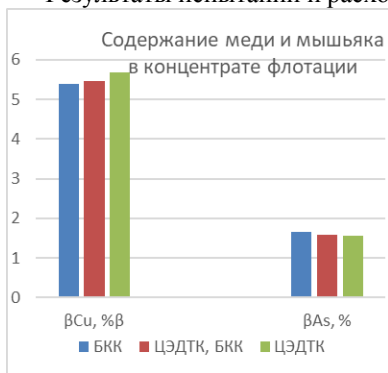
Тестирование реагента ЦЭДЭТК в условиях лаборатории ИПКОН РАН выполнено на частной пробе хвостов с содержанием 0,52% Cu, 0,4% As.

Измельчение исходной пробы хвостов проводили в лабораторной шаровой мельнице МШЛ-1 объемом 0,75 л при отношении Т:Ж:Ш 1:0,5:6 в течение 30 мин до крупности 85 % класса -0,074 мм. Навеска

250 г. Измельченную пробу помещали в камеру лабораторной флотационной машины ФМЛ.

Флотационные испытания проведены по схеме основной флотации в открытом цикле с получением чернового медного концентрата и хвостов. В качестве вспенивателя использовали МИБК при расходе 100 г/т. В качестве депрессора породной части применяли жидкое стекло. Расход бутилового ксантогената (БКК) 200 г/т в базовом опыте и 100 г/т при совместном применении с ЦЭДЭТК, расход ЦЭДЭТК – 100–200 г/т. Порядок подачи реагентов – ЦЭДЭТК, затем БКК, вспениватель. Суммарный расход собирателей 200 г/т. Время агитации с собирателями по 2 мин, вспенивателем — 1 мин. Время флотации 8 мин.

Результаты испытаний и расход реагентов представлены на рис. 1 и 2.



Как видно из рис. 1 и 2, при флотации в базовом режиме получен черновой медный концентрат с содержанием меди – 5,39%, мышьяка – 1,65%, при извлечении Cu – 78,8%, As – 32,9%.

Замена 50% расхода ксантогената на ЦЭДЭТК привела к повышению содержания Cu – до 5,47% и повышению извлечения меди до 85,71%. В то же время отмечено снижение содержания мышьяка в концентрате до 1,58%. При полной замене БКК на ЦЭДЭТК (200 г/т) содержание меди в концентрате возросло до 5,68%, извлечение меди – до 85,71%. Следует отметить, что положительным воздействием реагента явилось его меньшая активность в отношении арсенопирита. Содержание мышьяка в медном концентрате снизилось до 1,55%, извлечение до 28,9%. Введение перечистных операций флотации чернового концентрата позволит повысить содержание меди, а использование ЦЭДЭТК – сократить содержание мышьяка в медном концентрате.

Таким образом, реагент ЦЭДЭТК проявил большую по сравнению с ксантогенатом избирательность действия к халькопириту и меньшую флотационную активность по отношению к арсенопириту, что может

положительно отразиться на качестве медного концентрата по содержанию меди и мышьяка и сократить потери меди с хвостами флотации.

Список литературы

1. Chanturiya V.A., Kondratiev S.A. Contemporary understanding and developments in the flotation theory of non-ferrous ores, Miner. Process. and Extr. Metall. Rev., 2019, Vol. 40, №6. – P. 390-401.

2. Александрова Т.Н., Орлова А.В., Таранов В.А. Повышение эффективности переработки комплексных медных руд варьированием реагентного режима // ФТПРПИ. – 2020. – №6. – С. 116-124.

3. Tijsseling L.T., Dehaine Q., Rollinson G.K., Glass H.J. Flotation of mixed oxide sulphide copper-cobalt minerals using xanthate, dithiophosphate, thiocarbamate and blended collectors, J. Miner. Eng., 2019, Vol. 138. – P. 246 - 256.

4. Бырько В.М. Дитиокарбаматы. – М.: Наука, 1984. – 342 с.

5. Матвеева Т.Н., Громова Н.К., Ланцова Л.Б., Гладышева О.И. К вопросу о механизме взаимодействия реагентов морфолиндитиокарбамата и цианэтилдидитиокарбамата с низкоразмерным золотом на поверхности сульфидных минералов при флотации труднообогатимых золотосодержащих руд // ФТПРПИ. — 2022. – №4. – С. 98-107.

6. Марфицин А.В. Экономический эффект применения реагентов Flo-tent для горной промышленности // Золото и технологии. – 2020. – №4 (50). – С. 102-105.

УДК 661.834:669.884

СПОСОБ ПЕРЕРАБОТКИ ВЫСОКОКАРБОНАТНЫХ ЛИТИЙСОДЕРЖАЩИХ СЛЮДИСТЫХ РУД МЕТОДОМ СПЕКАНИЯ И ОБРАТНОЙ СОРБЦИИ

Фуреев И.Л., Головки В.В.

АО «Гиредмет» имени Н.П. Сажина, г. Москва

Литий является критически важным металлом для высокотехнологичных отраслей экономики, прежде всего для производства литий-ионных аккумуляторов [1]. В свете импортозамещения и обеспечения технологического суверенитета России разработка эффективных технологий переработки отечественного литийсодержащего сырья приобретает особую актуальность [2]. Значительная часть российских запасов лития связана с рудами, не имеющими аналогов в мировой практике переработки, такими как высококарбонатные слюдистые руды, представленные тонкодисперсными взаимопрорастаниями литийсодержащей слюды (промежуточной по составу между полилитием и алюмосиладонитом) и алюмосиликатной матрицы [3]. Низкая

контрастность физических свойств ценных и породных минералов делает такие руды необогатимыми традиционными физическими методами, а высокое содержание карбонатов (35-50%) делает экономически нецелесообразным прямое кислотное вскрытие из-за высокого расхода кислоты [4]. В связи с этим целью данной работы была разработка и испытание комбинированной технологии, сочетающей стадию спекания с сульфатами и последующую сорбционную очистку.

Объектом исследований служила проба руды месторождения Шавазсай со средним содержанием Li_2O 0,50-0,55% (0,26% Li). Химический состав руды, %: 0,26 Li; 11,60 Ca; 1,37 K; 0,10 Na; 2,30 Mg; 1,40 Al; 1,80 Fe; 0,02 Rb; 0,10 Sr; 8,80 Si.

Для вскрытия руды использовали метод сульфатизирующего обжига. Шихту, состоящую из руды и гипса Алмалыкского химического завода в соотношении 1:0,3, прокаливали в муфельной печи в диапазоне температур 900-1050°C в течение 2 часов. Охлажденный спек измельчали до крупности <0,25 мм и выщелачивали дистиллированной водой при Т:Ж = 1:1 в течение 1 часа.

Сорбционную очистку продуктивных растворов проводили на сильнокислотном сульфокатионите ТОКЕМ-160 (ТУ 2227-023-72285630-2011) в литиевой форме [5]. Сорбцию вели в напорных колоннах с зажатым слоем сорбента снизу вверх. Аналитический контроль содержания элементов осуществляли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS).

Исследование спекания руды. Результаты спекания при различных температурах показали, что максимальное извлечение лития достигается при температуре 950°C. Полученные зависимости согласуются с последующими укрупненно-лабораторными испытаниями. Дальнейшее повышение температуры приводит к снижению извлечения лития, вероятно, из-за уплотнения структуры спеков с образованием стеклофазы и ухудшения кинетики последующего выщелачивания.

Разработка сорбционной технологии. Продуктивные растворы после выщелачивания спеков имеют сложный солевой состав (Li ~0,6 г/л, высокое содержание Ca, K, Na, Mg, Al, Fe).

Было установлено, что традиционные литий-селективные сорбенты (типа Li-селективных неорганических ионитов) имеют высокую стоимость, низкую динамическую емкость и недоступны на отечественном рынке в промышленных масштабах [6]. В качестве альтернативы предложена схема обратной сорбции на серийно производимом отечественном сульфокатионите ТОКЕМ-160 в литиевой форме.

Суть метода заключается в том, что сорбент предварительно насыщается литием. При пропускании через него продуктивного раствора примесные элементы (Ca, Mg, K, Na, Fe, Al), имеющие большее сродство к функциональным группам сорбента согласно ряду селективности ($\text{Fe}^{3+} > \text{Al}^{3+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Li}^+$), вытесняют ионы лития. Это приводит к двум эффектам одновременно: 1) глубокой очистке раствора от примесей; 2) концентрированию лития в растворе (рисунок). Концентрация лития в выходном потоке с колонны достигает 6,15 г/л, что в 10 раз выше, чем в исходном растворе.

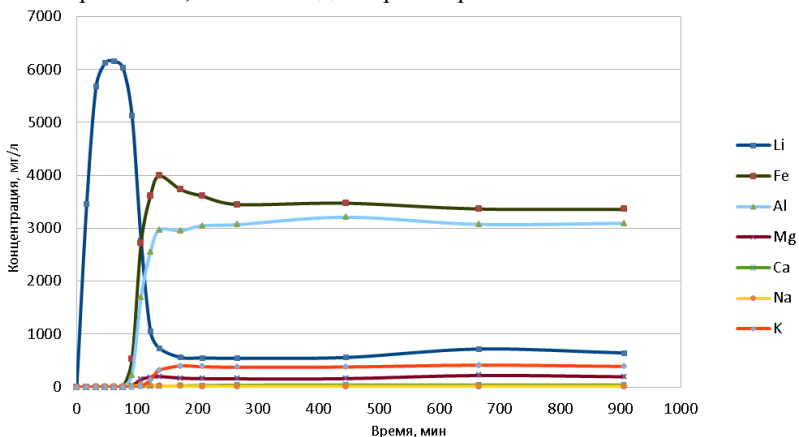


Рисунок – Выходные кривые сорбции лития и конкурирующих элементов на катионите ТОКЕМ-160

Анализ выходных кривых показал, что катионит ТОКЕМ-160 обладает длительным периодом защитного действия по отношению к примесям (>60 минут), что достаточно для эффективной работы технологической схемы. Регенерацию насыщенного примесями сорбента проводили 2% раствором серной кислоты. Выходные кривые десорбции подтвердили полноту удаления примесных элементов и возможность многократного использования сорбента.

Опытно-промышленные испытания и получение готовой продукции. На основании лабораторных исследований была разработана и запатентована [7] четырехколоночная схема сорбционно-десорбционного модуля, обеспечивающая непрерывность процесса. Очищенный раствор ($\text{Li} \sim 6$ г/л, примеси <0.5 мг/л) направляли на осаждение карбоната лития.

Осаждение проводили содой. Двухкратная промывка осадка горячей дистиллированной водой при 90°C позволила получить карбонат лития состава, представленного в табл. 1.

Таблица 1

Качество получаемого карбоната лития

Показатель	Получаемый продукт	Требования ТУ 6-09-3728 (х.ч.)
Li_2CO_3 , %	99,67	не менее 99,00
Железо (Fe), %	0,0008	не более 0,001
Кальций (Ca), %	0,0024	не более 0,003
Магний (Mg), %	0,0005	не более 0,001
Щелочные металлы (Na+K), %	0,0041	не более 0,005
Хлориды (Cl^-), %	0,0014	не более 0,002
Сульфаты (SO_4^{2-}), %	0,0029	не более 0,005

Продукт соответствует требованиям высшего сорта и пригоден для использования в производстве литий-ионных аккумуляторов. Акт опытно-промышленных испытаний подтвердил стабильность технологии при переработке 3000 кг руды и высокие технологические показатели: извлечение лития на стадии выщелачивания – 92,95%, выход готового продукта – 87,1%.

Заключение

Разработана и успешно испытана комбинированная технология переработки упорных высококарбонатных слюдистых литиевых руд, включающая:

1. Сульфатизирующее спекание руды с гипсом и сульфатом калия (соотношение 1:0,3) при оптимальной температуре 950°C.

2. Водное выщелачивание спека с извлечением лития в раствор до 92,95%.

3. Обратную сорбционную очистку продуктивных растворов на отечественном катионите ТОКЕМ-160 в литиевой форме, позволяющую одновременно очистить раствор от примесей и сконцентрировать литий с 0,6 до 6,15 г/л.

4. Осаждение карбоната лития батарейного качества (99,67% Li_2CO_3).

Технология позволяет вовлечь в переработку бедные и упорные руды российских месторождений (Урикское, Гольцовое, Алахинское, Ачиканское), характеризующихся высоким содержанием карбонатов и тонковкрапленными слюдами. Использование отечественного сорбента и утилизация отхода (гипса) обеспечивают снижение себестоимости продукции на 25-40% по сравнению с традиционными кислотными методами.

Список литературы

1. Курков А.В., Мамошин М.Ю., Рогожин А.А. Литий: технологии извлечения из растворов (ключевое значение, новое поколение решений, перспективные объекты). – М.: ВИМС, 2021. – 135 с.
2. Саркаров Р.А., Белан С.И., Гусейнов Н.М. Оценка современного состояния и перспективы добычи лития и его соединений в России // Индустриальная экономика. 2022. Т. 1. №2. С. 57–68.
3. Головки В.В., Фуреев И.Л., Вацура Ф.Я., Криволапова О.Н. Исследование зависимости извлечения ценных компонентов от температуры спекания литиевых слюдястых руд // Цветные металлы. 2024. №8. С. 70–75.
4. Стасенко А.И., Бланко-Педрахон А.М., Каграманов Г.Г. Извлечение лития из природных месторождений. Часть 1. Перспективы выделения лития из рудных месторождений // Химическая промышленность сегодня. 2024. №1. С. 2–10.
5. Головки В.В., Фуреев И.Л., Криволапова О.Н. Способ сорбционного извлечения лития из продуктивного раствора при переработке слюдяистой руды месторождения Шавазсай // Цветные металлы. 2025. №5. С. 47–53.
6. Ling Li, Vishwanath G. Deshmane, M. Parans Paranthaman, Ramesh Bhavet al. Lithium recovery from aqueous resources and batteries: a brief review // Johnson Matthey Technology Review. 2018. Vol. 62, Iss. 2. P. 161–176.
7. Патент RU 2842445 C1. Способ селективного сорбционного извлечения лития из продуктивных растворов / Головки В.В., Савельев Д.С., Фуреев И.Л., Вацура Ф.Я.; опубл. 26.06.2025.

УДК 628.477.7: 622.234.42: 66.084.8

ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ СЛОЕВОГО СЖИГАНИЯ КАМЕННЫХ УГЛЕЙ

**Писарева А.А.^{1,2}, Зеновьев И.А.¹, Милетенко Н.И.¹,
Кунилова И.В.¹, Лавриненко А.А.¹**

¹*ИПКОН РАН*, ²*РХТУ имени Д.И. Менделеева, г. Москва*

Аннотация. В результате исследования процессов извлечения ценных компонентов из ЗШО слоевого сжигания каменного энергетического угля промышленной котельной показана эффективность ультразвуковой интенсификации кислотного выщелачивания при частоте 22 кГц для повышения извлечения редких и цветных металлов в фильтрат.

Введение. Актуальность проблемы обусловлена необходимостью ускорения утилизации огромного количества накопленных золошлаковых отходов [1] и перспективностью применения золошлаковых отходов

слоевого сжигания каменных углей в качестве комплексного техногенного минерального сырья [2].

Золошлаковые отходы слоевого сжигания каменных углей имеют меньшую температуру сжигания по сравнению с пылеугольным способом, что в совокупности с отличающимися условиями тепломассообмена при сжигании приводят к большему концентрированию в зольном остатке некоторых цветных и редких металлов [3]. Близкое расположение угольного месторождения к размещению месторождений полиметаллических руд в Южной Сибири обусловило повышенное содержание цветных и редких элементов в каменном энергетическом угле, поступающем на сжигание в промышленную котельную.

Результаты и их обсуждение. Исследуемые золошлаковые отходы содержат более 25% Al_2O_3 , что делает их потенциальным источником алюминия. Также они отличаются повышенными содержаниями циркония (1000 г/т), редкоземельных элементов (548 г/т), галлия (36 г/т) и других цветных металлов (Zn, Co, Sb и пр.).

Перед гидрометаллургическими процессами было проведено предварительное отделение недожога методом флотации и железа методом магнитной сепарации. Ранее нами было установлено [2], что кристаллическая фаза алюмосодержащих соединений в исследуемых ЗШО представлена корундом Al_2O_3 , в отличие от ЗШО пылеугольного сжигания, содержащих менее тугоплавкий муллит. Для повышения эффективности вскрытия данного упорного к выщелачиванию высококремнистого сырья, содержащего почти 40 % SiO_2 , с которым связана часть ценных металлов, был проведен предварительный низкотемпературный обжиг.

В работе проведено исследование выщелачивания ценных элементов из обожженных продуктов магнитной сепарации золошлаковых отходов с использованием ультразвукового способа интенсификации. Ультразвук достаточно давно используется в гидрометаллургической промышленности с целью повышения извлечения ценных элементов при выщелачивании, сокращения времени растворения и расхода реагентов. Кислотное выщелачивание образцов проводили с использованием кислотной композиции реагентов на основе H_2SO_4 и HCl , ранее показавшей свою эффективность при выщелачивании золы [2], при температуре 70 °С с последующим обескремниванием. Ультразвуковую обработку проводили при частоте 22 кГц.

Применение ультразвуковой обработки суспензии позволило повысить извлечение ценных элементов в фильтраты кислотного выщелачивания для Mn до 78%, для Co до 73%, для Zn до 70%, для Zr до 41%, для Y до 35,5%, Nb до 57,6%, для V до 13%, для Ta до 77%, для Ce – до 64,6%. Извлечение алюминия снизилось незначительно – до 60%.

Извлечение кремния в фильтраты снизилось до 16% для фракции – 0,2+0,071 мм и до 20,6% для фракции -0,071+0,040 мм. При уменьшении крупности частиц золы содержание алюминия в фильтрате увеличилось с 144 до 323 мг/л. При выщелачивании фракции 0,071+0,040 мм ЗШО слоевого сжигания углей был получен фильтрат, содержащий ценные элементы (мг/л): 323 Al, 1,08 Zr, 2,1 Mn, 0,24 V, 0,33 Co, 0,067 Y, 0,09 Sc и др. После выделения концентратов редких элементов известными гидрометаллургическими методами алюминийсодержащий раствор может быть использован в качестве коагулянта для очистки сточных вод. Минеральный остаток после сушки может быть использован в качестве кремнистой добавки в цементном производстве либо в качестве мелиоранта для улучшения структуры почвы.

Заключение. В результате исследования ультразвуковой интенсификации процессов выщелачивания золошлаковых отходов слоевого сжигания каменных энергетических углей, отличающихся от ЗШО пылеугольного сжигания условиями сжигания, показана ее эффективность для повышения извлечения ценных металлов в фильтрат.

Список литературы

1. П.Н. Сниккарс, И. Ю. Золотова, Н.А. Осокин. Утилизация золошлаков ТЭС как новая кросс-отраслевая задача // Энергетическая политика. – 2020. №7 (149). – С. 35-45. DOI: 10.46920/2409-5516_2020_7149_34.
2. Лавриненко А.А., Кунилова И.В., Гольберг Г.Ю. Влияние низкотемпературного обжига золы сжигания углей с щелочными реагентами на эффективность извлечения ценных компонентов // ГИАБ. – 2023. – №10. – С. 104-121. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_10_0_104.
3. Лавриненко А.А., Кунилова И.В., Крылов И.О., Писарева А.А. Извлечение ценных компонентов из золошлаковых отходов слоевого сжигания каменных углей // Горный информационно-аналитический бюллетень. - № 9-1. - С.90-102. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_91_0_90.

УДК 622.765.061

ВЛИЯНИЕ 1-КАРБОКСИ-2-ПЕРГИДРО-(1,3,5-ДИТИАЗИН)-5-ИЛ-ЭТАНА НА ГИДРОФОБНЫЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ ГАЛЕНИТА И СФАЛЕРИТА

Каркешкина А.Ю., Гетман В.В.

ИПКОН РАН, г. Москва

Гидрофобность/гидрофильность (смачиваемость) поверхности зависит от свободной поверхностной энергии материала и структуры приповерхностного слоя, наличия микро- и наномасштабной шероховатости [1].

Например, для того чтобы поверхность приобрела гидрофобные свойства, необходимо уменьшить её поверхностную энергию так, чтобы она стала меньше поверхностной энергии смачивающей жидкости. Достижение данного условия возможно путём введения в состав поверхностного слоя вещества с низким значением поверхностного натяжения.

Важным параметром, который характеризует смачивание поверхностей, является угол контакта (также называют угол смачивания или краевой угол смачивания) – это угол, образованный на границе между поверхностью жидкости и твердым телом. Экспериментальное определение показателей, характеризующих смачиваемость поверхности твёрдой фазы, связано с измерением равновесного краевого угла смачивания (КУС) с помощью специальных приборов. В работе КУС определяли на приборе измерения краевого угла смачивания DSA25 (KRUSS). Измеряли статический угол контакта, т.е. когда капля жидкости находится в неподвижном состоянии на твердой поверхности [2]. Все методы определяют КУС, как тангенс угла наклона касательной к контуру капли в точке касания капли твердой поверхности. В нашем случае расчет угла смачивания проводили эллиптическим методом. По сравнению с другими данный метод является достаточно сложным. Поэтому он используется для вычисления угла смачивания по методу лежащей капли в диапазоне 0-130°C. Полный контур лежащей капли подгоняется под уравнение конических секторов. Производная этого уравнения в точке пересечения линии контура с базовой линией дает наклон касательной в точке контакта трех фаз, следовательно, краевой угол смачивания.

Целью настоящих исследований являлось изучение влияния реагента группы дитиазинов (1-карбокси-2-пергидро-(1,3,5-дитиазин)-5-ил-этан) на изменение смачиваемости поверхности галенита и сфалерита.

Объекты исследования – сфалерит и галенит, как носители серебра и редких элементов. Синтез 1-карбокси-2-пергидро(1,3,5-дитиазин)/-5-илэтан (КПДЭ) проводили в лабораторных условиях в АО «Ведущем научно-исследовательском институте химической технологии» [3]. Реагент 1-карбокси-2-пергидро-(1,3,5-дитиазин)-5-ил-этан представляет собой сорбент гетероциклического сероазотсодержащего соединения, в котором донорные атомы третичного азота и серы разделены углеводородными мостиками.

Смачиваемость поверхности минералов изучали до и после контакта с 0,05% и 0,1% раствором реагента КПДЭ. Аншлифы промывали дистиллированной водой, высушивали на воздухе и фиксировали на предметном столике установки измерения краевого угла смачивания DSA25. С помощью шприца с иглой, заполненного дистиллированной водой, на поверхность аншлифа помещали каплю воды объемом 1,5 мкг и фиксировали КУС не менее чем в трех точках. При этом, после того как капля

358

воды помещалась на аншлиф минерала, измерения проводили в течение 2 секунд и количество измерений составляло от 5 до 10 в секунду, что позволяло получать достоверные значения КУС в каждой точке измерения. Время контакта с раствором реагента составляло 60 минут. Поверхность минерала после каждой серии измерений зачищали тонким кварцевым порошком и промывали дистиллированной водой. Результаты измерений представлены в таблице.

Таблица

Значения краевых углов смачивания аншлифов галенита и сфалерита до и после контакта с растворами 1-карбокси-2-пергидро-(1,3,5-дителиазин)-5-ил-этана

Минерал	Краевой угол смачивания					
	Без реагента		0,05% раствор реагента		0,1% раствор реагента	
	угол, град	Δ , град	угол, град	Δ , град	угол, град	Δ , град
Галенит	71,16	2,52	104,75	14,05	98,27	2,26
Сфалерит	67,35	3,92	85,24	15,28	76,64	1,78

Анализ полученных значений КУС позволил установить, что КУС на необработанных минералах варьируется в пределах 67-71°, т.е. поверхность минералов гидрофильна, КУС меньше 90°. После контакта минералов с 0,05% раствором КПДЭ КУС увеличился, причем отклонения от среднего значения высокие 14-15 градусов, т.е. реагент адсорбировался на поверхности шлифа очагами. После контакта с 0,1% раствором реагента значения КУС для сфалерита составляет 76,64°, а для галенита 98,27°. Отклонения от среднего значения варьируются в пределах 1,7-2,3°, что говорит о равномерной сорбции 1-карбокси-2-пергидро-(1,3,5-дителиазин)-5-ил-этана по поверхности аншлифов минералов. Соответственно после контакта сфалерита и галенита с 0,05 и 0,1% раствором КПДЭ поверхность галенита становится гидрофобной, КУС больше 90°.

Таким образом, реагент 1-карбокси-2-пергидро(1,3,5-дителиазин)/-5-илэтан гидрофобизирует поверхность галенита, что положительно скажется в процессе флотационного разделения галенита и сфалерита, т.к. поверхность сфалерита после контакта с раствором реагента остается гидрофильной.

Список литературы

1. Shen Y., Tao J., [et al]. Relationship between Wetting Hysteresis and Contact Time of a Bouncing Droplet on Hydrophobic Surfaces. ACS Applied Materials & Interfaces, Vol. 7(37). 2015. 26-p.

2. Киселев М. Г., Савич В. В., Павич Т. П. Определение краевого угла смачивания на плоских поверхностях // Наука и техника, 2006. №1. С. 38-41.

3. Хорозова О.Д., Дальнова Ю.С. и др. Синтез и физико-химические свойства 1-карбокси-2-/пергидро(1,3,5-дитиазин)/-5-илэтана при сорбции тяжелых, благородных и редкоземельных элементов // Сорбционные и хроматографические процессы. 2024. Т. 24, №1. С. 76-87. 10.17308/sorpchrom.2024.24/12029.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ РУДЫ

Лукьянов К.В., Лавриненко А.А.

ИПКОН РАН, г. Москва

Актуальность совершенствования технологий переработки руд полиметаллических месторождений обусловлена наличием существенных технологических и экологических ограничений в применяемой схеме коллективно-селективной флотации. Несмотря на обеспечение получения товарных медного, свинцового и цинкового концентратов, использование высокотоксичных бихроматов в качестве депрессора цинка вступает в противоречие с принципами экологической безопасности и устойчивого развития. Кроме того, указанная технология демонстрирует недостаточную адаптивность к вариативности вещественного состава руд, что приводит к снижению извлечения ценных компонентов и росту операционных затрат. Внедрение альтернативных технологических решений, таких как применение нетоксичных депрессирующих реагентов селективного действия или комбинированных гидрометаллургических схем, позволит повысить рентабельность и экологическую безопасность производства, что соответствует современным направлениям развития горно-металлургической отрасли.

К числу ключевых проблем действующей технологической схемы относятся неполная раскрываемость минеральных фаз и недостаточно высокие показатели извлечения целевых металлов. Низкая технологическая эффективность сепарации обусловлена сложностью вещественного состава руды, а именно присутствием тонковкрапленных сростаний, таких как эмульсионные вкрапления халькопирита в сфалерите и галенита в сфалерите и пирите. Данный тип минеральных сростков существенно осложняет процесс селективного разделения минералов при флотационном обогащении.

Руда измельчается до крупности 86% класса -74 мкм в четыре стадии. При первой стадии измельчения помол достигает 40% класса -74 мкм, после второй стадии измельчения 55% - 74 мкм. Добиться показателя крупности 75% -74 мкм позволяет третья стадия измельчения.

Потери свинца в медном концентрате составляют 20-22%, в отвальных хвостах — 10-25%. Содержание свинца в свинцовом концентрате также низкое (22-31%), а потери цинка достигают 25%.

В табл. 1 приведены технологические показатели обогащения полиметаллической руды.

Таблица 1

Технологические показатели обогащения полиметаллической руды

Наименование продуктов	Содержание, %			Извлечение, %		
	Cu	Pb	Zn	Cu	Pb	Zn
Медный концентрат	23,38	9,11	10,64	58,07	22,10	6,76
Свинцовый концентрат	7,03	22,21	13,63	14,42	44,49	7,14
Цинковый концентрат	2,68	3,06	50,02	15,64	17,42	74,46
Отвальные хвосты	0,26	0,36	0,99	11,87	15,99	11,64
Руда	1,78	1,82	6,95	100,00	100,00	100,00

Для повышения эффективности переработки руды было предложено на первом этапе использование гравитационного обогащения для извлечения золота из различных продуктов цикла измельчения, результаты которого представлены на рис. 1.

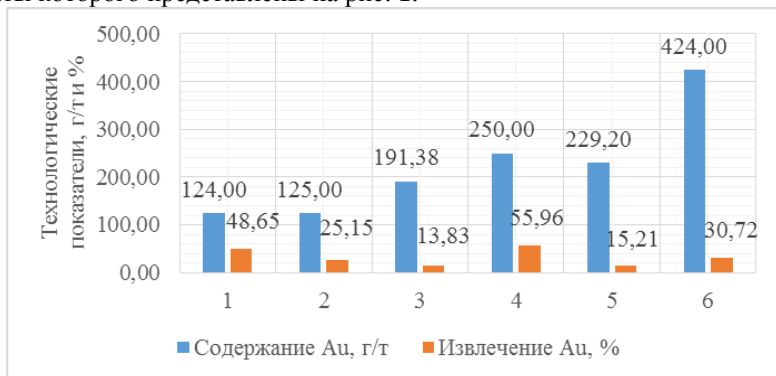


Рисунок 1 - Результаты исследований по гравитационному обогащению продуктов измельчения
1 – пески з/ц II стадии измельчения; 2 – пески з/ц III стадии измельчения; 3 – пески з/ц IV стадии измельчения; 4 – разгрузка м-цы II стадии измельчения; 5 – разгрузка м-цы III стадии измельчения; 6 – разгрузка м-цы IV стадии измельчения

Испытания с центробежными концентраторами «Нельсон» и концентрационными столами показали значительное увеличение содержания золота в гравитационном концентрате. Это позволило повысить извлечение золота до 49% при содержании в концентрате от 124 г/т до 424 г/т.

Наиболее высокие качественные показатели гравитационного обогащения по схеме, приведенной на рис. 2, получены при обогащении разгрузок мельниц II, III, IV стадий измельчения. Содержание золота в концентратах составило от 229 г/т до 424 г/т при извлечении от исходного питания от 15% до 56%. На основании полученных результатов можно сделать вывод о целесообразности использования технологии гравитационного извлечения золота в циклах измельчения руды, что позволит значительно сократить потери золота с отвальными продуктами обогащения полиметаллической руды за счет выделения основной массы свободного золота гравитационной крупности в самостоятельный товарный гравитационный концентрат.

Ключевым моментом при разработке технологии обогащения руды стала селекция медно-свинцового концентрата.

Несмотря на широкое промышленное применение, цианидный и бихроматный методы сепарации медно-свинцовых концентратов сопряжены с существенными экологическими рисками и технологическими ограничениями. Цианидная селекция характеризуется повышенными потерями благородного металла вследствие его перехода в растворимую форму в цианидсодержащей пульпе, а также низкой эффективностью в отношении депрессии сульфидов меди вторичного происхождения. Бихроматный метод, в свою очередь, провоцирует повышенные потери свинца и меди. Это обусловлено недостаточной эффективностью депрессии галенита, активированного катионами меди, а также нестабильностью технологических показателей, что свидетельствует о низкой робастности процесса.

Для селекции медно-свинцового концентрата из руды была разработана технология без цианида и хромпика, основанная на флотации сульфидов меди и депрессии галенита сульфитом натрия и цинковым купоросом в кислой среде. Перед разделением проводилась десорбция собирателя с поверхности концентрата с использованием сернистого натрия и активированного угля.

Окончательные результаты по разработанной технологии для полиметаллической руды приводятся ниже (табл. 2).

Таблица 2

Результаты замкнутого опыта по разработанной технологии

Наименование продуктов	Содержание, г/т%			Извлечение, %		
	Cu	Pb	Zn	Cu	Pb	Zn
1	2	3	4	5	6	7
Концентрат перечистки медной «головки»	26,3	1,7	2,6	70,9	6,8	3,1
Медный концентрат I перечистки	23,6	6,7	5,2	16,5	6,9	1,6

продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7
Суммарный медный концентрат	25,7	2,7	3,2	87,4	13,7	4,7
Свинцовый концентрат I перечистки	1,4	45,1	7,4	1,5	73,9	3,5
Цинковый концентрат II перечистки	1,5	1,2	50,2	6,0	7,2	86,6
Отвальные хвосты	0,1	0,1	0,3	5,1	5,2	5,2
Руда	2,1	1,4	4,9	100,0	100,0	100,0

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности выбранной технологии. Разработанная схема и режим обогащения полиметаллической руды с рекомендуемыми реагентами во флотационных циклах обеспечат получение качественных селективных концентратов с высоким извлечением меди, свинца, цинка, золота, серебра в одноименные концентраты.

УДК621.926.5

К ВОПРОСУ ОБ ИЗНОСЕ ФУТЕРОВКИ БАРАБАННЫХ МЕЛЬНИЦ

Рыжиков В.С.

НИТУ МИСИС, г. Москва

Аннотация. Российское горное машиностроение отстаёт технологически из-за импортозависимости. Основная проблема - низкий КПД (<5%) процессов измельчения, потребляющих 5-10% энергии. Износ футеровки (особенно в центре барабана) увеличивает затраты на 5-6%. Решение включает применение композитных материалов, оптимизацию мелющих тел и цифровое моделирование, что подтверждается успешной практикой модернизации на предприятиях.

Российское горное машиностроение характеризуется технологическим отставанием, обусловленным зависимостью от импортного оборудования. Ключевые проблемы отрасли включают недостаточную энергоэффективность процессов измельчения, что создает риски для экономической устойчивости предприятий [1], [2].

Эффективность измельчения определяется оптимальным распределением энергии между движением мелющих тел и разрушением материала, где основными механизмами являются удар, раздавливание и истирание [3].

Барабанные мельницы демонстрируют сниженную эффективность из-за неравномерного износа футеровки, особенно в центральной части

барабана (на 40–60% интенсивнее). Это приводит к росту энергопотребления на 5–6% [4], [5].

Исследования показывают, что параметры футеровки и мелющих тел критически влияют на экономику процесса. Крупные шары усиливают ударный износ, а мелкие способствуют равномерному истиранию. Оптимизация этих компонентов, включая применение композитных материалов, позволяет снизить износ на 20–25% [6], [7].

Исследования подтверждают, что оптимизация параметров футеровки и мелющих тел значительно снижает эксплуатационные затраты. Например, на Хайбуллинской обогатительной фабрике это позволило сократить ежегодные расходы на 10,5 млн рублей [8].

Конструкция и материал футеровки существенно влияют на износостойкость и эффективность работы мельницы. Использование упрочненных и рифленых элементов снижает износ на 20-25%, а комбинированные материалы повышают устойчивость [9]. Размер мелющих тел также важен: крупные шары увеличивают ударную нагрузку, а мелкие - обеспечивают равномерное истирание [10]. Комплексная оптимизация этих параметров вместе с регулировкой загрузки и скорости вращения позволяет значительно повысить энергоэффективность процесса [11], [12].

Дальнейшее развитие исследований предполагает решение двух ключевых задач:

Разработка перспективных композитных материалов для футеровки, ориентированных на повышение износостойкости в центральной и загрузочной зонах барабана.

Разработка цифровых моделей мельниц с прогнозными алгоритмами, учитывающими зависимость износа футеровки от скорости вращения и состава загрузки.

Заключение

Проблема износа футеровки барабанных мельниц остается ключевым фактором, снижающим энергоэффективность. Комплексное решение, включающее современные материалы, оптимизацию мелющих тел и цифровое моделирование, позволяет существенно повысить эффективность оборудования.

Список литературы

1. Земсков, А.Н. Современные тенденции развития отечественного горного машиностроения / А.Н. Земсков, А.Н. Канцуров, Д.А. Салов // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2018. – №4. – С. 191-196.
2. Исследование динамики работы гидромеханического предохранительного устройства в приводе конусной дробилки / Н.В. Белов, М.Б. Бородина,

В.В. Зотов, Ю.А. Лагунова // Горное оборудование и электромеханика. – 2024. – № 6(176). – С. 3-14. – DOI 10.26730/1816-4528-2024-6-3-14.

3. Дмитрак, Ю.В. К концепции энергоёмкости измельчения твердых материалов в мельницах / Ю.В. Дмитрак // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2021. – №1. – С. 138-147.

4. Ястребов, К.Л. Расчет мощности, потребляемой барабанными мельницами / К.Л. Ястребов, М. Д. Николаев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – № 4(48). – С. 56-59.

5. Вдовин, К.Н. Исследование динамики износа мельницы полусамоизмелчения путем математического моделирования / К.Н. Вдовин, Н.А. Феоктистов, Ш.М. Хабибуллин // Теория и технология металлургического производства. – 2017. – № 2(21). – С. 27-31. – EDN YOELJP.

6. Вдовин, К.Н. Исследование процесса эксплуатации литых броней из стали марки 110Г13Л в мельнице МПСИ - 70х23 / К.Н. Вдовин, Н.А. Феоктистов, Ш.М. Хабибуллин // Литейные процессы. – 2013. – №12. – С. 8-11. – EDN TGFYLT.

7. Мавлонов, Ж.А. Влияние износ футеровки шаровых мельниц на энергоэнергетические показатели / Ж.А. Мавлонов // EUROPEAN RESEARCH: сборник статей XXIX Международной научно-практической конференции, Пенза, 07 ноября 2020 года. – Пенза: «Наука и Просвещение» (ИП Гуляев Г.Ю.), 2020. – С. 54-56. – EDN CYPPHX.

8. Вдовин, К.Н. Повышение срока эксплуатации литых броней из высокомарганцевой стали мельницы полусамоизмелчения / К.Н. Вдовин, Н.А. Феоктистов, Ш.М. Хабибуллин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2019. – Т. 17. - №1. – С. 26-31. – DOI 10.18503/1995-2732-2019-17-1-26-31. – EDN NKZOSU.

9. Дружинина, Т.Я. Факторы абразивного износа и методы повышения износостойкости элементов футеровки барабанных мельниц / Т.Я. Дружинина, В.А. Гронь // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – № 4(48). – С. 60-65.

10. Богданов, В.С. Оценка и определение износа мелющих тел / В.С. Богданов, П.А. Хахалев, Н.П. Харин // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: Межвузовский сборник статей / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова; под ред. В.С. Богданова. Том Выпуск XIV. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2015. – С. 149-151. – EDN VHAARJ.

11. Исследование влияния повышения шаровой загрузки на металлоконструкции мельницы / Ю.А. Лагунова, В.С. Шестаков, Н.В. Савинова, А.Р. Мукатов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 11-1. – С. 171-178. – DOI 10.25018/0236_1493_2021_111_0_171.

12. Обоснование возможности повышения загрузки шаровых мельниц / Ю.А. Лагунова, В.С. Шестаков, Н.В. Савинова, А.Р. Мукатов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XIX международной научно-технической конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 20–21 мая 2021 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2021. – С. 160-164.

УПРАВЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВОМ, ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И СОЦИАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ НЕДР

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В УПРАВЛЕНИЕ ДОБЫЧЕЙ

Попова А.М., Лапинская А.А.

*Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург*

Аннотация. В статье исследуются экономические последствия внедрения цифровых технологий в управление добычей углеводородов. Оцениваются основные каналы воздействия (увеличение добычи, снижение операционных расходов, уменьшение простоя, оптимизация цепочек поставок), приводится модель расчёта экономического эффекта на примере типового месторождения и обсуждаются факторы, определяющие окупаемость инвестиций и риски. На основе зарубежных и российских кейсов даются практические рекомендации для оператора, стремящегося масштабировать цифровые решения.

Введение

Цифровизация в нефтегазовой отрасли включает большие данные и аналитические платформы, машинное обучение, цифровые двойники, предиктивное обслуживание и системы оптимизации (YET — yield, energy, throughput). Эти технологии способны повышать доступную отдачу от активов и снижать себестоимость добычи, однако масштабирование и получение положительного финансового результата зависят от качества данных, организационных изменений и грамотного управления проектами. Международные аналитические центры и практические кейсы показывают, что при правильном фокусе на создании реальной экономической ценности цифровые инициативы дают заметный эффект, но многие проекты остаются на этапе пилотов из-за организационных барьеров.

Ключевые источники экономического эффекта от цифровых технологий в управлении добычей:

1. Увеличение извлекаемости и дебита скважин (оптимизация нефтеполей, управление пластом, аналитика) — приводит к приросту добычи.

2. Снижение неопланированного простоя и затрат на ремонт через предиктивное/condition-based maintenance — уменьшение простоев на 20–30% в успешных реализациях.

3. Оптимизация логистики и цепочки поставок (digital supply-chain, контроль качества) — экономия затрат и улучшение маржинальности реализуемой продукции.

4. Снижение транзакционных и коммерческих потерь (аналитика ценообразования, трейдинг, управление ассортиментом продуктов) — рост выручки и маржи.

5. Косвенные эффекты: повышение безопасности, снижение экологических рисков, поддержка decarbonisation — экономический эффект через снижение регуляторных и репутационных рисков.

Во-первых, цифровые решения способствуют повышению эффективности использования месторождений. Системы цифрового моделирования пластов и скважин позволяют точнее прогнозировать дебит, выбирать оптимальные режимы работы и повышать коэффициент извлечения углеводородов. Это напрямую увеличивает объем реализуемой продукции и снижает потери.

Во-вторых, цифровизация обеспечивает сокращение затрат. Использование предиктивной аналитики и цифровых двойников оборудования снижает количество неплановых ремонтов и простоев на 15–25%. Внедрение автоматизированных систем управления производственными процессами приводит к уменьшению операционных расходов за счёт оптимизации логистики, энергопотребления и использования персонала.

В-третьих, цифровые технологии создают условия для ускоренного принятия управленческих решений. Современные аналитические платформы позволяют в режиме реального времени оценивать эффективность буровых программ, прогнозировать экономические показатели и гибко корректировать производственные планы. Это снижает финансовые риски и повышает предсказуемость бизнеса.

Таблица

Экономические последствия цифровизации в «Газпром нефти»

Показатель	До цифровизации (ориентир)	После внедрения цифровых технологий	Экономический эффект
1	2	3	4
Объем добычи (млн т н.э. в год)	~60 (2017 г.)	~100 (2022 г.)	Рост добычи на ~66% за счёт цифровой оптимизации и освоения новых активов

продолжение таблицы

1	2	3	4
Экономия на ГРП и бурении	Базовые показатели	Сокращение сроков ГРП на 15–20%, снижение стоимости бурения до 10%	Снижение капитальных затрат (сотни млн руб./год)
Производственные простои	Высокая зависимость от неплановых ремонтов	Снижение неплановых простоев до 20–25% благодаря предиктивной аналитике	Экономия на ремонте и потерянной добыче
Общий эффект цифровой трансформации	Не оценивался	7,2 млрд руб. совокупного эффекта (2018–2020 гг.)	Прямая экономия и рост доходов
Инвестиции в цифровизацию	Нет данных (до программы)	Более 20 млрд руб. (2018–2021 гг.)	Окупаемость <3 лет (по внутренней отчетности)

Обсуждение результатов

Для оценки экономического эффекта используется методика сравнения затрат и выгоды от внедрения цифровых решений. Типовой расчёт показывает, что внедрение технологий предиктивного обслуживания и цифровых двойников может обеспечивать чистый дополнительный эффект в десятки миллионов долларов ежегодно для предприятия среднего масштаба при сроке окупаемости инвестиций 2–4 года. Таким образом, цифровизация добычи формирует устойчивый экономический результат за счёт роста выручки, снижения себестоимости и минимизации потерь.

Заключение

Внедрение цифровых технологий в управление добычей является одним из ключевых факторов повышения экономической эффективности нефтегазовой отрасли. Современные решения позволяют не только снизить операционные и капитальные затраты, но и повысить извлекаемость запасов, сократить время геологоразведки и минимизировать производственные риски. Рассмотренные примеры расчётов показывают, что цифровые проекты могут окупаться за относительно короткий срок, а их совокупный эффект выражается как в прямой экономии, так и в росте доходов за счёт дополнительной добычи.

Благодарности. *Исследования проведены в рамках популяризации затронутой темы.*

Список литературы

1. Иванов, Е.А. Цифровая трансформация угольной промышленности / Е.А. Иванов // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Экономика и право. — 2023. — С. 18–20.
2. Иванов, В.В. Цифровая экономика: мифы, реальность, перспектива / Г.Г. Малинецкий, В.В. Иванов, В.В. Иванов // Издательский дом «Научные технологии». — 2017. — ISBN 978–5–906906–04–5.

УДК 338

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ НЕДР И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Заернюк В.М.

*Российский государственный геологоразведочный
университет имени Серго Орджоникидзе, г. Москва*

Освоение недр является стратегически значимым элементом экономики России, обладающей одной из крупнейших в мире минерально-сырьевых баз. Недропользование обеспечивает энергетическую безопасность, формирует экспортный потенциал и поддерживает промышленный сектор. В 2022 году доля добывающих отраслей в ВВП составила 13,9%, а на экспорт сырья приходилось свыше 40% валютных поступлений в бюджет [1]. Отрасль стимулирует развитие смежных секторов — транспорта, энергетики, машиностроения.

Однако в современных условиях освоение недр сталкивается с рядом экономических вызовов. К ним относятся технологическая переориентация, волатильность мировых цен на сырьё, санкционное давление, ограничения доступа к передовым технологиям и ужесточение экологических требований. Эти факторы повышают риски, снижают инвестиционную привлекательность проектов и обостряют необходимость повышения рентабельности и устойчивости отрасли.

Зависимость от конъюнктуры внешних рынков делает сырьевой сектор уязвимым к геополитическим и экономическим шокам. В этих условиях особую значимость приобретают вопросы эффективного управления минерально-сырьевой базой, модернизации производственных процессов и диверсификации сырьевой зависимости.

Цель доклада — проанализировать ключевые экономические проблемы освоения недр и предложить обоснованные пути их решения в условиях текущих внутренних и внешних вызовов.

Основные экономические проблемы освоения недр

Высокая капиталоемкость остаётся одной из ключевых преград при освоении новых месторождений, особенно в арктических, шельфовых и дальневосточных регионах. Значительная часть инвестиций направляется не на добычу, а на создание транспортной, энергетической и социальной инфраструктуры. Срок окупаемости таких проектов нередко превышает 15 лет, что делает их малопривлекательными для частного капитала в условиях макроэкономической и геополитической неопределённости.

Сектор характеризуется низким уровнем конкуренции: подавляющее большинство лицензий сосредоточено у крупных государственных корпораций — «Газпрома», «Роснефти», «Норникеля». Это ограничивает доступ малых и средних предприятий, способных к гибкой разработке локальных месторождений. Административные барьеры, сложность лицензирования и высокая налоговая нагрузка дополнительно сдерживают частные инвестиции.

Налоговая система в сфере недропользования ориентирована преимущественно на изъятие ренты, а не на стимулирование инвестиций. НДС, экспортные пошлины и иные платежи создают значительную нагрузку, особенно для проектов с низкой рентабельностью. Отсутствие дифференцированных режимов, учитывающих геологическую сложность, глубину залегания и климатические условия, делает экономически невыгодным освоение труднодоступных и малорентабельных участков.

По мере истощения запасов с благоприятными условиями отрасль вынуждена переходить к разработке объектов с низким содержанием полезного компонента, на больших глубинах или в агрессивных средах. Это ведёт к росту удельных издержек и снижению коэффициента извлечения. Например, себестоимость добычи на шельфе в 2–3 раза выше, чем на традиционных месторождениях Западной Сибири, что повышает зависимость от колебаний мировых цен.

Инфраструктурная недостаточность в удалённых районах также сдерживает развитие. Отсутствие железнодорожных магистралей, ЛЭП и связи требует масштабных вложений, которые недоступны большинству компаний без государственной поддержки. В результате проекты зачастую замораживаются на прединвестиционной стадии.

Внешние факторы — волатильность цен, санкции, ограничения на технологии и энергетический переход — усиливают неопределённость. Глобальное снижение спроса на углеводороды в долгосрочной перспективе требует пересмотра стратегии развития добывающего сектора и диверсификации сырьевой базы.

Пути решения экономических проблем освоения недр

Преодоление системных барьеров в сфере недропользования требует формирования сбалансированной государственной политики, ориентированной на снижение транзакционных издержек и стимулирование инвестиционной активности. Ключевым направлением является модернизация налогового регулирования. Целесообразно внедрение дифференцированных налоговых режимов, учитывающих геологическую сложность, климатические условия и уровень рентабельности проектов. Для месторождений Арктики, шельфа и других высокорисковых регионов возможно применение пониженных ставок НДС, льготного амортизационного режима или компенсации затрат на геологоразведку. Такие меры способны повысить экономическую целесообразность освоения труднодоступных участков.

Перспективным инструментом является расширение практики государственно-частного партнёрства (ГЧП), при котором государство берёт на себя часть расходов на создание транспортной, энергетической и логистической инфраструктуры. Это позволяет существенно снизить барьеры входа для частных инвесторов и распределить риски. Опыт особых экономических зон на Дальнем Востоке демонстрирует эффективность сочетания налоговых преференций и инфраструктурной поддержки для привлечения капитала.

Развитие научно-технического потенциала отрасли требует системной поддержки НИОКР и импортозамещения. В условиях ограниченного доступа к зарубежным технологиям критически важным становится развитие отечественного производства горного оборудования, программного обеспечения для моделирования месторождений и систем автоматизации. Внедрение цифровых двойников, решений на основе искусственного интеллекта и IoT-платформ способно повысить точность прогнозирования добычи, снизить аварийность и оптимизировать эксплуатационные расходы.

Стратегическое значение имеет государственное сопровождение инфраструктурных проектов. Программы вроде «Развитие Дальнего Востока» и национальных проектов должны быть дополнены конкретными мерами по строительству транспортных коридоров, ЛЭП и узловых терминалов в сырьевых регионах.

Необходимо активизировать геологоразведку, особенно в слабоизученных зонах — Арктике, Восточной Сибири, континентальном шельфе. Государственное финансирование работ на ранних стадиях, а также создание единой цифровой платформы с геолого-фондовыми данными повысят прозрачность и снижат инвестиционные риски.

Наконец, стратегическое реагирование на глобальные тренды предполагает переход к устойчивому недропользованию: внедрение технологий CCUS, развитие рециклинга металлов и освоение критически

важных минералов (литий, кобальт, никель). Это обеспечит конкурентоспособность отрасли в условиях энергетического перехода.

Список литературы

1. Социально-экономическое положение России / Росстат, 2023. 330 с. URL: <http://ssl.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/osn-01-2023.pdf>.
2. Мухамбеталиева О.Р., Жиронкин С.А., Скрипко В.Е. Проблемы и перспективы развития российской угольной промышленности в условиях зеленой сетевой трансформации экономики // Уголь. 2024;(12):114-117. dOI: 10.18796/0041-5790-2024-12-114-117.
3. Сопилко Н.Ю., Шамсутдинова М.Р. Современные проблемы развития нефтегазового комплекса России // Корпоративное управление и инновационное развитие экономики Севера: Вестник Научно-исследовательского центра корпоративного права, управления и венчурного инвестирования Сыктывкарского государственного университета. 2023. Т. 3. Вып. 4. С. 440–448. <https://doi.org/10.34130/2070-4992-2023-3-4-440>.
4. Юшков И.В., 2024. Трансформация российской нефтяной отрасли в 2022-2023 гг. – Геоэкономика энергетики. № 1(25). С. 18–32. DOI: 10.48137/26870703_2024_25_1_18.

УДК 332.1

ИНВЕСТИЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ХАБАРОВСКОГО КРАЯ: РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Жизневская П.А.

*ИГД ДВО РАН обособленное подразделение
ХФИЦ ДВО РАН, г. Хабаровск*

Аннотация. Исследован инвестиционный потенциал Хабаровского края методами регрессионного анализа. Установлена высокая зависимость зависимости объемов инвестиций в основной капитал от уровня ВРП. Предложены меры по повышению эффективности экономики региона через технологическое обновление, привлечение частных инвестиций и снижение рисков.

Введение

Хабаровский край относится к числу крупнейших регионов России, обладающим разнообразным минеральным сырьем. Профилирующими для экономики края являются россыпные месторождения золота и платины, месторождения рудного золота, олова, каменных и бурых углей.

Особое внимание также заслуживает анализ инвестиционной политики Хабаровского края. От притока инвестиций напрямую зависят уровень жизни населения, создание новых рабочих мест, заработная плата, исполнение органами региональной государственной власти и местного самоуправления своих полномочий.

Инвестиции в основной капитал оказывают прямое воздействие на уровень ВРП, одновременно создавая мультипликативный эффект, который стимулирует рост спроса на продукцию и услуги смежных секторов экономики. Благоприятный инвестиционный климат и целевые вложения в приоритетные отрасли служат важнейшими факторами долгосрочного увеличения ВРП и улучшения социально-экономического положения регионов.

Понимание взаимосвязей между инвестициями и экономическим развитием имеет первостепенное значение для выработки рациональной региональной политики, направленной на повышение привлекательности территорий для инвесторов и обеспечение устойчивости экономического роста. Данная проблематика является предметом активного научного интереса, отраженного в трудах ведущих исследователей (В.Е. Деметьев, L. Soete) [1-2], чьи труды позволяют формировать обоснованные рекомендации по совершенствованию государственных подходов к управлению инвестициями и контролю над процессом распределения ресурсов.

Для изучения характера и силы взаимосвязи между объемом инвестиций в основной капитал (факторный показатель) и величиной ВРП (результатный показатель) было проведено исследование методом регрессионного анализа.

Исследование выполнено с применением специализированного программного пакета Statistica, выбранного ввиду его широкой функциональности, удобства визуального представления данных и возможности автоматической проверки статистических гипотез. Данные для анализа были собраны за период с 2007 по 2024 годы.

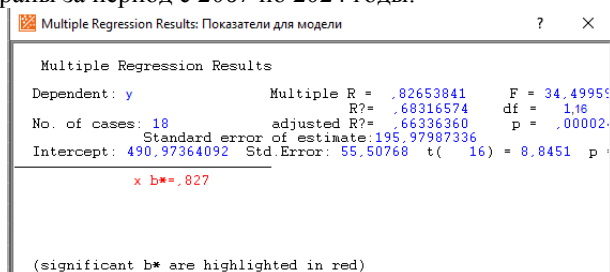


Рисунок 1 – Показатели для регрессионной модели

Прежде всего стоит обратить внимание на коэффициент детерминации. Значение коэффициента детерминации лежат в пределах от 0 до 1. По результатам видно, что $R^2=0,68316574$. Это хорошее значение, которое показывает, что построенная регрессия объясняет более 68% разброса значений переменной X относительно среднего. Далее стоит

обратить внимание на значение F-критерия и уровень значимости p . F-критерий используется для проверки гипотезы, которая утверждает, что между зависимой переменной Y и независимой переменной X нет линейной зависимости. По результатам мы имеем значение F-критерия (34,49959) и уровень значимости $p=0,00002$, это показывает, что построенная регрессия высоко значима. Также стоит обратить внимание на строку $X\text{beta}=0,827$ и на пояснение значимые β высвечены – significant beta's are highlighted.

На графике данные с подогнанной прямой будут иметь вид (рис. 2).

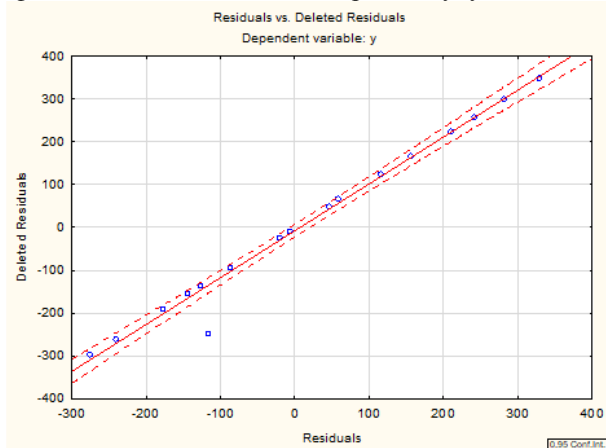


Рисунок 2 – Линейная регрессия

Основываясь на результатах проведенного анализа, можно сказать, что в целом взаимосвязь ВРП и инвестиций в основной капитал по ДПП имеется, она находит свое проявление далеко не во всех возможных аспектах статистического и динамического взаимодействия показателей. Для увеличения данной связи необходимо принятие ряда управленческих решений в сфере государственного управления, в инвестиционной сфере, а также в сфере программно-целевого планирования [3].

В целях обеспечения устойчивого экономического роста региона рекомендуется адаптировать инвестиционную политику путем внедрения передовых технологий, модернизации оборудования и профессиональной подготовки кадров. Необходимо также развивать государственно-частное партнерство для реализации масштабных инфраструктурных проектов в добывающей промышленности, что привлечет дополнительные внешние инвестиции и снизит проектные риски. Реализация вышеперечисленных рекомендаций приведет к возможным положительным результатам.

Список литературы

1. Дементьев В.Е. Факторы региональной дифференциации по темпам экономического роста // Terra Economicus. 2020. Т. 18. №2. С. 6-21.
2. Soete L., Verspagen B., Ziesemer T.H.W. Economic Impact of Public R&D: An International Perspective // Industrial and Corporate Change. 2022. Vol. 31. Is. 1. P. 1–18. DOI: 10.1093/icc/dtab066.
3. Жизневская П. А. Инвестиционный потенциал горнодобывающей отрасли Хабаровского края и прогноз его развития // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Экономика. 2025. №1. С. 69-77.

УДК 553.04

УПУЩЕННЫЕ ЗАПАСЫ. РАЦИОНАЛЬНОЕ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ.

Ивин В.М.

ООО «УГГА», г. Уфа

Аннотация. Статья анализирует системную проблему недропользования – игнорирование экономически целесообразных запасов полезных ископаемых. На примере одного из месторождений тугоплавких и огнеупорных глин Предуральской провинции показаны масштабы потерь и нарушение принципов рационального недропользования.

Введение.

В процессе геологоразведочных работ автор столкнулся с проблемой системной негибкости государственного регулирования недропользования, выражающейся в невозможности оперативного включения в объем подсчитываемых запасов и проект экономически рентабельных запасов полезных ископаемых, оказавшихся за пределами границ, установленных по данным предшественников и не учитывающих современные реалии, что приводит к прямым экономическим и ресурсным потерям, а также противоречит принципу рационального недропользования (ст. 23 Закона РФ «О недрах»).

Пример на основе одного из месторождений тугоплавких и огнеупорных глин в миоценовых отложениях Предуралья.

По Лицензии глубина геологического изучения ограничена глубиной подсчета запасов предшественниками в 1956 году.

Предшественниками выделено четыре сорта глин: I – глины серые, светло-серые и темно серые, жирные и слабожелезненные, II – светло-серые, иногда ожелезненные глины, III – глины темно-серые и коричневые, IV – светло-серые ожелезненные глины. На момент разведки 1956 года глины IV типа не рассматривались как полезное ископаемое.

Первоначально запроектированная максимальная мощность миоценовых глин по участку, включаемых в подсчет запасов, составила 11 м, после замечаний Росгеолэкспертизы средняя глубина изучения составила 10 м. Сравнение объемов ожидаемых запасов глин представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение объемов ожидаемых запасов глин

Площадь месторождения, м ²	Объем запасов со средней глубиной изучения 11 м, м ³	Объем запасов со средней глубиной изучения 10 м, м ³	Разница, %
51685	568 535	516 850	-10

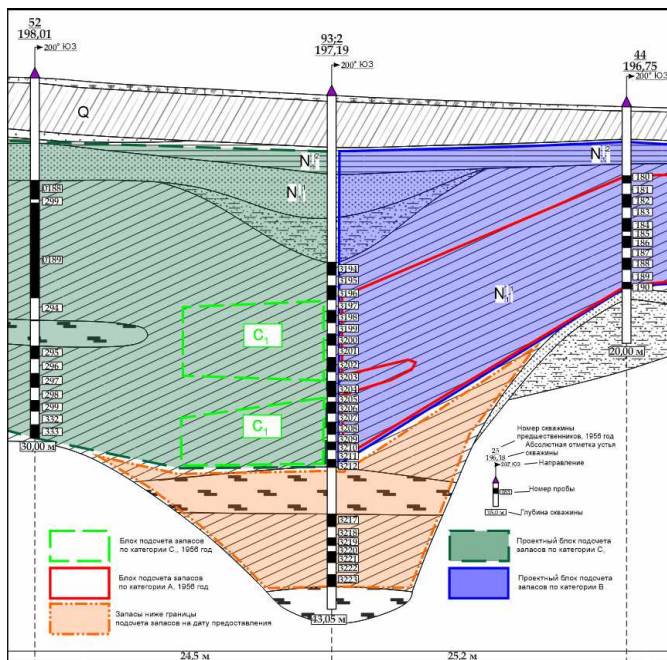


Рисунок – Фрагмент проектного разреза подсчета запасов

Обсуждение результатов

Как видно из табл. 1, снижение проектной глубины изучения с 11 м до 10 м в соответствии с замечаниями Росгеолэкспертизы привело к сокращению объёма подсчитанных запасов глин с 568 тыс. м³ до 516 тыс. м³, то есть почти на 10%. В абсолютных значениях речь идёт о более чем 50 тысячах кубометров потенциально пригодного сырья.

Указанная разница напрямую связана с тем, что геологическая информация о глинах ниже 10 м не была включена в границы проектных запасов — не по геологическим или экономическим причинам, а исключительно из-за регламентных ограничений (нижняя граница подсчета запасов на дату предоставления права пользования недрами).

При этом данные о составе и свойствах глин ниже 10 м существуют с 1956 года, и глины соответствуют современным требованиям к качеству для производства шамотных изделий.

Упущенные запасы не только имеют подтверждённое геологическое обоснование, но и обладают потенциальной экономической ценностью. В условиях, когда сырьевая база огнеупорных и тугоплавких материалов в регионе ограничена, такая потеря является нерациональной как для недропользователя, так и для государства.

Заключение

Случай с данным месторождением глин не является единичным. Он типичен для российской практики недропользования и служит яркой иллюстрацией ключевого системного противоречия: несоответствия между динамично меняющимися технологическими возможностями, экономическими условиями и геологическими знаниями — с одной стороны, и ригидностью нормативно-процедурных рамок, регулирующих учет и освоение запасов — с другой.

Таким образом, действующий подход к установлению и регулированию границ подсчёта запасов не только противоречит принципам рационального недропользования, но и ведёт к прямым экономическим потерям.

Государство, являясь основным выгодоприобретателем от разработки месторождений через механизм НДС и других налогов, теряет потенциальные доходы из-за недоучтённых или недоразработанных участков.

Потенциально извлекаемые запасы остаются в земле, либо, что хуже, могут разрабатываться вне рамок законодательства, без должного контроля и отчислений в бюджет.

Отдельную проблему представляет остаточная часть запасов, которая остаётся в недрах после завершения лицензии. В большинстве случаях это до 10% от общего объёма месторождения. Однако получить новую лицензию ради этих остатков экономически нецелесообразно, особенно для малых и средних компаний. В итоге, ресурсы, уже разведанные и технически доступные, теряются безвозвратно.

Всё это указывает на необходимость системных изменений в регламентирующей и учетной политике в области недропользования — с тем,

чтобы обеспечить не только сохранность, но и полноценное освоение минеральных ресурсов страны.

Благодарности. *Исследования проведены в рамках работы в ООО «УГТА».*

Список литературы

1. Закон РФ «О недрах» от 21.02.1992 №2395-1 (Редакция от 08.08.2024)., г. Москва.

2. Распоряжение №83-р «Об утверждении Положения о порядке проведения геологоразведочных работ по этапам и стадиям (твердые полезные ископаемые)», МПР РФ от 5 июля 1999 г., г. Москва.

УДК: 614.8.084;331.45

СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ТРУДА В ИРАНСКОЙ КЕРАМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Шоджаи Барджон С., Родионов В.А.

*Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург*

Аннотация. Климат безопасности влияет на поведение работников и уровень травматизма, отражая восприятие значимости охраны труда. В керамической промышленности Ирана проведена оценка климата безопасности с использованием опросника NOSACQ-50 по семи измерениям. Средний балл составил 2,88, что свидетельствует о низком уровне восприятия безопасности, за исключением доверия к эффективности систем безопасности. Наиболее проблемные области — приоритет безопасности руководством, вовлечённость работников, справедливость в расследовании инцидентов и отказ от рискованного поведения. Результаты могут быть использованы для разработки целевых мер, направленных на снижение травматизма и улучшение условий труда.

Ключевые слова: климат безопасности, керамическая промышленность, NOSACQ-50, охрана труда, производственная безопасность.

Введение

Климат безопасности — один из ключевых факторов, влияющих на поведение работников в производственной среде. Он отражает коллективные представления сотрудников о значимости обеспечения безопасности на рабочем месте и является психологическим феноменом, подверженным изменениям. Концепция климата безопасности возникла как ответ на серьёзные аварии в таких отраслях, как атомная энергетика, нефтяная промышленность и авиация [1]. Термин был введён Зохаром

в 1980 году при изучении восприятия охраны труда на предприятиях с разным уровнем травматизма. Сегодня климат безопасности рассматривается как многомерная конструкция, включающая несколько взаимосвязанных измерений, состав которых варьируется в разных исследованиях. Одним из наиболее достоверных инструментов оценки климата безопасности является опросник NOSACQ-50, разработанный Kines и соавторами в 2011 году [2]. Этот инструмент получил международное признание и применяется более чем в 40 странах, включает 50 утверждений для оценки семи ключевых аспектов климата безопасности:

- Dim1:** Приоритет и способность руководства (9 утверждений), напр. «Руководство ставит безопасность выше производственных задач».
- Dim2:** Полномочия и поддержка руководства (7 утверждений), напр. «Руководство привлекает сотрудников к решениям по безопасности».
- Dim3:** Справедливость руководства (6 утверждений), напр. «Руководство уделяет внимание каждому, вовлечённому в несчастный случай».
- Dim4:** Приверженность работников безопасности (6 утверждений), напр. «Мы прилагаем усилия для высокого уровня безопасности».
- Dim5:** Приоритет безопасности у работников и неприятие риска (7 утверждений), напр. «Мы не принимаем риск, даже при сжатых сроках».
- Dim6:** Коммуникация, обучение и доверие к коллегам (8 утверждений), напр. «Учимся на опыте, чтобы предотвратить несчастные случаи».
- Dim7:** Доверие к эффективности систем безопасности (7 утверждений), напр. «Важны конкретные цели в области безопасности» [3].

Климат безопасности — важный показатель эффективности охраны труда и профилактики травматизма в керамической промышленности. Он отражает восприятие работников контроля, ресурсов и правил безопасности на предприятии [4]. Оценка климата безопасности выявляет ключевые риски и слабые места системы охраны труда, что позволяет разрабатывать меры для снижения травматизма и формирования культуры безопасного поведения [2]. Она помогает определить пробелы в процедурах и оптимизировать профилактические меры, снижая вероятность несчастных случаев [5]. Улучшение климата безопасности также способствует эффективной коммуникации между руководством и работниками, что позволяет своевременно выявлять и устранять опасности, повышая доверие и ответственность в коллективе [2]. Целью данного исследования была оценка климата безопасности среди рабочих керамической промышленности в Иране.

Основная часть

Проведено поперечное исследование климата безопасности на предприятии керамической промышленности в провинции Йезд (Иран). Цели — оценить климат безопасности и выявить приоритетные для

улучшения его аспекты. В выборку вошли 85 работников (возраст 20–60 лет, стаж ≥ 1 года), исключены административные сотрудники. Для оценки использовали опросник NOSACQ-50 с четырёхбалльной шкалой Лайкерта. Контроль качества включал обучение сборщиков данных, пилотаж (5% выборки), проверку ошибок и очистку анкет. Исключены анкеты с одинаковыми ответами (13) и с низкой вариативностью (22). В итоговый анализ включено 51 валидный ответ. Классификация уровня климата безопасности проведена согласно таблице.

Таблица

Классификация климата безопасности

Балл	Категория	Интерпретация
> 3,30	Хороший	Следует поддерживать и улучшать данный аспект климата безопасности
3,00 – 3,30	Довольно хороший	Следует незначительно улучшить данный аспект климата безопасности
2,70 – 2,99	Довольно низкий	Необходимо улучшить данный аспект климата безопасности
< 2,70	Низкий	Требуется значительное улучшение данного аспекта климата безопасности

На рисунке представлено общее восприятие климата безопасности на основе данных опросника NOSACQ-50. Средний балл составил 2,88, что указывает на относительно низкий уровень климата безопасности в керамической промышленности. Все измерения климата безопасности, за исключением седьмого, получили оценки ниже 3, что свидетельствует о необходимости их улучшения.

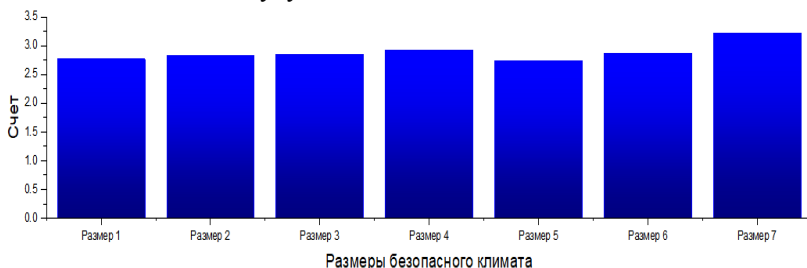


Рисунок – Сравнение средних оценок климата безопасности по каждому измерению

Положительный климат безопасности способствует снижению числа несчастных случаев, повышению производительности и сокращению затрат, поскольку работники ощущают, что безопасность является приоритетом. Для этого руководство должно регулярно обходить производственные площадки, чётко заявлять о превосходстве безопасности над производственными задачами и включать соответствующие показатели

в KPI (Dim1). Важно укреплять вовлечённость работников через обучение руководства коучингу, расширение полномочий и учёт предложений (Dim2), а также обеспечивать справедливое и прозрачное расследование инцидентов с равным применением правил и психологической поддержкой пострадавших (Dim3). Следует развивать личную приверженность сотрудников вопросам безопасности, предоставляя им роль ведущих на совещаниях, поощряя обязательства и устойчивое безопасное поведение бонусами (Dim4). Наибольшее внимание требует отказ от рискованного поведения, что предполагает политику нулевой терпимости, демонстрацию реальных примеров происшествий и установление реалистичных сроков выполнения задач (Dim5). Для улучшения обмена знаниями и опытом по безопасности между сотрудниками полезно организовывать короткие встречи и форумы для обсуждения происшествий и мер предотвращения (Dim6), а относительно высокий уровень доверия к системам безопасности, включающим планирование, обучение и контроль, следует поддерживать и развивать (Dim7).

Заключение

Единственным аспектом климата безопасности, который находился на относительно высоком уровне, было доверие работников к эффективности процедур безопасности. Таким образом, данное исследование может послужить отправной точкой для дальнейших исследований, направленных на снижение уровня производственных травм среди работников керамической промышленности посредством целевых и индивидуализированных вмешательств на организационном уровне (например, информационные и обучающие мероприятия) и нормативном уровне (например, внедрение передовых практик безопасности). Социальные и производственные аспекты в керамической отрасли безусловно могут быть улучшены благодаря таким результатам.

Список литературы

1. Абидин А. и др. Распространённость производственных травм и определение климата безопасности в малом производственном секторе: поперечное исследование // *Ann. Med. Surg.* — 2021. — Т. 69. — Статья 102699. <https://doi.org/10.1016/j.amsu.2021.102699>.
2. Лагерстрём Э., Магзамен С., Кинес П., Бразил В., Розкранс Дж. Факторы, определяющие климат безопасности в профессиональной лесозаготовительной промышленности // *Safety*. — 2019. — Т. 5. — С. 1–35. <https://doi.org/10.3390/safety5020035>.
3. Мосли И., Макки А.А. Восприятие климата безопасности в строительной отрасли Саудовской Аравии: современное состояние // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. — 2020. — Т. 17. — Статья 6717. <https://doi.org/10.3390/ijerph17186717>.

4. АльМоуса Н. и др. Климат и опасности производственной безопасности в промышленном секторе: гендерные различия, Саудовская Аравия // *Front. Public Health.* — 2022. — Т. 10. — Статья 873498. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.873498>.

5. Хошахлах А.Х., Сулаие С.А., Язданирад С., Парк Дж. Анализ влияния климата безопасности на риск аварий через профессиональный стресс: путь анализа // *ВМС Psychol.* — 2023. — Т. 11. — Статья 89. <https://doi.org/10.1186/s40359-023-01133-5>.

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИИ

УДК 504.06

ПЕРЕДОВЫЕ ЗАРУБЕЖНЫЕ И РОССИЙСКИЕ РАЗРАБОТКИ ПО СОКРАЩЕНИЮ ВЫБРОСОВ CO₂ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Воробьев К.А., Насонова А.В., Чекушина Т.В.

ИПКОН РАН, г. Москва

Выбросы углекислого газа, образующиеся в результате функционирования предприятий различных отраслей промышленности, существенно усиливают антропогенное воздействие на окружающую среду и вносят глобальные изменения в климатическую систему нашей планеты [1]. Антропогенные выбросы увеличили содержание углекислого газа в атмосфере примерно на 50% по сравнению с доиндустриальным уровнем [2]. По данным доклада Международного энергетического агентства (IEA) за 2022 г. ежегодная эмиссия CO₂ только от энергообъектов составляет более 36,8 Гт [3]. Глобальные выбросы оцениваются в 57×10⁹ т эквивалент CO₂ в год (2021 г.) [4]. Для повышения ресурсной эффективности, снижения углеродоемкости мировой экономики и достижения целей Парижского соглашения эмиссии парниковых газов необходимо сократить примерно на 45% к 2030 г. (по сравнению с 2010 г.) с последующим снижением до нуля к 2050 г [5].

Согласно положениям новой Климатической доктрины Российской Федерации (Указ Президента РФ от 26 октября 2023 года № 812 «Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации»), в рамках долгосрочного социально-экономического развития РФ предполагается достижение с учетом национальных интересов и приоритетов развития не позднее 2060 г. баланса между антропогенными выбросами парниковых газов и их поглощением. При этом к 2030 г. планируется обеспечить сокращение выбросов парниковых газов до 70% относительно уровня 1990 г., что составляет не более 2162,4 млн т CO₂-эквивалента (Указ Президента РФ от 4 ноября 2020 года № 666 «О сокращении выбросов парниковых газов»). Обозначенный целевой показатель является основой определяемого на национальном уровне вклада РФ в реализацию Парижского соглашения, принятого 12 декабря 2015 г. 21ой сессией Конференции Сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата. Для достижения данной цели необходимы дополнительные меры по декарбонизации промышленности и увеличению поглощающей способности управляемых экосистем.

Применение технологий улавливания, утилизации и захоронения углекислого газа (carbon capture and storage technology – CCS, либо Carbon Capture, Utilization and Storage – CC(U)S) позволит существенно снизить углеродный след промышленных предприятий и сдерживать рост температуры на планете. Применение этих технологий – это эффективный способ существенного снижения объемов выбросов «грязных» предприятий, поэтому необходимо включать CCS и CC(U)S в долгосрочные стратегии на государственном уровне и начать модернизацию существующей инфраструктуры уже сегодня [6]. Комплекс CC(U)S включает улавливание CO₂ из отходящих газов промышленных предприятий (например, сталелитейных, химических и цементных заводов), угольных теплостанций, нефте- и газоперерабатывающих комбинатов, а также его компримирование (сжатие), транспортировку, использование (в ряде случаев) и закачку в геологические хранилища для бессрочного хранения [6]. Самым распространенным вариантом использования CO₂ является его применение для повышения нефтеотдачи (проекты CO₂-EOR (Enhanced Oil Recovery) с последующим хранением в истощенных нефтяных и газовых месторождениях [6]. Из 29 действующих проектов по всему миру только в 8 углекислый газ не используется для повышения нефтеотдачи пластов (CO₂-EOR) [6].

Большая часть проектов (14) реализуется на территории США, затем следуют Китай и Канада – по четыре проекта в каждой стране. В 14 из действующих проектов CO₂ улавливается на предприятиях по переработке природного газа. В 2021 г. в Исландии начал работу первый крупномасштабный проект CCS с улавливанием углекислого газа напрямую из атмосферы (Direct Air Capture – DAC); во всех остальных действующих проектах CO₂ улавливается из промышленных источников (техногенный CO₂).

По состоянию на 2022 г. в России нет действующих проектов CC(U)S, хотя пилотные проекты и осуществлялись [6]. Можно предположить, что в условиях России интерес ко всему спектру решений CCS и CC(U)S будет постепенно возрастать. Так, Счетная палата РФ уже приступила к сбору и анализу данных о наиболее распространенных технологиях сокращения (предотвращения) выбросов парниковых газов, в том числе о технологиях CCS [7]. Выявленные потенциальные общественные эффекты от реализации CC(U)S проектов по таким направлениям, как социум и экономика, безопасность и здоровье, окружающая среда, долгосрочное экологоориентированное развитие [6], говорят об их актуальности и перспективности.

Структура технологической цепочки CC(U)S варьирует в зависимости от источника выбросов, способа улавливания, варианта транспортировки и того, на какие цели направляется уловленный CO₂ [7-11].

Наиболее распространенными проектами в мире являются Carbon Capture and Storage (CCS), то есть комплекс технологий улавливания и последующего бессрочного захоронения CO₂ в глубоких геологических формациях [6].

Проекты CC(U)S, направленные не только на хранение, но и на полезное использование газа, в мире находятся на начальном этапе развития, в основном реализуются их пилотные версии на различных производствах [12]. Факторы, сдерживающие их развитие, связаны с экономическими и организационно-управленческими аспектами, безопасностью, а также реакцией общества на долгосрочное захоронение техногенного CO₂ под землей [12].

Таким образом, секвестрация диоксида углерода может осуществляться путём геологического хранения в выработанных пространствах с использованием природных поглотителей (по типу озера), повторным использованием в технологических процессах и секвестрацией на основе минеральной карбонизации.

Список литературы

1. Оценка потенциала секвестрации выбросов углекислого газа металлургических предприятий за счёт карбонизации шлаков / Е.В. Колодежная, М.С. Гаркави, К.А. Воробьев, О.Е. Горлова // Недропользование и транспортные системы. – 2023. – Т.13, №1. С. 22-29.
2. IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty / V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, [et al.]. – Cambridge University Press, UK & NY. – P. 3-24.
3. CO₂ Emissions in 2022. International Energy Agency (IEA). Flagship report March 2023.
4. International Energy Agency (IEA): Global Energy Review: CO₂ Emissions in 2021. [Электронный ресурс] URL: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissionsin2021-2> (дата обращения 03.07.2022).
5. UNFCCC: Glasgow Climate Pact.[Электронный ресурс] URL: <https://unfccc.int/documents/310475> (дата обращения 19.07.2024).
6. Скобелев, Д.О. Технологии секвестрации углекислого газа: роль в достижении углеродной нейтральности и подходы к оценке затрат / Д.О. Скобелев, А. А. Череповицына, Т. В. Гусева // Записки Горного института. – 2023. – Т. 259. – С. 125-140. DOI: 10.31897/PMI.2023.10.
7. Воробьев, К.А. Сокращение углеродного следа с помощью технологий улавливания и переработки диоксида углерода / К.А. Воробьев, Т.В. Чекушина, Н. Ниязов [и др.] // Естественные и технические науки. – 2024. – № 4(191). – С. 80-84. – DOI: 10.25633/ETN.2024.04.16.

8. Хан, С.А. Анализ мировых проектов по захоронению углекислого газа / С.А. Хан // Георесурсы. – 2010. – № 4(36). – С. 55–62.

9. Miller, B.G. Clean coal engineering technology. Second Edition. 2017. – Elsevier Inc. – 838 p. ISBN 978-1-85617-710-8.

10. Ji, L. Carbon dioxide sequestration by direct mineralization of fly ash / L. Ji, H. Yu // Carbon Dioxide Sequestration in Cementitious Construction Materials. – 2018. – P. 13–37. Elsevier. DOI: 10.1016/b978-0-08-102444-7.00002-2.

11. Рациональное природопользование: технологии улавливания и захоронения углерода / О. Никулина, И. Кузминов, Ю. Мильшина [и др.] // Трендлеттер. – 2017. – №6. – 4 с.

12. Ильинова, А.А. Перспективы и общественные эффекты проектов секвестрации и использования углекислого газа / А.А. Ильинова, Н.В. Ромашева, Г.А. Стройков // Записки Горного института. – 2020. – Т. 244. – С. 493–502. – DOI: 10.31897/PMI.2020.4.12.

УДК 504.55.054:622(470.6)

ОЦЕНКА ОПАСНОСТЕЙ АРХЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЗОНЫ ХАНАС (KHINIS) В ИРАКЕ

Аль-Замели С.С.

НИТУ МИСИС, г. Москва

Аннотация

Геопарки играют важную роль в экологическом образовании и продвижении идей устойчивого развития. Для оценки потенциальных территорий для геопарков используется метод GAM, который был применен для археологического района Ханас, расположенного в провинции Ниневия на севере Ирака. В районе имеются религиозные и исторические памятники эпохи ассирийского царя Сенхариба (VII век до н.э.), остатки древнего водопровода и каменоломен. В настоящее время регион сталкивается с рядом экологических, природных и антропогенных угроз, которые могут привести к ухудшению состояния его археологических памятников и исчезновению его исторической ценности. Требуется провести оценку этих рисков для разработки эффективных планов защиты, что является целью настоящей работы. Полевые исследования проведены на объекте летом 2025 г. и включали визуальное обследование скальных уступов, отбор проб воды, оценку состояния местности.

Введение

Археологическая зона Ханас, расположено недалеко от города Духок в Курдском регионе на севере Ирака. Это место легко доступно, но в то же время окружено горами, родниками и плодородными долинами, что делает его природной и культурной достопримечательностью. Ханас — место, имеющее исключительное геологическое, археологическое,

историческое, экологическое и культурное значение. Здесь находятся известняки формации фата среднего миоцена, ассирийские рельефы на скалах и древняя гидротехническая система, которые в совокупности отражают как естественную эволюцию, так и изобретательность человека. Уникальную ценность представляет водопровод, сооруженный в эпоху ассирийского царя Сенхариба от реки до ассирийской столицы Ниневии протяженностью 80 километров [1].

В настоящее время исследование оценки устойчивости скальных откосов имеет чрезвычайно важное значение, поскольку они представляют опасность для потенциальных туристов, а также для населения. Также необходимо оценить качество воды в реке и дать общую оценку пригодности территории для организации геопарка, что является целью настоящей работы.

Полевые исследования проведены летом 2025 года и включали обследование территории, скальных уступов, отбор проб воды. Установлено, что риски, связанные с растрескиванием (разломом) и обвалами пород, представляют собой одну из основных геологических проблем, угрожающих геомеханической стабильности этих районов, особенно в контексте инженерных, туристических или жилищных проектов. Координаты мест исследования были определены с помощью GPS-навигатора.

Результаты применения метода GAM. Метод GAM — это стандартный метод оценки геологических объектов с точки зрения индекса геологической опасности в рамках одноименной модели.

Каждому критерию присваивается балл (0–1) в зависимости от его важности, который умножается на относительный вес в зависимости от его значимости.

$$GAMscore = \sum (Оценка_i \times Вес_i) \quad (1)$$

После проведения лабораторных исследований воды было установлено, что она не представляет опасности для посетителей, так как соответствует критериям Всемирной организации здравоохранения для питьевой воды. Оценка других показателей приведена в таблице.

Таблица

Оценка степени пригодности района Ханаса для организации геопарка

№	Индикатор	Оценка значимости (0-1)	Вес	Оценка риска по методу GAM
1	2	3	4	5
1	Высота уступов	0,40	0,3	$=(0,4 \times 0,3) = 0,12$
2	Тип нарушения	0,55	0,15	0,0825
3	Тип складок	0,40	0,2	0,08

продолжение таблицы

1	2	3	4	5
4	Наклон пластов	0,60	0,1	0,06
5	Прочность горных пород	0,30	0,15	0,045
6	Наличие грунтовых вод	0,65	0,1	0,065
	Суммарный балл		1	0,4525

0–0,3: Низкий риск;

0,3–0,6: Средний риск (как в примере) = **0,4525**;

0,6–1,0: Высокий риск.

Заключение

На основании результатов полевого обследования и определения опасных факторов по методу GAM рекомендуется для обеспечения безопасности посетителей отслеживать риски, которые могут возникнуть в при создании геопарка Ханас.

Список литературы

1. S. Al-Habity, M. Abood, и I. Aljumaily, «Assessment of Rock Slopes Stability Located on the Banks of the Khanas Dam Reservoir in the Nineveh Governorate, Northern Iraq.», *Iraqi Natl. J. Earth Sci. INJES*, т. 25, вып. 3, сс. 192–213, июл. 2025, doi: 10.33899/earth.2024.149320.1280

2. M. D. Vujičić и др., «Preliminary geosite assessment model (gam) and its application on Fruška gora mountain, potential geotourism destination of Serbia», *Acta Geogr. Slov.*, т. 51, вып. 2, сс. 361–376, дек. 2011, doi: 10.3986/AGS51303.

УДК 504.53:631.42

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РАСТЕНИЙ РОДА CLADOCHAETA DC. В ФИТОРЕМЕДИАЦИИ ТЕРРИТОРИЙ СЕВЕРНОГО КAVKAZA

Голубев Ф.В.

ГЕОХИ РАН, г. Москва

Аннотация

Целью работы являлось изучение возможности применения растений рода *Cladochaeta* DC. в фиторемедиации территорий Северного Кавказа, загрязнённых тяжёлыми металлами (Cd и Pb). Методом ААС исследовались образцы почв и растений рода *Cladochaeta* DC. на территории горно-рудного Алагирского района Северной Осетии и фоновых территориях. В растениях установлено высокое содержание Pb, и особенно Cd. Впервые показано, что *Cladochaeta candidissima* (Bieb.) DC. – вид рода *Cladochaeta* DC., имеет высокий адаптивный и фиторемедиационный

потенциал, является аккумулятором Cd, перспективен в фиторемедиации территорий Северного Кавказа, загрязнённых тяжёлыми металлами (Cd и Pb).

Введение

В Алагирском районе Северной Осетии находится Садонская группа ряда свинцово – цинковых полиметаллических месторождений, добыча которых негативно повлияла на экологическую обстановку этого района. Для восстановления экосистемы территорий, пострадавших от антропогенной деятельности, связанной с недропользованием, используют метод фиторемедиации. Впервые нами было установлено высокое содержание Cd и Pb в растениях кладохеты чистейшей (*Cladochaeta candidissima* (Bieb.) DC.), растущей в окрестностях с. Н.Унал [1]. Поэтому, в связи с вопросами фиторемедиации, исследовался потенциал этого растения к аккумулярованию Cd и Pb на территориях с различным уровнем антропогенной нагрузки.

Результаты

Растения (*Cladochaeta candidissima* (Bieb.) DC.) и почвы из прикорневой части растений отбирали на участке с. Нижний Унал – г. Алагир в бассейне р. Ардон [2]. Pb и Cd определяли методом ААС. О накоплении ТМ, также, судили по величине коэффициента биологического накопления (КБН), который рассчитывали по формуле: $K = \frac{\text{содержание элемента в сухой надземной биомассе (мг/кг)}}{\text{содержание элемента в почве (мг/кг)}}$. При значении $K \geq 1$ растения рассматривались как аккумуляторы химических элементов.

Диапазон колебаний Pb в техногенных грунтах окрестностей Унальского хвостохранилища (УХХ) составил от 255 до 2202 мг/кг. Содержание Pb в растениях изменялось от 4,5 до 41,7 мкг/г. На относительно фоновых территориях содержание Pb варьировало в пределах 2,4–6,9 мг/кг, а на отдельных участках изменялось от 2,4 до 3,6 мг/кг (у с. Тамиск и г. Алагир в пойме р. Ардон). КБН (Pb)=0,013–0,384.

Содержание Cd в почвах с. Н. Унал и района УХХ варьировало от 1,80 до 66,0 мг/кг. В технозёмах, находящихся выше УХХ, Cd содержалось от 1,80 до 14,22 мг/кг, рядом с УХХ – 66,0 мг/кг. Диапазон колебаний Cd для почв фоновых территорий составил 0,23–0,72 мг/кг. Содержание Cd в растениях на фоновых территориях изменялось в пределах 1,14–4,95 мг/кг и 2,58–6,0 мг/кг на техногенных территориях. КБН (Cd)=0,79–9,75.

Обсуждение результатов

Содержание Pb в техногенных грунтах окрестностей с. Н.Унал значительно превышало ПДК для почв России, которые составляют 32 мг/кг [3]. Учитывая, что допустимые значения Pb в растениях варьируют

от 0,1–6 мг/кг, уровень содержания Pb в кладохете чистойшей превышал ПДК в 1,5–7,5 раз на техногенных участках, а на фоновых территориях соответствовал норме (пойма р. Ардон у Тамиска и г. Алагир). Наиболее высокое содержание Pb в почвах и растениях отмечено в районе Унальского хвостохранилища (УХХ). В кладохете чистойшей установлено высокое содержание Pb, но она не относится к растениям–аккумуляторам этого элемента, т.к. КБН $\leq$ 1.

Для почв населённых пунктов России ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) Cd составляют 0,5 мг/кг [4]. Почвы техногенных участков (окрестностей с. Н. Унал и УХХ) имели аномально высокие значения по содержанию Cd (1,80–66,0 мг/кг). По мере отдаления от воздействия района горнорудной промышленности, содержание Cd в почвах снижалось до 1,50 мг/кг (между с. Зинцар и с. Биз), 0,72 мг/кг (между с. Биз и с. Тамиск), но распределение Cd на всей исследуемой территории имело дискретный характер. На отдельных участках (от с. Тамиск до г. Алагир) содержания Cd было ниже ОДК (0,23–0,36 мг/кг). Учитывая, что допустимые значения содержания Cd как в растениях, так и в препаратах, производимых на их основе, варьируют от 0,03–1 мг/кг [5,6], нетрудно заметить, что уровень содержания Cd в кладохете превышал ПДК в 6–38 раз. Концентрации Cd в растениях техногенных и фоновых территорий отличались незначительно, что характеризует кладохету чистойшую как растение, имеющее высокий адаптивный потенциал и очень высокую кадмий – аккумулирующую способность. Наибольшая аккумулирующая способность растений проявлялась в почвах с низким содержанием Cd (0,24–0,72 мг/кг), КБН соответственно равен 9,75 и 6,87, что говорит о высоком фиторемедиационном потенциале растений. В кладохете чистойшей установлено значительное содержание Cd, она относится к растениям–аккумуляторам этого элемента, т.к. КБН (Cd) $\geq$ 1.

Заключение

В результате исследований установлено, что в растениях рода *Cladochaeta* DC. отмечено высокое содержание Pb, и особенно Cd. *Cladochaeta candidissima* (Bieb.) DC. – представитель этого рода, является аккумулятором Cd и весьма перспективна в фиторемедиации территорий Северного Кавказа, загрязнённых этими элементами.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН).

Список литературы

1. Голубев Ф.В., Ермаков В.В. Геохимическая экология растений – перспективное направление биогеохимии // Труды XI Международной биогео-

химической школы. Биогеохимия – научная основа устойчивого развития и сохранения здоровья человека. Т.2. Тула: ТГПУ.2019. С.26–28.

2. Голубев Ф.В. Распространение *Cladochaeta candidissima* (Bieb.) DC. в бассейне реки Ардон (Северная Осетия) // В кн.: Горные экосистемы и их компоненты. Материалы VIII Всероссийской конференции с международным участием, посвящённой Году науки и технологий в Российской Федерации. Нальчик, 2021. С.32–33.

3. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2041–06. 1. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве / Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. М., 2006.

4. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2511–09. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве / Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. М., 2009.

5. Галенко М.С., Гравель И.В., Вельц Н.Ю., Аляутдин Р.Н. Нормирование содержания ТМ и мышьяка как фактор безопасности использования лекарственных растительных препаратов // Безопасность и риск фармакотерапии. 2021. №9 (2). С. 61–68.

6. Гигиенические требования СанПиН 2.3.2.1078–01 / Министерство здравоохранения Российской Федерации. М., 2002.

УДК 622.276.6:552.56:502.3:330.15

ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА В КАРБОНАТНЫХ ПОРОДАХ

Высотин Н.Г.

ИПКОН РАН, г. Москва

Аннотация. Освоение трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ) нефти в карбонатных коллекторах и ужесточение экологических требований обуславливают необходимость эколого-экономической оценки инвестиций в комплексные геомеханические модели для дизайна гидроразрыва пласта (ГРП). Традиционные модели часто не учитывают крайнюю неоднородность и анизотропию карбонатных пород, что ведет к неоптимальным проектам и повышению рисков. Интеграция современных технологий (цифровой керн, машинное обучение) позволяет не только снизить экологические риски, но и достичь значительного экономического эффекта. Сравнительный анализ доказывает, что инвестиции в комплексное геомеханическое моделирование экономически оправданы и критически важны для устойчивого развития.

Ключевые слова: гидроразрыв пласта, геомеханическое моделирование, карбонатные коллекторы, индуцированная сейсмичность, цифровой Kern, машинное обучение, ESG, эколого-экономическая эффективность.

Введение

ГРП – ключевая технология освоения ТРИЗ в низкопроницаемых карбонатных коллекторах. Однако их структурная гетерогенность создает существенные трудности для прогнозирования морфологии трещины ГРП. Ошибки в прогнозе ведут к экономическим (низкая продуктивность) и экологическим (контаминация вод, индуцированная сейсмичность) последствиям, усугубляемым давлением ESG-повестки [1, 2].

Геомеханическое обеспечение – один из основных этапов проектирования безопасного и эффективного ГРП. Цель работы – оценить инвестиции и экономический эффект от применения современных методов геомеханического моделирования для минимизации экологического ущерба и максимизации экономической отдачи от ГРП в карбонатах.

Традиционные подходы уступают место высокотехнологичным решениям, таким как:

1) цифровые двойники (Digital Twin – DT) ядра на основе микрокомпьютерной томографии позволяют неразрушающим методом изучить структуру породы и с помощью МКЭ точно определить упругопрочностные свойства с учетом анизотропии [4];

2) машинное обучение (Machine Learning ML) позволяет на основе данных ядра, ГИС и мини-ГРП прогнозировать поведение трещины в гетерогенных средах, экстраполируя точечные данные на весь объем модели [5].

Инвестиции в современное геомеханическое моделирование минимизируют ключевые риски: индуцированную сейсмичность (адаптация параметров ГРП), контаминацию водоносных горизонтов (оптимизация конструкции скважины), высокое потребление водных ресурсов (оптимизация составов жидкостей). Это инструмент проактивного риск-менеджмента, снижающий затраты на ликвидацию аварий и репутационные потери [6].

Экономический анализ смещает фокус со стоимости исследований на их вклад в экономику проекта. Преимущества: прирост нефтеотдачи на 15-25% за счет вовлечения естественной трещиноватости; избежание аварий и простоев, влияющих на CAPEX/OPEX; оптимизация объемов закачки и проппанта; снижение ESG-рисков и стоимости капитала [7,8].

Методы исследования

Проведен сравнительный сценарный анализ двух подходов:

1) базовый сценарий: ГРП на основе упрощенной модели с минимальными инвестициями в геомеханические исследования [7,8];

2) оптимизированный сценарий: ГРП на основе комплексной 3D модели, построенной с использованием цифрового ядра и ML, с дополнительными CAPEX на исследования [7,8].

Для каждого сценария оценивались: прирост продуктивности, CAPEX, OPEX, вероятность и стоимость экологических инцидентов. Ключевым показателем эффективности выбран чистый приведенный доход (NPV), рассчитываемый по стандартной формуле, учитывающей выручку от добычи, операционные (OPEX) и капитальные (CAPEX) затраты, дисконтированные по ставке «i» за срок жизни проекта «n».

Обсуждение результатов

Анализ результатов исследования показывает, что несмотря на рост прямых затрат на геомеханику 45%, общая экономическая эффективность (NPV) возрастает на 29,8%. Это обусловлено совокупностью следующих факторов.

Во-первых, снижением экологических рисков с 18% до 3%. Ожидаемые затраты на ликвидацию последствий снизились с 45 млн до 1,5 млн руб., что практически компенсирует разницу в первоначальных инвестициях.

Во-вторых, более консервативный, но оптимизированный дизайн ГРП, учитывающий взаимодействие с естественной трещиноватостью, привел к росту накопленной добычи на 14%.

Наконец, точный прогноз позволил избежать перерасхода материалов и минимизировать риски операционных осложнений (заклинивание, обрывы), хотя рост CAPEX оказался незначительным 0,7%.

Заключение

Таким образом, сравнительный экономический анализ однозначно показывает, что инвестиции в комплексное геомеханическое моделирование являются экономически оправданными. Они трансформируются из статьи затрат в стратегическую инвестицию, которая обеспечивает не только снижение экологического следа проекта, но и значительную финансовую выгоду за счет повышения продуктивности и минимизации рисков дорогостоящих аварийных ситуаций. Полученные результаты являются веским аргументом в пользу обязательного проведения детальных геомеханических исследований на всех этапах освоения месторождений с трудноизвлекаемыми запасами в карбонатных коллекторах.

Список литературы

1. Davies R.J. и др. Hydraulic fractures: How far can they go? // Mar. Pet. Geol. 2012. Т. 37, № 1. С. 1–6.
2. IEA. Shares of energy sources in global final energy consumption, 1980–2021, [Электронный ресурс] // Shares of energy sources in global final energy

consumption, 1980-2021. 2024. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/shares-of-energy-sources-in-global-final-energy-consumption-1980-2021>, Licence: CC BY 4.0 (дата обращения: 30.01.2025).

3. Zheng Q., Zhang D. Digital Rock Reconstruction with User-Defined Properties Using Conditional Generative Adversarial Networks // Transp. Porous Media. 2022. Т. 144, № 1. С. 255–281.

4. Saad B., Negara A., Syed Ali S. Digital Rock Physics Combined with Machine Learning for Rock Mechanical Properties Characterization // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. Abu Dhabi, UAE: SPE, 2018. С. D011S008R001.

5. Morozov A.D. и др. Data-driven model for hydraulic fracturing design optimization: focus on building digital database and production forecast // J. Pet. Sci. Eng. 2020. Т. 194. С. 107504.

6. Tong L., Liu D. A review of environmental issues caused by hydraulic fracturing of shale gas // Discov. Appl. Sci. 2025. Т. 7, № 6. С. 588.

7. Vengosh A. и др. A Critical Review of the Risks to Water Resources from Unconventional Shale Gas Development and Hydraulic Fracturing in the United States // Environ. Sci. Technol. 2014. Т. 48, № 15. С. 8334–8348.

8. Bolton P., Kasperczyk M. Do investors care about carbon risk? // J. Financ. Econ. 2021. Т. 142, № 2. С. 517–549.

УДК 550.8:[624.19:625.42]

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАЙЕСОВСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ПРИ ОЦЕНКЕ СТРУКТУРЫ ЗАОБДЕЛОЧНОГО ПРОСТРАНСТВА ТОННЕЛЕЙ МЕТРОПОЛИТЕНОВ

Набатов В.В.

НИТУ МИСИС, г. Москва

Одной из основных задач контроля заобделочного пространства является выявление полостей на границе «грунт-обделка». Причинами их возникновения являются: вибрации от движущихся поездов, геологические процессы рядом с тоннелем, строительство вблизи тоннеля [1, 2]. Полости могут влиять на состояние обделки, а также вызывать дополнительные деформации рельсового пути. Поэтому в случае большого объема полостей, а также в случае большой их протяженности, полости принято заполнять тампонажным раствором. Часто при оценке воздействия строительства новых объектов, необходимо оценить, как оно повлияет на существующие тоннели. Для этого, нужно понять в каком состоянии находится не только конструкции, но и заобделочное пространство.

Ключевой задачей этих вопросов контроля является выявление расположения полостей за обделкой, что принято решать с помощью геофизических методов. Наиболее частым выбором здесь является сейсмоакустическое и георадиолокационное обследования. Сейсмоакустическое обследование (в так называемом варианте Impact Echo) подразумевает ударное возбуждение обделки с последующей регистрацией отклика. В основе георадиолокации лежит излучение и приём электромагнитных волн радиочастотного диапазона. Оба подхода подразумевают обработку регистрируемых сигналов-откликов с выделением из них информативных параметров. В качестве этих параметров может выступать энергия сигнала, параметры его спектра и прочие.

Использование только одного параметра обычно ведёт к появлению частых ошибок определения полости. Возникают как ошибки типа «ложное срабатывание», так и ошибки типа «пропуск цели». Поэтому желательно признаки комплексировать, как в рамках одного метода, так и в рамках нескольких. При этом принятие решения можно реализовать с помощью байесовской классификации.

В основе байесовской классификации лежит определение так называемого риска. Для двух случаев «полость присутствует» (далее по тексту этому случаю будут соответствовать индексы P) и «полость отсутствует» (N) риски R_P и R_N как функции значений признака x могут быть рассчитаны следующим образом:

$$\begin{aligned} R_P(x) &= \lambda_{TP} \cdot P(w_P | x) + \lambda_{FP} P(w_N | x), \\ R_N(x) &= \lambda_{FN} \cdot P(w_P | x) + \lambda_{TN} P(w_N | x), \end{aligned}$$

где λ_{FP} , λ_{FN} , λ_{TP} , λ_{TN} – коэффициенты функции потерь, которые определяют штрафы за принятие решения (λ_{TP} , λ_{TN} – верные решения о наличии либо отсутствии полости соответственно, λ_{FP} , λ_{FN} – ошибочные решения), $P(w_P|x)$ и $P(w_N|x)$ апостериорные вероятности, соответствующие случаям наличия и отсутствия полостей в зависимости от значения признака x . Вычисление рисков позволяет применить так называемое байесовское решающее правило: если $R_P(x) < R_N(x)$ – полость отсутствует, если $R_P(x) > R_N(x)$ – полость присутствует.

Технической проблемой является отсутствие законов распределений апостериорных вероятностей $p(w_P|x)$ и $p(w_N|x)$ по которым можно было бы определять $P(w_P|x)$ и $P(w_N|x)$ для конкретных значений признака и реализовывать байесовское решающее правило. Выходом здесь является получение выборки на том участке, на котором расположение полостей известно, что позволит оценить описанные выше законы распределения.

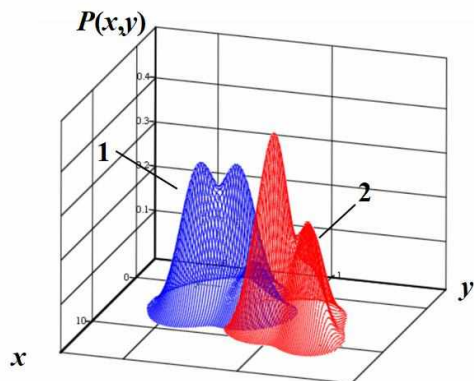


Рисунок - Примеры двумерных плотностей апостериорной вероятности в пространстве признаков x и y :

1 – случай отсутствия полости, 2 – случай наличия полости

Поскольку чисто практически получать подобные выборки довольно сложно (далеко не всегда есть возможность оценить наличие полости прямыми измерениями, либо процедурой тампонажа) это приводит к малому их объёму. Поэтому хорошим решением здесь будет использование непараметрических методов оценки законов распределения, в частности ядерная оценка плотности (ЯОП). При этом подходе каждому измерению соответствует некая ядерная функция, в качестве которой чаще всего выступает функция Гаусса определённого масштаба, связанного с общей дисперсией выборки. Непосредственно сам закон распределения получается как сумма ядерных функций.

Все описанные технические особенности легко расширяются на многомерные случаи, подразумевающие использование комплекса различных признаков.

На рисунке представлен пример полученный с помощью ЯОП двумерной плотности апостериорной вероятности для двух признаков: x (георадиолокационный признак) и y (сейсмоакустический признак). В этом пространстве признаков присутствуют две поверхности, соответствующие случаю наличия и отсутствия полости. В реальной практике подобные функции будут иметь еще большую размерность, однако их трудно будет визуализировать.

Недостатком байесовской классификации является необходимость оценки априорной вероятности. Достоинством является возможность работать с малыми выборками. Также существенным достоинством является возможность использования коэффициентов функции потерь. Например, для того чтобы повышать штрафы за так называемый

«пропуск цели» (λ_{FN}) или «ложное срабатывание» (λ_{FP}). Снижение влияния ситуации «ложного срабатывания» можно реализовывать на тех участках, где методы оказываются менее помехоустойчивыми. Снижение ситуации «пропуска цели» может быть важен на ответственных участках.

Список литературы

1. Jifei W., Hongwei H., Xiongyao X., Bobet A. Void-induced liner deformation and stress redistribution // *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, vol. 40, pp. 263–276. doi.org/10.1016/j.tust.2013.10.008.

2. Запрудин А. Г. Обоснование инженерных решений в системе защиты городской среды от воздействия горных работ при строительстве метрополитена // *Известия вузов. Горный журнал*, 2008, № 7, с. 11–18.

УДК 622.8

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИЙ ОТ ГОРНЫХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ НА ОХРАНЯЕМЫЕ ОБЪЕКТЫ

Икреников М.С.¹, Романевич К.В.², Нефедов С.И.¹, Мулев С.Н.²

¹ИПКОН РАН, г. Москва,

²АО «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург

Одной из тенденций к увеличению эффективности горных предприятий является увеличение мощности горного оборудования и машин. Техническое развитие горного оборудования за последнее десятилетие привело к сокращению себестоимости добычи на 18-25% и сокращению стоимости окупаемости оборудования с 5-7 лет до 3-4 лет [1]. Увеличение мощности оборудования оказалось куда более серьёзным. Так если рассмотреть карьерные экскаваторы фирмы Komatsu, то современная модель РС8000 имеет объем ковша 45 м³ против 28 м³ у модели РС5500 2013 года [2]. Грузоподъёмность карьерных самосвалов также заметно выросла, так для БелАЗ-75710 она достигла 450-500 тонн (против 220-360 тонн в 2013 г.).

Увеличение мощности оборудования также увеличивает и воздействие на окружающую среду – увеличение эффективности за счёт увеличения мощности приводит к различным разрушениям, как внутри горного предприятия, так и на близлежащих охраняемых объектах [3-5]. В связи с этим на добывающую компанию могут быть наложены ограничения в работе, такие как: уменьшение скорости передвижения горных машин, сокращение зон выработки и строительства инженерных конструкций, для уменьшения воздействий вибраций [3]. Такие ограничения могут полностью лишить компанию экономической или производственной эффективности.

Проблема оценки влияния вибраций заключается в том, что имеет место не разовое воздействие от одного источника, а сложная суперпозиция неравномерно движущихся источников. Дополнительное влияние оказывают как резонансные частоты конструкций, на которые оказывается воздействие, так и резонансные частоты грунта или его трещиноватость в результате чего, вибрация может распространяться с меньшими потерями.

Предлагаемое решение заключается в измерении уровня вибраций в непосредственной близости от самого охраняемого объекта и дифференциации шумов от самого охраняемого объекта (ближняя зона) и от горнодобывающего предприятия (дальняя зона). Такое решение позволяет горному предприятию оценивать уровень шума, которое оно оказывает на охраняемый объект, и так как вибрации продолжительные, вносить корректировки для уменьшения уровня шума, до того, как будет достигнут критический уровень, тем самым избегая нарушений.

Концепция построения измерительной установки схожа с сейсмическими группами или сейсмическими антеннами, с той разницей, что расстояние между датчиками в классической системе выбирается так, чтобы было временное разделение в моментах прихода сигнала, а в предлагаемой системе расстояние между датчиками столь мало, что можно говорить, что на все датчики пришёл один и тот же сигнал в один и тот же момент времени. Небольшое увеличение пути распространения на несколько метров, для отдалённых объектов не будет играть значительной роли.

Источники вибрации от самого охраняемого объекта как правило значительно слабее, поэтому существенное влияние они могут оказать только если будут рядом с датчиком, поэтому для них изменение пути будет значительным. А поскольку затухание подчинено экспоненциальному закону, то изменения в принятой амплитуде будет значительным.

$$A(r) = \frac{A_0}{r^n} \cdot e^{-\alpha \cdot r} \quad (1)$$

где A_0 – начальная амплитуда, r – расстояние от источника, n – показатель геометрического рассеяния, α – коэффициент поглощения.

Для целей оценки влияния вибраций от горных машин и оборудования на охраняемые объекты могут быть использованы горно-шахтные системы сейсмического контроля [6]. В настоящее время на ряде шахт и рудников России успешно функционируют системы сейсмического контроля GITS Центра Геодинамического Мониторинга ВНИМИ. Для связи с объектами контроля, обработки и визуализации данных сейсмомониторинга разработан программный комплекс GITS-2, рассчитанный на работу с набором локальных или удаленных баз данных одновременно [7].

Система сейсмомониторинга состоит из сети подземных сейсмовильонов, оснащённых трёхкомпонентными датчиками-акселерометрами, а также наземного комплекса, включающего регистрирующий блок и вычислительный центр. Управление всей системой, настройка параметров регистрации и выполнение обработки данных осуществляются посредством удалённого доступа через сеть Интернет. Такая система обеспечивает шахтам и рудникам возможность в оперативном режиме проводить анализ текущей сейсмической информации на уровне квалифицированного оператора, а при необходимости службы предприятия получают экспертные рекомендации по реализации профилактических мероприятий.

В процессе работы системы GITS по сети подземных сейсмовильонов записываются сейсмограммы зарегистрированных сейсмических событий (рис. 1).

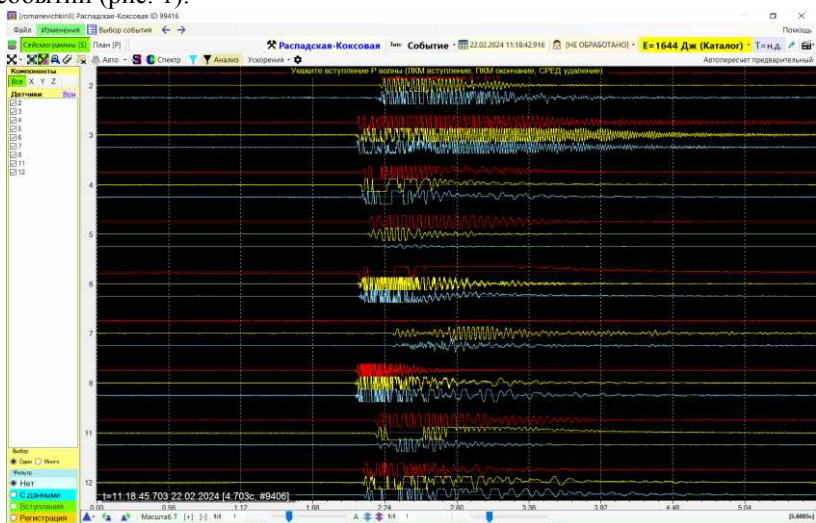


Рисунок 1 – Сейсмограммы одного сейсмического события по сети подземных сейсмовильонов на шахте, окно программы GITS-2

При анализе сейсмограмм было отмечено наличие характерного признака для сильных и удалённых событий. Измерение трёхкомпонентного датчика, в каждый момент времени превращались в точку в координатах пропорциональных измерениям вибрации, таким образом получалось облако точек.

Для взрывов и других сильных событий было характерно наличие структурированных паттернов – точки вне центрального сгустка образуют кривые линии. Для шумов промышленного оборудования,

поступающих с близкого расстояния характерно хаотическое расположение точек (рис. 2).

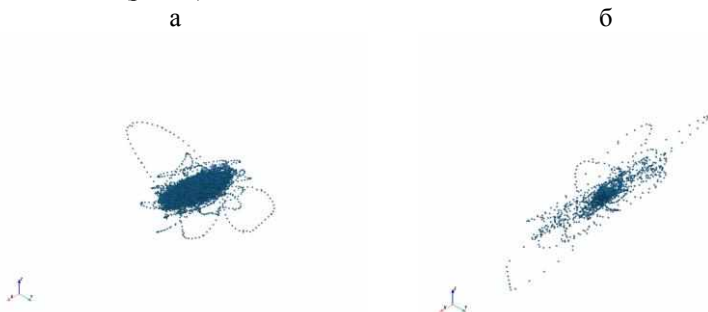


Рисунок 2 – Сейсмограммы одного сейсмособытия по сети подземных сейсмопавильонов на шахте, окно программы GITS-2

Предложенный метод дифференцированного измерения вибраций в ближней и дальней зонах позволяет повысить точность оценки вклада горного предприятия в общий уровень вибрационного воздействия на охраняемый объект.

Проведённый анализ показал, что учёт сложной суперпозиции вибрационных сигналов от множества источников, особенностей резонансных свойств конструкций и грунтов, а также использование дифференцированных измерений в ближней и дальней зонах позволяют более точно оценивать влияние горных машин и оборудования на охраняемые объекты.

Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием алгоритмов классификации природных и техногенных событий, совершенствованием методов превентивного контроля и интеграцией интеллектуальных технологий анализа данных, что позволит существенно повысить уровень промышленной безопасности и устойчивость работы горнодобывающих предприятий.

Список литературы

1. Mine 2023: The era of reinvention [Электронный ресурс]. PwC, 2023. URL: <https://www.pwc.com/id/en/pwc-publications/industries-publications/energy-utilities-mining-publications/mine-2023.html> (дата обращения: 14.08.2025).
2. Construction and Mining Equipment Market Size and Forecast [Электронный ресурс]. Verified Market Reports, 2023. URL: <https://www.verifiedmarketreports.com/ru/product/construction-and-mining-equipment-market-size-and-forecast/> (дата обращения: 14.08.2025).
3. Shrawan Kumar, Vibration in operating heavy haul trucks in overburden mining, Applied Ergonomics, Volume 35, Issue 6, 2004, Pages 509-520, ISSN 0003-6870, <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2004.06.009>.

4. Vibration Control in Mining: Case Studies from Queensland // Report of the Queensland Mining Industry Association [Отчёт горнодобывающей ассоциации Квинсленда]. 2020. 45 p. URL: <https://www.publications.qld.gov.au/dataset/queensland-mines-and-quarries-safety-performance-and-health-reports> (дата обращения: 14.08.2025)

5. Müller H., Schmidt J., Weber R. Dynamic Load Effects on Bridges Adjacent to Mining Sites // Journal of Structural Engineering. 2019. Vol. 145, № 3. P. 04018257. DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002187.

6. Романевич К.В., Мулев С.Н., Рукавишников Г.Д. Применение горношахтной системы сейсмического контроля GITS для целей геотехнического мониторинга подземных сооружений. Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг при инженерных изысканиях. Материалы Общероссийской научно-практической конференции. М.: ООО «Геомаркетинг». 2024. – С. 44-51. <https://doi.org/10.25296/978-5-6050369-3-7-2024-3-1-138>.

7. Питаль М.Н., Мулев С.Н. Программный комплекс GITS2. Руководство по эксплуатации. ВНИМИ, СПб, 2023. 117 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

<i>Кубрин С.С.</i> Роботизированный комплекс по добыче угля. Задачи требующие решения.....	3
<i>Еременко В.А., Косырева М.А.</i> Методические рекомендации по оценке устойчивости подземных горных выработок по индексу R_m в условиях разработки рудных и нерудных месторождений.....	6
<i>Назаров Л.А., Назарова Л.А.</i> Теоретическое и экспериментальное исследование массопереноса в геосредах регулярной структуры с контрастной проницаемостью.....	13
<i>Гетман В.В., Каркешикина А.Ю.</i> Применение модифицированных полимеров в качестве селективных реагентов в процессе флотации цветных и благородных металлов	16
<i>Милетенко Н.А.</i> Обеспечение безопасности водных объектов в зонах ведения горных работ, как условие реализации стратегических национальных приоритетов	19

ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

<i>Зозуля Я.Д., Касьяненко А.Л.</i> Гидравлические связи и их роль в формировании гидрогеологической обстановки при ликвидации шахт	22
<i>Сарзу Н.Ю.</i> Экспериментальные исследования снижения концентрации тяжелых металлов в почве при биоремедиации	25

ПРОБЛЕМЫ ГЕОМЕХАНИКИ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

<i>Кулибаба С.Б.</i> О точности прогноза оседаний земной поверхности .	29
<i>Леконцев Ю.М., Сажин П.В.</i> Технология дегазации угольных пластов	31
<i>Долгих В.П., Кныш А.С.</i> Прогнозирование объемов перетока воды между шахтами с помощью имитационного моделирования	35
<i>Федоров Е.В., Кулибаба С.Б., Милетенко Н.А.</i> Исследование метановыделения в окрестности геологического нарушения	39
<i>Баева Е.К.</i> Обоснование технологии возведения модульных свайных оснований технологических платформ в многолетнемерзлых породах.....	42

<i>Ягель Н.В., Закоришменный И.М., Блохин Д.И.</i> Влияние условий залегания угольного пласта на конвергенцию подготовительной выработки.....	46
<i>Заиров Ш.Ш., Халимов И.У., Мехмонов М.Р.</i> Исследование современного состояния проблемы повышения проницаемости урановых пластов при подземном выщелачивания.....	49
<i>Рожко М.Д., Хохлов Б.В.</i> К вопросу отработки угля в приповерхностной зоне в условиях выветрелых и обводненных пород.....	52
<i>Дрибан В.А., Дуброва Н.А., Колесник М.В.</i> Модель развития провалообразования над старыми горными выработками	55
<i>Бурдинская А.А.</i> Геомеханические исследования для оценки удароопасности массива месторождения Красивое.....	59
<i>Цой Д.И., Рассказов М.И., Терешкин А.А., Швец В.А., Яковенко С.В.</i> Обработка первичных данных лазерного деформометра в районе рудничного поля Николаевского месторождения	62
<i>Назарова Л.А., Назаров Л.А., Панов А.В., Скулкин А.А.</i> Обратный анализ в задачах реконструкции напряженного состояния геомеханических объектов различного масштабного уровня.....	65
<i>Радченко А.Г., Дыщук М.Ю., Салий С.Г.</i> Особенности изменения выбросоопасности угольных пластов с ростом глубины на шахтах ПО «Донецкуголь»	69
<i>Радченко А.Г., Дыщук М.Ю., Радченко А.А.</i> Закономерности изменения выбросоопасности угольных пластов по площадям на шахтах ПО «Донецкуголь».....	72
<i>Грицаенко А.Ю., Мартынов Г.П., Туманов В.В., Донченко Э.В.</i> Непараметрический подход к исследованию характеристик пассивных микросейсмических наблюдений	75
<i>Шиповский И.Е., Трофимов В.А.</i> Математическое моделирование просадки кровли при эксплуатации пластовых месторождений	78
<i>Трофимов В.А., Филиппов Ю.А., Докучаева А.И.</i> Особенности фильтрации воздуха в угольном веществе.....	83
<i>Ульянова Е.В., Малинникова О.Н., Пашичев Б.Н., Горшенков И.Н.</i> Особенности десорбции метана из угольных пластов.....	85
<i>Панов А.В., Мирошниченко Н.А.</i> Оценка фильтрационных параметров блочных горных пород с использованием экспериментальных данных	87

<i>Морозова К.Г., Остапчук А.А., Беседина А.Н., Павлов Д.В.</i> Особенности сейсмичности Коробковского железорудного месторождения, инициированной массовыми взрывами	91
<i>Козлова К.А., Косырева М.А., Еременко В.А.</i> Обоснование и расчет оптимальных параметров целиков различного назначения для горно-геологических и горнотехнических условий месторождения «Кумроч»	92
<i>Миронов Н.А.</i> О влиянии можности оставляемых защитных пачек в почве и глубины заложения выработок на величину пучения в условиях соляных пластов.....	95
<i>Трофимов В.А., Шляпин А.В., Филиппов Ю.А., Белоусов Ф.С.</i> Прогнозирование динамики эмиссии метана в протяженную скважину.	98
<i>Лин Лу</i> Механизм разрушения и контроль становления устойчивости выработок в сложных горно-геологических условиях	101

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

<i>Ковальчук И.О., Кондрашов А.В., Добрынин А.А.</i> Определение экранирующей способности отрезной щели.....	105
<i>Авдеев А.Н., Бочкарев Н.Н., Коптяков Д.А., Масальский Н.А., Харисов Т.Ф.</i> Метод экспресс-оценки дробимости горных пород с помощью склерометра	108
<i>Бредихин А.Ю., Добрынин А.А.</i> Замеры скорости детонации эмульсионного взрывчатого вещества при инициировании различными боевиками	112
<i>Заиров Ш.Ш., Халимов И.У., Мехмонов М.Р.</i> Исследование метода газовой детонации для восстановления фильтров и прифилтровых зон на урановых месторождениях	115
<i>Маслов И.Ю., Конюхов К.Р., Бредихин А.Ю.</i> Снижение токсичности газообразных продуктов химической сенсибилизации эмульсионных взрывчатых веществ	119
<i>Сергиенко Н.Н., Васильев Т.В., Песьяков А.В.</i> Особенности расчета параметров буровзрывных работ при применении газогенерирующих составов.....	122
<i>Кондрашов А.В., Добрынин И.А., Добрынин А.А.</i> Контрольные и приемочные испытания электронной системы инициирования «iDet».....	125

<i>Кондрашов А.В., Добрынин И.А., Добрынин А.А. Разработка и испытания эмульсионного взрывчатого вещества «Эвофор®»</i>	128
<i>Мингазов Р.Я., Франтов А.Е., Закалинский В.М., Курьянов М.В. О взаимосвязи вязкости горючего компонента и графенового порошка в составах промышленных взрывчатых веществ.....</i>	130
<i>Фазылов Т.В., Орлов М.Ю., Глазырин В.П. Исследование поведения природного известняка при взрывных нагрузках</i>	133
<i>Емельянов Р.В., Гуриева Е.В. Влияние количества вставок и размещения их внутри зарядной камеры с невзрывными разрушающими смесями на дезинтеграции массива карбонатных пород</i>	135

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ ОСВОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

<i>Иов И.А., Зырянов И.В., Кузнецов Н.К. Совершенствование рабочего оборудования карьерных экскаваторов на основе принципа природоподобия</i>	140
<i>Комаров Д.П. Применимость биопрототипов в проектировании робототехнических систем для подземной добычи твердых полезных ископаемых</i>	142
<i>Рыбалкин Л.А., Сердюков С.В., Сердюк И.М. Исследование влияния обработки кернов угля жидким азотом на их газопроницаемость.....</i>	146
<i>Никитин И.В. Совершенствование технологии отработки пологих залежей малой и средней мощности.....</i>	149
<i>Федотенко В.С., Матвеев А.В. Параметры экскаваторно-автомобильных комплексов с применением мехлопат для разрезов Кузбасса</i>	152
<i>Гавриленко В.В., Пацкевич Д.П. Обоснование возможности применения неклассифицированных пород от проходки выработок для приготовления цемента-породной закладки</i>	155
<i>Рыбалкин Л.А., Сердюков С.В., Сердюк И.М. Разработка модели неоднородной среды для исследования развития трещины гидроразрыва в области цилиндрической полости, пересекающей высокопроницаемый сегмент или разрыв</i>	156

<i>Рыбалкин Л.А., Шилова Т.В., Азаров А.В., Сердюк И.М.</i> Разработка лабораторных средств исследования угля методом ядерного магнитного резонанса	159
<i>Алифашкин А.А., Чеснова Е.С.</i> Обоснование технологии очистки прифилтровой зоны от пескования при сооружении скважин подземного выщелачивания	163
<i>Рыбалки Л.В., Сердюков С.В., Сердюк И.М.</i> Разработка лабораторной модели углепородного массива для исследования криогенного воздействия, выполняемого по схеме подачи жидкого азота в открытый ствол скважины	166
<i>Мироненкова Н.А., Полещук А.А.</i> Анализ результатов проведения поверхностной радоновой съемки на примере шахты Кузнецкого угольного бассейна	168
<i>Радченко Д.Н., Аверин А.П.</i> Совершенствование оборудования и технологий исследования пространственной конфигурации восходящих скважин при очистной выемке ручной массы на подземных горных работах	173
<i>Зырянов И.В., Непомнящих К.А., Труфанов А.И., Храмовских В.А., Шевченко А.Н.</i> Сетевой подход к оценке критичности остаточного ресурса горных машин и горного оборудования	176
<i>Савватеев Я.В., Иляхин С.В., Корнилов Б.А.</i> Картирование отраженного сигнала георадиолокационного зондирования под действием фонового поля (поля подсветки)	181
<i>Бархатов С.П.</i> Обоснование параметров внутрикарьерных съездов при использовании беспилотного автотранспорта	184
<i>Кирков А.Е., Гавриленко В.В.</i> Методика и инструментарий построения фотограмметрических моделей на основе данных видеосъемки подземных горных выработок с низкой освещенностью	187
<i>Ковальский Е.Р., Конгар-Сюрюн Ч.Б.</i> Повышение извлечения полезного ископаемого при разработке калийных пластов на больших глубинах	189
<i>Сыровацкий Р.А.</i> Пути снижения риска аварий и инцидентов при работе дистанционно управляемого оборудования в очистных камерах	192
<i>Малахов Ю.В.</i> О разработке технических требований к управлению очистным комбайном в сложных горно-геологических условиях	194

<i>Корякин А.А., Федотенко В.С.</i> Параметры гидромеханизированной технологии разработки и перемещения хвостов обогащения из шламохранилищ углеобогачительных фабрик с применением гидроэлеваторных земснарядов	198
<i>Ветюгов Д.А., Матвеева Т.Н.</i> Применение бентополимерной композиции при окомковании поликомпонентной железорудной шихты	203
<i>До Чи Тхань</i> Нейросетевое моделирование системы управления вентиляцией шахты	206
<i>Татарников В.И., Цховребов Б.В.</i> Консолидированная закладка – как условие промышленной и экологической безопасности Разработки соляных месторождений	213

АЭРОГАЗОПЫЛЕДИНАМИКА

<i>Белехов П.А.</i> Исследования выбросов загрязняющих веществ при работе в горных выработках машин с двигателем внутреннего сгорания	217
<i>Гаврюшова В.Д., Комиссаров П.В., Басакина С.С.</i> Об особенностях короткозамедленного взрыва, которая может приводить к усилению воздушной ударной волны и повышенному пылеобразованию ...	220
<i>Леденёва И.П.</i> Совершенствование методов прогнозирования газовой выделения в угольных шахтах на основе математического моделирования	221
<i>Шоджаи Барджои С., Родионов В.А., Яздани М.</i> Вдыхаемая пыль в керамической промышленности	224
<i>Кобылкин А.С.</i> Моделирование процессов дегазации и проветривания выемочных участков.....	227
<i>Харченко А.В., Дубинский М.Л.</i> Зависимость объема пылеотложения от свойств угля и его петрографического состава	229
<i>Поздеев Е.Э., Кубрин С.С.</i> Опытное определение параметров угольных пластов, необходимых для планирования дегазационных мероприятий.....	232
<i>Суров Д.И.</i> Тонкопленочные покрытия на основе поли-пара-ксилилена, применяемые для защиты приборов контроля, используемых на горных предприятия	235
<i>Кобылкин С.С., Сис Муе, Часовенко С.В., Мин Туяйн Хлаини</i> Моделирование аэрогазодинамических процессов при проветривании карьеров	237

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

<i>Бирючков Н.Е., Сердюков А.С.</i> Разработка программно-аппаратного комплекса мониторинга состояния массива пород в режиме реального времени.....	241
<i>Флеенко А.С.</i> Разработка модуля геоинформационной системы для моделирования и трехмерной визуализации загрязненности почвенного покрова	243

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИИ

<i>Гатиатуллин Б.Л.</i> Использование систем технического зрения при исследовании процессов флотационного обогащения минерального сырья	247
<i>Подрезов Д.Б.</i> Цифровой двойник процесса бурения	250
<i>Басаргин А.А.</i> Разработка концептуальной модели горнотехнической системы горного предприятия.....	253
<i>Дианов П.А., Закоршменный И.М.</i> Адаптивное управление очистным комбайном в высокопроизводительной лаве.....	256
<i>Зайцева Е.В., Арефьева Е.И.</i> Применение метода TENENGRAD для оценки размытости видеокадров, полученных глубинной скважинной видеосистемой.....	259
<i>Николаев И.Ю., Шалованов О.Л.</i> Моделирование кривых вертикального электрического зондирования и аудиомагнитотеллурического зондирования на углепородном массиве.....	262
<i>Милетенко Н.И.</i> Цифровые двойники горнопромышленных комплексов: от кинематики экскаватора к «фабрике» виртуальных карьеров.....	264
<i>Писарев В.С.</i> Тенденции развития маркшейдерско-геодезических средств изменений, используемых при проведении геотехнического мониторинга	268

ПРОБЛЕМЫ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

<i>Тихомиров З.Д., Маковская О.Ю.</i> Выщелачивание окисленных никелевых руд промпродуктами производства органических кислот	272
--	-----

<i>Александрова Т.Н., Прохорова Е.О.</i> Возможности применения термодинамического метода анализа влияния флотационных реагентов на поверхностные свойства угля	275
<i>Маклашова Е.Д., Маковская О.Ю.</i> Биовыщелачивание хвостов флотации сульфидных медно-цинковых руд	278
<i>Чеснова Е.С., Гончаров Я.А.</i> Классификация и обесшламливание минерального сырья современными и перспективными техническими устройствами	280
<i>Самборская Т.С., Кирильчук М.С.</i> Экспериментальные исследования перколяционного выщелачивания меди и золота активированными растворами из сульфидных хвостов флотации.....	284
<i>Лавриненко А.А., Кузнецова И.Н., Лусиян О.Г., Корзинова А.С., Гольберг Г.Ю.</i> Флотация медно-никелевой руды с применением полимерных депрессоров	287
<i>Вертиев С.А.</i> Перспективы совершенствования реагентного режима при флотации редкометалльных руд.....	290
<i>Александрова Т.Н., Абурова В.А.</i> Оценка влияния СВЧ обработки на прочностные параметры углеродистой благороднометаллической руды	293
<i>Дубровина В.Н., Горячев А.А., Лапин М.Д., Невзорова Ю.В.</i> Переработка лежалых хвостов обогащения медно-никелевых руд с извлечением цветных металлов и получением кристаллов сульфата железа	296
<i>Седельникова Д.С., Соколов Л.В., Лобанов В.Г., Колмачихина О.Б., Польшгалов С.Э.</i> Влияние СВЧ обработки на показатели выщелачивания ценных компонентов из лежалого клинкера	299
<i>Слободин В.А., Пахомов Р.А., Бажин В.Ю.</i> Совместная пирометаллургическая переработка отработанных автомобильных катализаторов с другими техногенными отходами.....	304
<i>Бушуев Д.А., Сыса П.А.</i> Лабораторные испытания магнитного гидроциклона на тонком железосодержащем промпродукте	307
<i>Зиятдинов С.В., Ефремова Т.А.</i> Совершенствование технологии обогащения окисленных медных руд с использованием рентгено-радиометрической сепарации.....	309
<i>Александрова Т.Н., Люблянова В.А.</i> Исследование влияния Гомологического ряда реагентов класса дитиофосфатов на флотацию цементной меди	313

<i>Джашибекова А.Н., Доспаев М.М., Фигуринене И.В., Доспаев Д.М.</i> Электрохимическая сульфидизация труднообогатимых техногенных окисленных медных руд	316
<i>Лушина Е.А.</i> Роль неорганических солей в формировании пенного слоя при флотационном обогащении	319
<i>Синьков И.С., Мамонов С.В., Морозов Ю.П., Чинова Н.Б.</i> Способы подавления флотационной активности пирротина	323
<i>Соколова Е.С.</i> Подготовка техногенного золотосодержащего сырья с накопленными древесными отходами к обогащению	326
<i>Степанов Д.В.</i> Исследование высокоградиентной магнитной сепарации при обогащении техногенного сырья	330
<i>Миненко В.Г., Самусев А.Л.</i> Минеральные сорбенты на основе модифицированного сапонита для извлечения цветных, редкоземельных металлов и золота	334
<i>Тимофеев А.С., Бунин И.Ж., Двойченкова Г.П.</i> Влияние минерализации оборотных вод на эффективность электрогидравлической обработки ферросилициевой суспензии.....	337
<i>Соленикова Е.О.</i> Особенности вещественного состава и технологические свойства комплексных титан-циркониевых россыпей	340
<i>Анашкина Н.Е.</i> Изучение влияния высоковольтных наносекундных импульсов на механические и физико-химические свойства ильменита.....	343
<i>Гапчич А.О., Ланцова Л.Б.</i> Флотационные испытания реагента ПирроДТК для извлечения меди из комплексной руды	346
<i>Гладышева О.И., Гапчич А.О.</i> Апробация реагента цианэтилдитиокарбамата для извлечения ценных металлов из лежалых хвостов	349
<i>Фуреев И.Л., Головкин В.В.</i> Способ переработки высококарбонатных литийсодержащих слюдястых руд методом спекания и обратной сорбции.....	351
<i>Писарева А.А., Зеновьев И.А., Милетенко Н.И., Кунилова И.В., Лавриненко А.А.</i> Исследование ультразвуковой интенсификации выщелачивания золошлаковых отходов слоевого сжигания каменных углей	355
<i>Каркешкина А.Ю., Гетман В.В.</i> Влияние 1-карбокси-2-пергидро-(1,3,5-дифтазин)-5-ил-этана на гидрофобные свойства поверхности галенита и сфалерита.....	357

<i>Лукьянов К.В., Лавриненко А.А.</i> Совершенствование технологии обогащения полиметаллической руды	360
<i>Рыжиков В.С.</i> К вопросу об износе футеровки барабанных мельниц	363

УПРАВЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВОМ, ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И СОЦИАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ НЕДР

<i>Попова А.М., Лапинскас А.А.</i> Экономические последствия внедрения цифровых технологий в управлении добычей	367
<i>Заернюк В.М.</i> Экономические проблемы освоения недр и пути их решения в современных условиях	370
<i>Жизневская П.А.</i> Инвестиционный потенциал Хабаровского края: регрессионный анализ и моделирование	373
<i>Ивин В.М.</i> Упущенные запасы. Рациональное недропользование ..	376
<i>Шоджаи Барджои С., Родионов В.А.</i> Современный подход к управлению безопасностью труда в иранской керамической промышленности	379

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИИ

<i>Воробьев К.А., Насонова А.В., Чекушина Т.В.</i> Передовые зарубежные и российские разработки по сокращению выбросов CO ₂ промышленных предприятий	384
<i>Аль-Замели С.С.</i> Оценка опасностей археологической зоны Ханас (Khinis) в Ираке	387
<i>Голубев Ф.В.</i> Перспективы применения растений рода <i>Cladochaeta</i> DC. в фиторемедиации территорий Северного Кавказа	389
<i>Высотин Н.Г.</i> Эколого-экономическая оценка геомеханического обеспечения гидроразрыва пласта в карбонатных породах	392
<i>Набатов В.В.</i> Использование байесовской классификации при оценке структуры заобделочного пространства тоннелей метрополитенов	395
<i>Икреников М.С., Романевич К.В., Нефедов С.И., Мулев С.Н.</i> Оценка влияния вибраций от горных машин и оборудования на охраняемые объекты	398

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК



Группа ЭВОБЛАСТ – российский разработчик инновационных комплексных решений для ведения буровзрывных работ, производитель и поставщик передовых коммерческих взрывчатых материалов промышленного назначения и инжиниринговых услуг для горной и строительной отраслей промышленности.

Группа оказывает полный комплекс услуг по ведению буровзрывных работ и специализируется на предоставлении решений премиального качества:

- эмульсионных взрывчатых веществах для открытых и подземных горных работ;
- средствах инициирования;
- комплексных экспертных услугах для эффективного и безопасного ведения буровзрывных работ.

ЭВОБЛАСТ реализует проекты по всей России – от Кольского полуострова до Дальнего Востока, и имеет опыт ведения работ в уникальных горно-геологических условиях России. В Группе работают более 650 специалистов.

В основе устойчивого развития Группы – профессиональная команда, инновационные решения и высокие стандарты. При разработке решений учитываются как показатели эффективности, так и требования по охране окружающей среды. Кроме того, Группа ЭВОБЛАСТ сотрудничает с учебными заведениями России – тем самым инвестирует в будущее поколение специалистов.

На российском рынке Группа ЭВОБЛАСТ работает с 1993 года, предоставляя заказчикам полный комплекс сервисных услуг по ведению буровзрывных работ.

ГК «Эвобласт»,
Москва, 125315, Ленинградский проспект, 72, к.1, 8 эт.,
+74956411164, www.evoblast.ru

ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ НЕДР В ХХІ ВЕКЕ ГЛАЗАМИ МОЛОДЫХ

Техническое редактирование
и компьютерная верстка *Н.А.Вдовина*

Подписано в печать с оригинал-макета 06.10.2025 г. Формат 60х84 1/16.
Бумага «Мега Copy Office». Печать офсетная. Набор компьютерный. Объем
26 п.л. Тираж 300 экз. Заказ № 278.

Институт проблем комплексного освоения недр им. академика
Н.В. Мельникова РАН
111020, Москва, Крюковский тупик, 4.
Издание ИПКОН РАН, 111020, Москва, Крюковский тупик, 4

