

УДК 622.27

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЗАКЛАДОЧНЫХ РАБОТ НА ОСНОВЕ
ЦЕМЕНТНО-ШЛАКОВОГО ВЯЖУЩЕГО НА ОРЛОВСКОМ РУДНИКЕ

Л. А. Крупник¹, Ю. Н. Шапошник², С. Н. Шапошник³,
Г. Т. Нуршайыкова³, З. К. Тунгушбаева³

¹Казахский национальный технический университет,
ул. Сатпаева, 22, 050013, г. Алматы, Казахстан

²Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,

E-mail: shaposhnikyury@mail.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

³Восточно-Казахстанский государственный технический университет,

ул. Протозанова, 69, 070004, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Приведены горно-геологические характеристики руд и вмещающих пород Орловского месторождения, в том числе Северного рудного тела залежи “Новая”. Отработка месторождения осуществляется подземным способом с применением слоевых и камерных систем разработки с подэтажной отбойкой. Обоснована необходимость внедрения технологии приготовления закладки на основе цементно-шлакового вяжущего. В результате лабораторных исследований для условий Орловского рудника разработаны рациональные составы такой закладки. Установлено, что активность доменного гранулированного шлака определяется не только химическим составом и структурой, но и в значительной степени тонкостью помола (удельной поверхностью). Дана технико-экономическая оценка разработанной технологии приготовления закладки.

Закладочные работы, закладочная смесь, доменный гранулированный шлак, схемы приготовления закладочной смеси

Орловское месторождение включает “Основную” и “Новую” залежи, запасы которых в настоящее время обрабатывают по Западному рудному телу и “Громовской” залежи, ведутся разведочные и поисково-оценочные работы [1].

Разрабатываемые рудные тела представлены “слепыми” сложными залежами, расположенными на глубине от 70 до 1200 м от поверхности. Форма их — пласто-линзообразная. Большая часть запасов залежи “Основная” отработана. Средние мощности оставшихся запасов — от 6 до 38 м, углы падения — от 20 до 65° на запад, простирание северо-восточное. Залежь “Новая” находится в 200 м к западу от “Основной”, залегает на глубине от 600 до 1200 м. Простирание северо-восточное и субширотное, длина по простиранию 800 м, по падению — до 340 м.

Сплошные барит-полиметаллические, медно-цинковые, сплошные и вкрапленные медно-колчеданные руды обладают высокими прочностными и упругими свойствами. Северное рудное тело залежи “Новая” представляет собой перемежающиеся рудные тела линзообразной формы и залегает в интервале глубин 800–1200 м (уровень 18 горизонта), имеет пластообразную форму, субширотное простирание (рис. 1). По простиранию прослежено на 800 м при ши-

рине от 140 до 160 м. Мощность колеблется в пределах от 5 до 52.6 м, средняя — 18 м. Углы падения от нуля до 60°. Руды и прилегающие породы слабоустойчивые. Породы околорудных зон весьма неустойчивые из-за многочисленных разнонаправленных микротрещин, заполненных кальцитом, пиритом, и зеркал скольжения. При обнажении, снятии больших нагрузок и увлажнении такие породы разуплотняются и обрушаются в горные выработки. Руды пожароопасные (содержание серы более 35%). Балансовые запасы Северного рудного тела на 01.01.2015 г. по категории С₁ составляют 3615 тыс. т.

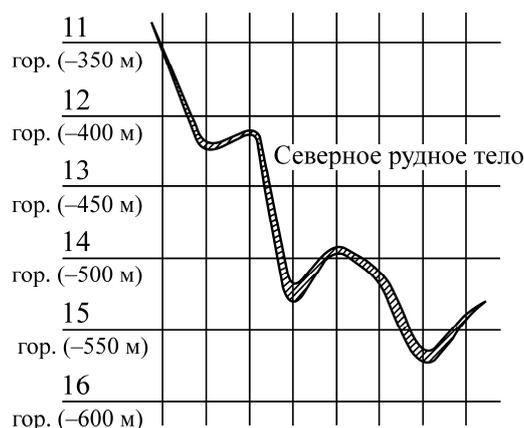


Рис. 1. Разрез по VIII линии штофов (л.ш.) Северного рудного тела

Исходя из горнотехнических условий разработки Северного рудного тела и учитывая рекомендации и опыт разработки Орловского месторождения, для выемки запасов руд предусматриваются следующие системы разработки [2–5]:

— пологопадающие линзы, расположенные в пределах разрезов 5–7 южной линии ортов (ю.л.о.) на уровне 14–17 горизонтов, а также в пределах разрезов VII–VIII л.ш. с уровня 12–13 по уровень 13–14 горизонтов (30.2% от общих запасов руды) — горизонтальные слои с нисходящей выемкой и твердеющей закладкой. Данная система разработки предусмотрена для отработки основной части запасов пологопадающих рудных тел;

— пологопадающие линзы, расположенные в пределах разрезов 5–7 ю.л.о. на уровне 14–17 горизонтов, а также в пределах разрезов VII–VIII л.ш. с уровня 12–13 по уровень 13–14 горизонтов (5% от общих запасов руды) — горизонтальные слои с восходящей выемкой и твердеющей закладкой. Данная система разработки предусмотрена для отработки незначительной части запасов пологопадающих рудных тел;

— крутонаклонные рудные тела (32.4% от общих запасов руды) — подэтажно-камерная система разработки с нисходящей выемкой и твердеющей закладкой с формированием несущего слоя из армированной закладки 4 м, а также формированием вышерасположенного несущего слоя без армировки;

— крутонаклонные рудные тела (32.4% от общих запасов руды) — подэтажно-камерная система разработки с восходящей выемкой и твердеющей закладкой с предварительным формированием несущего слоя из армированной закладки 4 м.

Армирование искусственного массива является элементом его укрепления и снижает требования к прочности несущего слоя. Категория устойчивости кровли, представленной закладочным массивом при нисходящей слоевой системе разработки в наиболее характерных условиях Орловского рудника (ширина обнажения кровли 4 м, высота несущего слоя 1–1.5 м, отработка заходов в три очереди), определяется технологическим регламентом по данным табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Категория устойчивости закладочного массива

Категория устойчивости массива	Высота несущего слоя h_n , м	Коэффициент запаса прочности K_3	Прочность искусственного массива, МПа	
			без армирования	с армированием
I (устойчивая)	1.0	> 5	Не менее 3.7	Не менее 2.5
	1.2		Не менее 3.1	Не менее 2.1
	1.5		Не менее 2.5	Не менее 1.7
II, III, IV (средней устойчивости)	1.0	3–5	От 2.2 до 3.7	От 1.5 до 2.5
	1.2		От 1.9 до 3.1	От 1.3 до 2.1
	1.5		От 1.5 до 2.5	От 1.0 до 1.7
V (неустойчивая)	1.0	< 3	Не менее 2.2	Не менее 1.5
	1.2		Не менее 1.9	Не менее 1.5
	1.5		Не менее 1.5	Не менее 1.5

Вертикальные обнажения искусственного массива высотой до 4 м при прочности закладочного массива не менее 0.7 МПа и высотой до 15 м при прочности закладочного массива не менее 1.5 МПа — относятся к категории устойчивых.

В качестве крепления нарезных и очистных выработок, кровля которых представлена закладочным массивом, применяется армирование несущего слоя вертикальными элементами и сеткой. Параметры армировки при ширине нарезных и очистных выработок 4–4.5 м необходимо принимать в соответствии с паспортом укрепления искусственного массива: высота вертикальных армирующих элементов 3 м, диаметр $d_n = 14$ мм (арматурная сталь диаметром 14 мм, класса не менее А-II (А300) ГОСТ 5781), сварная сетка, укладываемая на почву закладываемой выработки, с параметрами 200×200 мм и диаметром прутка не менее 5 мм.

Критерием оценки устойчивости армированной кровли служит запас прочности, определяемый по соотношению действующих и допускаемых напряжений в металле (на разрыв) и бетоне (на срез) от массы удерживаемой плиты в нижнем слое.

Значения запасов прочности принимаются по рекомендациям ВНИМИ [6].

Проведенные расчеты показали, что арматурный стержень диаметром $d = 14$ мм удовлетворяет с коэффициентом запаса прочности по сцеплению армирующего стержня с закладочным массивом 5.35 и с запасом прочности по усилию на разрыв металла в армирующем стержне более 3.1.

Подэтажно-камерная система разработки с нисходящей выемкой и твердеющей закладкой с мощностью несущего слоя из армированного закладочного массива до 4 м может быть применима для условий Северного рудного тела. В результате моделирования и оценки геомеханических условий горных работ установлено, что при средне- и слабонарушенных горных породах нисходящая выемка обеспечивает безопасность разработок.

Производство закладочных смесей осуществляется на двух закладочных комплексах: бетоногидрокладочном узле (БГУ) и бетонозакладочном комплексе (БЗК) [7, 8]. Твердеющая закладочная смесь (ЗС) готовится из портландцемента М400-Д20, инертного материала (дробленая порода и отсев), текущих хвостов обогатительной фабрики и затворителя. Поставляемый на закладочный комплекс исходный инертный материал раздробливается до крупности – 20 мм. В процессе приготовления закладочной смеси дробленая порода измельчается в шаровой мельнице до крупности, характеризующейся содержанием мелкого класса – 0.08 мм не менее 25 % и содержанием крупного класса + 2.5 мм не более 15 % по массе.

В качестве основного компонента заполнителя закладочной смеси используются текущие хвосты обогащения, которые поступают на БГУ в виде пульпы. Подготовка текущих хвостов для закладки происходит по схеме двойного циклонирования. На первой стадии текущие хвосты на обогатительной фабрике (ОФ) плотностью $1050\text{--}1100\text{ кг/м}^3$ после процесса обогащения поступают в зумпф, откуда перекачиваются насосом на две батареи гидроциклонов (по 10 шт. в каждой). После циклонирования часть хвостов в виде пульпы плотностью $1400\text{--}1700\text{ кг/м}^3$ поступает в зумпф.

Полученная пульпа после разбавления ее свежей водой до плотности $1200\text{--}1300\text{ кг/м}^3$ перекачивается насосом по трубам диаметром 325 мм с обогатительной фабрики на БГУ и поступает на батарею из 6 гидроциклонов (вторая стадия циклонирования). Готовая песковая пульпа оптимального качества содержит 70 % твердого.

Слив гидроциклонов БГУ с помощью насоса поступает на ОФ, откуда вместе со сливом гидроциклонов пульпонасосной перекачивается в хвостохранилище. Плотность и объем песковой пульпы, используемой для производства закладочной смеси, определяются качеством и количеством текущих хвостов обогащения, которые в свою очередь зависят от качества и количества переработанной руды, технологического процесса обогащения и др.

Объем пульпы, поступающей с ОФ на БГУ, составляет $200\text{--}240\text{ м}^3/\text{ч}$. После разделения пульпы на гидроциклонах БГУ объем готовой песковой пульпы равен $40\text{--}60\text{ м}^3/\text{ч}$, объем слива — $150\text{--}180\text{ м}^3/\text{ч}$. При существующей технологии расход цемента для закладки на основе цементного вяжущего составляет при формировании несущего слоя 250 кг/м^3 , при дозаливе — 150 кг/м^3 . С целью снижения затрат на закладочные работы, уменьшения расхода дорогостоящего цемента на Орловском руднике разработана технология производства ЗС мельничным способом на основе цементно-шлакового вяжущего с использованием в качестве заполнителя смеси дробленой породы, отсева дробильно-сортировочной фабрики и отходов горно-металлургического производства — измельченных доменных гранулированных шлаков.

Доменный гранулированный шлак по химическому составу и коэффициенту качества должен быть не ниже II сорта по ГОСТ 3476-74. В молотом граншлаке, подаваемом в процессе приготовления закладочной смеси, содержание тонких частиц класса -80 мкм должно быть не менее 50 % по массе.

В результате проведенных лабораторных исследований для условий Орловского рудника разработаны рациональные составы закладки на основе цементно-шлакового вяжущего. Так, расход вяжущих в данных составах (при достижении нормативной прочности) следующий:

— при слоевых системах разработки: портландцемент ПЦ 400-Д20 — 70 кг/м^3 (при формировании несущего слоя), 40 кг/м^3 (при дозаливе); доменный гранулированный шлак — 250 и 170 кг/м^3 соответственно;

— при камерных системах разработки: портландцемент ПЦ 400-Д20 — 100 кг/м^3 (при формировании несущего и упрочненного слоев), 40 кг/м^3 (при дозаливе); доменный гранулированный шлак — 220 и 170 кг/м^3 соответственно.

Зависимость прочности закладочного массива (ЗМ) от расхода цемента при различных составах закладки приведена на рис. 2. Исследования на растровом электронном микроскопе (рис. 3) показали, что вещественный состав закладочного массива не однороден. Фракции гранулированного шлака различаются между собой по элементному составу [9]. ЗМ на основе цементно-шлакового вяжущего, а именно гранулированных доменных шлаков, характеризуется повышенным содержанием Si, Ca и Al, что и предопределяет высокую активность вяжущего.

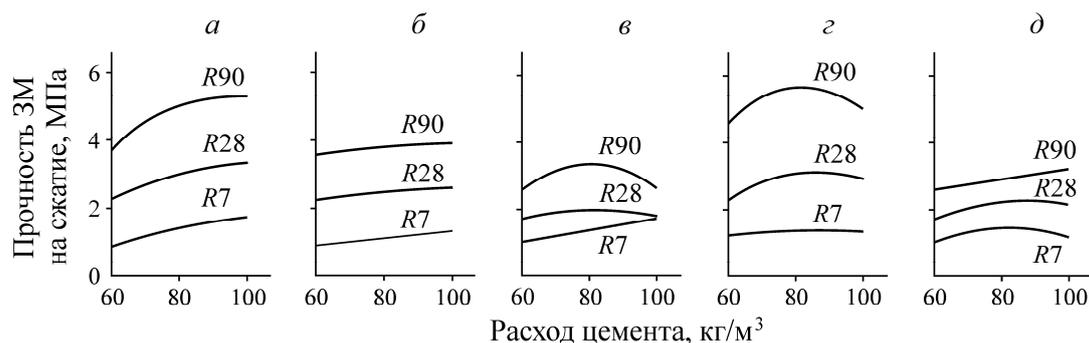


Рис. 2. Зависимость прочности закладочного массива от расхода цемента при времени твердения ЗМ 7, 28 и 90 сут.: *a* — состав ЗС, кг/м³: граншлак — 220–260; текущие хвосты — 330; отсев — 450; дробленая порода — 485; затворитель — 440; *б* — состав ЗС без дробленой породы, кг/м³: граншлак — 220–260; текущие хвосты — 345; отсев — 880; затворитель — 450; *в* — состав ЗС без отсева, кг/м³: граншлак — 220–260; текущие хвосты — 340; дробленая порода — 970; затворитель — 430; *г* — состав ЗС без текущих хвостов и дробленой породы, кг/м³: граншлак — 220–260; отсев — 1215; затворитель — 420; *д* — состав ЗС без текущих хвостов и отсева, кг/м³: граншлак — 220–260; дробленая порода — 1315; затворитель — 400

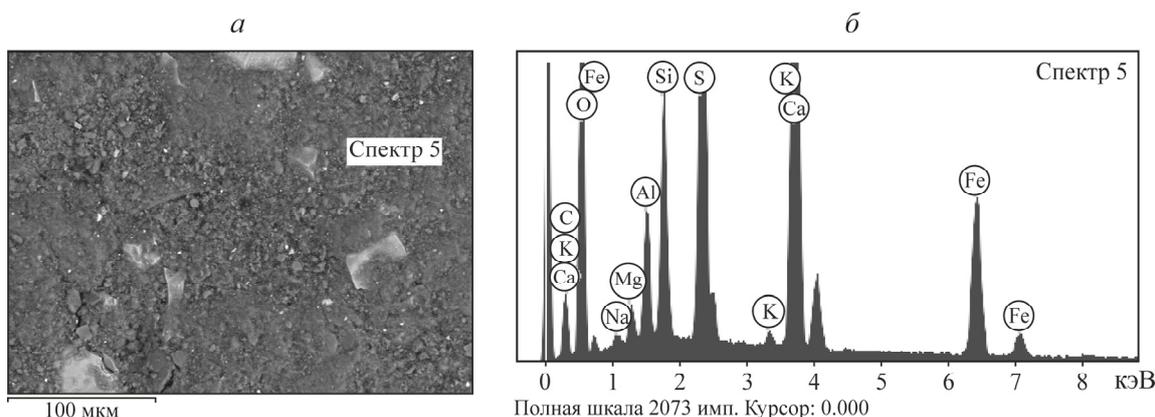


Рис. 3. Электронное изображение наружной поверхности образца-куба закладочного массива (весовая доля элементов, %: С — 12.91; О — 44.86; Na — 0.26; Mg — 0.63; Al — 2.00; Si — 3.99; S — 10.34; К — 0.26; Ca — 14.53; Fe — 10.22)

Установлено, что активность дисперсных фракций доменного граншлака определяется не только химическим составом и структурой, активирующими добавками, но и в значительной степени тонкостью помола, в результате которого максимум содержания частиц смещается в сторону мелких зерен, имеющих высокую реакционную способность. Выявлено, что активная фракция имеет узкий размерный ряд зерен (6–12 мкм) и для доменных шлаков составляет 95 % от общей измельченной массы [10]. Для повышения активности вяжущего необходимо получение измельченного материала узкой гранулометрии с активным размерным диапазоном зерен. Активный размерный ряд зерен доменных граншлаков (менее 20 мкм) получают тонкодисперсным измельчением [11]. При дисперсном измельчении доменных шлаков уменьшение шлакового зерна сопровождается ростом удельной поверхности [12].

Схема приготовления закладки на основе цементно-шлакового вяжущего следующая. В мельнице МШЦ 2700 × 3600 гранулированные доменные шлаки измельчаются до класса –0.074 мм не менее 50 % по массе (рис. 4).

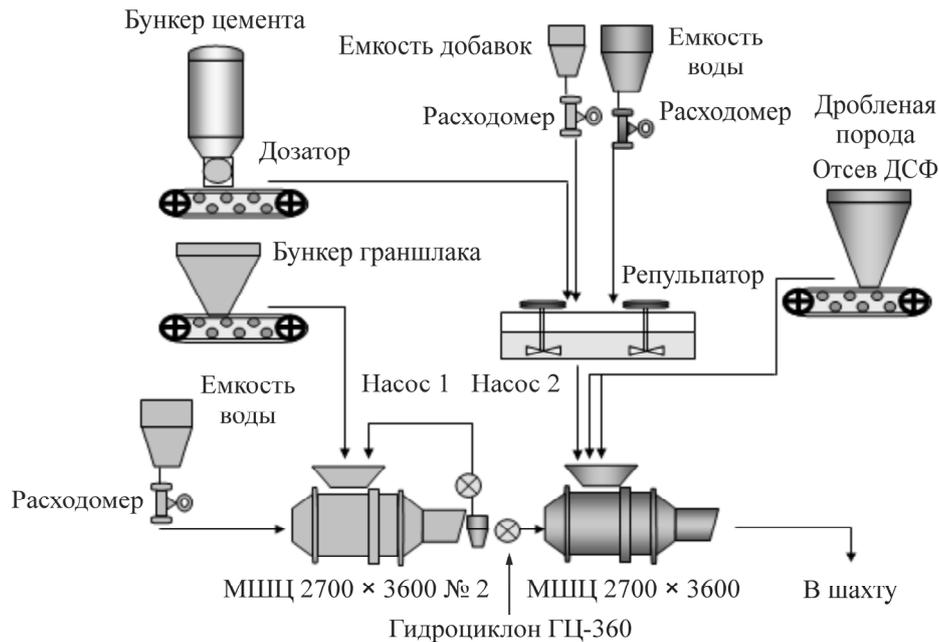


Рис. 4. Технологическая схема бетонозакладочного комплекса для приготовления закладки на основе цементно-шлакового вяжущего (ДСФ — дробильно-сортировочная фабрика)

Подача ЗС в шахту производится самотечным способом по бетоноводу, состоящему из труб диаметром 146×8.5 мм ГОСТ 632-80 (вертикальный став в стволе протяженностью 575 м), а также по горизонтальному бетоноводу, состоящему из труб диаметром 114×6 мм ГОСТ 8732-78. Рабочая скорость движения ЗС по транспортному трубопроводу по расчету составила 2.5 м/с.

Транспортировка твердеющих ЗС по эксплуатационным горизонтам осуществляется по трубам под действием напора, создаваемого столбом смеси вертикального става трубопровода. Максимальная дальность подачи смеси для сложившихся условий на Орловском руднике (составы смесей, диаметр трубопроводов, трассировка бетоноводов) определяется из выражения: $Z = (3 \div 5)H$ (H — высота заполнения вертикального става смесью, м).

Максимально возможная дальность транспортирования ЗС в зависимости от ее состава по горизонтам от 3460 до 3980 м соответствует требуемым параметрам дальности транспортирования закладки на нижних горизонтах месторождения. При необходимости подачи закладки на большие расстояния возможно применение схемы подачи смеси в самотечно-пневматическом режиме [13, 14]. Удельный расход сжатого воздуха при транспортировании 1 м^3 закладочной смеси в условиях Орловского рудника составит $25 \text{ м}^3/\text{м}^3$ на 1 км транспортирования, что не превышает нормативных значений $60 - 80 \text{ м}^3/\text{м}^3$ [15].

Таким образом, на основании выполненных расчетов подтверждена возможность транспортирования закладочных смесей на основе цементно-шлакового вяжущего по горизонтальному участку в самотечном режиме на расстояние около 3500 м. Применение дополнительной мельницы МШЦ 2700×3600 позволяет достичь необходимой производительности закладочного комплекса по измельчению граншлака, мельницы МШЦ 2700×3600 — для приготовления закладочной смеси в объеме более $60 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Для оценки эффективности закладочных работ выполнен расчет дисконтированного потока денежных средств. Стоимость доменных гранулированных шлаков составляет 16.02 долл. США/т, стоимость цемента марки М400 — 150 долл. США/т.

Прогнозные затраты на вяжущее в составе ЗС на период 2016–2025 гг. представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Затраты на вяжущее в составе закладочной смеси, тыс. долл. США

Технология	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2016– 2025
Существующая	2822	2822	2822	2822	2605	2387	2118	1736	1302	865	22301
Предлагаемая	1733	1733	1733	1733	1600	1466	1333	1066	800	531	13728

Затраты на закладочные работы складываются из капитальных и эксплуатационных. В капитальные включены затраты на строительство закрытого склада хранения граншлаков, здания дробильно-смесительного отделения, приобретение основного технологического оборудования и др. Эксплуатационные состоят из затрат на материалы, электроэнергию, отопление, вентиляцию, сжатый воздух, водоснабжение, мероприятия по противопожарной защите и расходов по оплате труда.

Основные экономические показатели работы Орловского рудника при технологии закладочных работ на основе цементно-шлакового вяжущего без учета реализации продукции за период 2016–2025 гг. приведены ниже:

добыча руды, тыс. т	10298.8
объемы закладочных работ, тыс. м ³	2855.9
эксплуатационные затраты, тыс. долл. США	14141
капитальные затраты, тыс. долл. США	1259
чистый доход, тыс. долл. США	–15161
чистый поток денежных средств, тыс. долл. США	–15356
накопленный чистый поток денежных средств, тыс. долл. США:	–15356
при ставке дисконта 0.15	–8863
при ставке дисконта 0.2	–7683
при ставке дисконта 0.3	–6027

Ожидаемый экономический эффект при использовании цементно-шлакового вяжущего за период 2016–2025 гг. составит 7476 тыс. долл. США. Срок окупаемости проекта — 2 года.

Таким образом, применение на Орловском руднике технологии приготовления закладки на основе цементно-шлакового вяжущего позволит существенно снизить затраты на закладочные работы за счет уменьшения доли содержания дорогостоящего портландцемента в составе ЗС.

ВЫВОДЫ

Для обеспечения безопасности горных работ, повышения полноты и качества извлечения запасов, снижения себестоимости добычи руды для условий Орловского месторождения предложена технология приготовления и рациональные составы закладки на основе цементно-шлакового вяжущего.

Исходя из горнотехнических условий разработки Орловского месторождения, рекомендованы следующие системы разработки:

— пологопадающие линзы (горизонтальные слои с нисходящей и восходящей выемкой и твердеющей закладкой);

— крутонаклонные рудные тела (подэтажно-камерная система разработки с нисходящей выемкой и твердеющей закладкой с формированием несущего слоя из армированной закладки 4 м, а также формированием вышерасположенного несущего слоя без армировки; подэтажно-камерная система разработки с восходящей выемкой и твердеющей закладкой с предварительным формированием несущего слоя из армированной закладки 4 м).

Экономический эффект при использовании цементно-шлакового вяжущего на Орловском руднике за период 2016–2025 гг. ожидается 7476 тыс. долл. США.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Барилюк А. И., Рышкель И. А., Ткачев В. М., Макаров А. Б., Орт В. Г., Ананин А. И.** Разработка Орловского месторождения системой горизонтальных слоев в нисходящем порядке // Горн. журн. — 2002. — № 5. — С. 55–58.
2. **Исаев К. О., Макаров А. Б., Терешин А. А., Сосунов Ю. А.** Управление горным давлением при разработке Орловского месторождения слоевой системой с закладкой // Маркшейдер. вестн. — 1999. — № 2. — С. 23–33.
3. **Кунанбаев Н. С., Макаров А. Б., Терешин А. А., Сосунов Ю. А.** Геомеханические процессы при разработке Орловского месторождения // Горн. журн. — 2000. — № 5. — С. 10–13.
4. **Барилюк А. И., Терешин А. А.** Проявления горного давления при разработке Орловского месторождения в удароопасных условиях // Маркшейдер. вестн. — 2001. — № 1. — С. 49–53.
5. **Косых В. В., Макаров А. Б., Огородников С. В., Ананин А. И., Келеманов С. И.** Прогноз и предотвращение горных ударов на Орловском руднике // Цв. металлы. — 2005. — № 5. — С. 42–44.
6. **Методические указания по определению нормативной прочности твердеющей закладки на рудниках цветной металлургии.** — СПб.: ВНИМИ, 1993. — 40 с.
7. **Николаев Е. И., Гультияев В. Г., Кожбанов К. Х.** Новая технология приготовления твердеющей закладки на Орловском руднике // Горн. журн. — 2002. — № 5. — С. 58–60.
8. **Битимбаев М. Ж., Крупник Л. А., Шапошник Ю. Н.** Теория и практика закладочных работ при разработке месторождений полезных ископаемых. — Алматы: Ассоц. вузов Казахстана, 2012. — 624 с.
9. **Хоботова Э. Б., Калмыкова Ю. С.** Отвальный доменный шлак как сырьевой компонент производства вяжущих веществ // Экология и пром-сть. — 2011. — № 1. — С. 35–40.
10. **Кравченко В. П.** Исследование влияния степени измельчения на гранулометрические характеристики доменных шлаков // Обогащение полезных ископаемых. — 2010. — Вып. 43(84). — С. 36–42.
11. **Кравченко В. П.** Влияние гранулометрических характеристик на гидравлическую активность доменных шлаков // Обогащение полезных ископаемых. — 2012. — Вып. 50(91). — С. 56–60.
12. **Крупник Л. А., Шапошник Ю. Н., Шапошник С. Н.** Разработка технологии закладочных работ на проектируемом Ново-Лениногорском руднике // ГИАБ. — 2015. — № 8. — С. 25–32.
13. **Крупник Л. А., Шапошник Ю. Н., Шапошник С. Н.** Перспективные направления транспортирования закладочной смеси в шахту на горнодобывающих предприятиях Казахстана // Горн. оборудование и электромеханика. — 2015. — № 4. — С. 21–28.
14. **Krupnik L., Abdykalykova R., Elemesov K., Sladkowski A., Shaposhnik Yu., Shaposhnik S.** Combined pipeline transport for hardening filling Mixtures, VIII Int. Conf. “Transport Problems”, Catowice, Poland, 2016. — P. 258–265.
15. **Крупник Л. А., Шапошник Ю. Н., Шапошник С. Н., Турсунбаева А. К.** Технология закладочных работ на горнодобывающих предприятиях Республики Казахстан // ФТПРПИ. — 2013. — № 1. — С. 95–105.

Поступила в редакцию 27/VII 2016