

УДК 622.245.42

**ОБОСНОВАНИЕ СОСТАВА И ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ
ЦЕМЕНТНОЙ ЗАКЛАДКИ НА РУДНИКЕ CERRO LINDO, ПЕРУ**

Л. А. Перез¹, К. Г. Переа²

¹*Компания INCIMMET S. A., г. Лима, Перу*

²*Педагогический и технологический университет Колумбии,
E-mail: carlos.perea@uptc.edu.co, г. Согамосо, Колумбия*

Разработан экспериментальный проект оценки различных технологий подготовки цементной закладочной смеси, проверки ее требуемой прочности и параметров замешивания. Рассмотрены метод определения применимости предлагаемой технологии, сопротивляемость закладки на сжатие, а также результаты оценки стоимости, уровня повышения производительности рудника и безопасности горнодобывающих работ. Установлена пиковая сопротивляемость закладки на сжатие, достигнуто снижение разубоживания руды и повышение устойчивости целиков.

Подэтажная выемка, цементная закладка, система закладки, прочность закладки, подземная добыча

DOI: 10.15372/FTPRPI20230408

Технический прогресс и глобальное экономическое развитие повышают потребность в объеме добываемых полезных ископаемых, вместе с которыми происходит выемка сопутствующих материалов (отходов горного производства). Объемное соотношение отходы : полезные продукты в процессе горнодобывающей деятельности составляет 100 : 1 и может быть значительно выше при разработке месторождений с низкой концентрацией руды [1].

Извлечение металлосодержащих веществ из руды требует ее измельчения, применения гидromеталлургических технологий и обогащения, в ходе которых образуется много пустой породы. Обычно пустая порода сваливается в хвостохранилища. Это самый простой и дешевый способ, но широко применять его невозможно, так как требуются огромные площади земли, возникает опасность обрушения хвостовой дамбы и потенциального загрязнения подземных вод тяжелыми металлами в процессе их вымывания [1 – 3]. Увеличение объемов добываемой рудной массы приводит к разработке опорных целиков, выемка которых несет в себе угрозу устойчивости выработок. Данная проблема решается закладкой отработанных выработок пустой породой [4].

В настоящее время разработаны технологии закладки, обеспечивающие безопасную добычу руды при эксплуатации шахты в горных породах с низкой прочностью, включая формации с возможностью горного удара [5]. В подземных рудниках распространена пастовая закладка [6].

Она применяется и при подэтажной выемке. Здесь закладочным материалом служит смесь сухой пустой породы с массовой долей 70–85 % и портландцемента (или иного гидросвязующего вещества) в количестве 3–7 %. Далее в смесь добавляется вода и размешивается до состояния пасты [1]. Пастовая закладка позволяет избежать перелива жидкости, снизить поверхностную осадку, восстановить породный массив при меньших затратах и обеспечить его устойчивость. Ее применение снижает просачивание воды в массив, удерживает тяжелые металлы и кислоты в закладочном материале. Традиционные методы извлечения пустой породы не обладают такими преимуществами либо могут их обеспечить при высоких эксплуатационных затратах.

В ряде научных работ показано, что сопротивляемость пастовой закладки обусловлена соотношением цемент : заполнитель : вода и временем выдержки. Чем больше связующего материала в смеси, тем выше модуль упругости и прочность на сжатие закладочного массива. Однако повышение доли цемента в смеси увеличивает затраты на закладочные работы [7].

Горнодобывающие компании в среднем потребляют до 100 тыс. т цемента в год. Стоимость цемента, его транспортировка, а также ликвидация углеродных выбросов при его производстве составляют значительные затраты на закладку выработок даже при количестве цемента 3–6 %. Закладочная смесь к выработкам подается через трубы, для прокладки которых требуется бурение значительных расстояний, что приводит к большим расходам. Необходимо постоянно отслеживать плотность закладки и ее оседание во избежание закупоривания труб. В [8] выполнен комплексный анализ экономических и экологических факторов пастовой закладки с целью сокращения содержания связующего вещества до 1 %.

Цементная закладка — другой технологичный метод закладки отработанных выработок, применяемый в горном деле, позволяющий снизить поверхностную осадку, смещение массива, потери подземных вод и предотвратить катастрофические прорывы воды [9]. Согласно [10], данный метод обеспечивает устойчивость выполнения подземных работ за счет более гибких стратегий выемки рудной массы и используется для решения проблемы переизбытка пустой породы (хвостов обогащения), тогда как вопросы снижения затрат и производственных рисков, связанных с хвостами обогащения и пустой породы, решаются на уровне шахты. Эти преимущества способствуют широкому распространению CRF-системы как метода экологически безопасной добычи полезных ископаемых, обеспечивающего экономичность, экологичность, безопасность и устойчивость горного производства [9].

Цементная закладочная смесь включает в себя пустую породу, связующий материал и воду. Так как около 65 % смеси приходится на пустую породу, необходимо изучать влияние ее частиц на механические свойства закладочного материала [9]. Ввиду различной природы пустых пород и ограниченного контроля за качеством смеси, геомеханическое поведение каждого закладочного материала заслуживает отдельного анализа. Любая шахта или рудник — уникальные сооружения, нуждающиеся в разработке собственной стратегии по закладке и обоснованию требуемых прочностных параметров закладочного материала. Без подобного анализа и тщательного проектирования закладочных работ огромные вложения будут тратиться на создание ненужного запаса прочности [11].

В [12] для разработки безопасного и эффективного сцементированного закладочного обнажения рассматривается сочетание лабораторных испытаний и численного моделирования. Цель такого подхода — численное моделирование взаимодействия частиц сцементированного закладочного материала для анализа устойчивости закладочного обнажения.

Разработаны различные аналитические и эмпирические методы оценки вертикального и горизонтального обнажения цементной закладки. В [12, 13] использовался ряд двумерных аналитических решений для рассмотрения основных режимов разрушения закладки по горизонтали.

До появления численных моделей решения принимались горными инженерами на основе двумерного анализа устойчивости бортов выработок с помощью метода равновесия, а для определения устойчивости закладочного обнажения рассчитывался коэффициент безопасности [14]. Традиционная оценка критических ограничений имела низкую точность и приводила к повышенным затратам на закладочные работы [12]. В настоящее время успешно внедряются методы численного моделирования [15, 16]. Так, численное моделирование закладочного обнажения на руднике Murrays (штат Невада, США) значительно снизило степень цементации закладочного массива [12].

Для моделирования деформирования массивов горных пород используется метод конечных элементов (МКЭ). Консалтинговая группа Itasca с помощью МКЭ разработала программное обеспечение 3DEC с целью моделирования развития смещения частиц пород под воздействием гравитации [12].

На рис. 1 приведена одностадийная 3DEC-модель для определения прочности цементной закладки, требуемой для устойчивости вертикального обнажения [12]. Закладочный материал в ней помещается через слой шириной 2 м для обеспечения характерного распределения внутренних напряжений в закладочном массиве. Это позволяет моделировать вертикальное обнажение путем поочередного удаления блоков, образующих вертикальную границу выработки. В результате получена минимальная прочность закладочного материала (40 кПа), необходимая для обеспечения устойчивости вертикального обнажения.

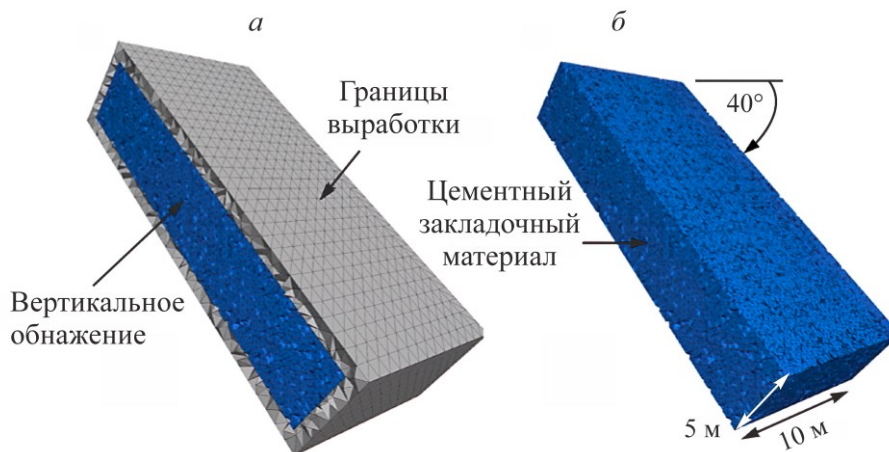


Рис. 1. Модель (а) и геометрические параметры цементной закладки (б)

Цель настоящей работы — разработка технологического процесса закладки отработанных выработок с помощью современных методов горного производства, позволяющих сократить затраты за счет уменьшения человеческого участия, снизить площадь земель на поверхности для хранения пустых пород, обеспечить комплексную устойчивость выработок для безопасности рабочих на шахте или руднике, а также использовать пустую породу, полученную на разных стадиях цикла по добыче и переработке полезных ископаемых. Изучен опыт использования цементной закладки на шахтах Канады (Porcupine, Eleanor) для адаптации их системы закладки к оборудованию, произведенному в Южной Америке.

МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЦЕМЕНТНОЙ ЗАКЛАДКИ

Преимущество CRF-системы — использование пустой породы, являющейся сопутствующим продуктом выемки рудной массы с высоким содержанием ценного элемента, например цинка и свинца. Рассматриваемый рудник имеет избыток пустой породы из-за недостатка территорий на поверхности для ее хранения. По предварительным данным, закладка повлечет за собой ежемесячный расход пустой породы, равный 15 тыс. м³, при низких и средних инвестициях.

Разработана экспериментальная технология подготовки цементной закладочной смеси в условиях цинкового рудника, принадлежащего компании INCIMMET S. A. (Перу), для определения подходящих параметров закладочной смеси и проверки соответствия требуемой прочности. Подготовка смеси для ее последующей закладки в выработку соответствовала производственным требованиям на всех стадиях поэтажной выемки.

Вначале используемые материалы классифицировались по удельной плотности цемента, гранулометрическому составу заполнителей, их объемному весу, влажности, а также удельной и абсолютной плотности. Установлено, что производство 250 м³ закладочной смеси в смену удовлетворит необходимые потребности. Изменение пропорций воды, цемента и пустой породы осуществлялось в соответствии со стандартом Американского института бетона 211.1-19 “Практический стандарт по выбору пропорций для нормального, тяжелонагруженного и монолитного бетона”.

Перед началом подготовки закладки собирались исходные данные, относящиеся к структуре, материалам и статистическим наблюдениям за похожими смесями. Для этого классифицировались переменные величины, требуемые для данного проекта. Закладочная смесь подготавливалась по определенным стандартам.

На заброшенном участке рудника, рядом с выбранной для закладки выработкой, устанавливался комплекс для подготовки цементной пульпы с горизонтальным бункером вместимостью 4 т для хранения пульпы в течение двух производственных смен. Для подачи цемента в смеситель использовалась автоматизированная электрическая шнековая система с транспортной грузоподъемностью 4 т, минимальным радиусом поворота 40°, двигателем мощностью 126 – 130 л. с. и высотой подачи не более 3 м.

После внедрения разработанной технологии подготовка цементной пульпы осуществлялась через циклы смешивания (партиями) с учетом параметров влажности и абсорбции заполнителей для соблюдения пропорций в каждом цикле замешивания. После замешивания цементная пульпа транспортировалась по трубам к камере рядом с выработкой, где послойно располагалась пустая порода высотой ~1.5 м. Далее цементная пульпа разбрызгивалась на породу и с помощью погрузочно-доставочной машины пустая порода перемешивалась с цементной пульпой до равномерного состояния за два цикла. Так получалась закладочная смесь, из которой брались образцы и доставлялись в лабораторию для анализа перед укладкой в выработку.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Геотехнические характеристики закладочного материала включают его физические и химические свойства, а также сопротивляемость на сжатие и распределение частиц по размеру. Анализ пустой породы показал, что ее удельная плотность составляет 4.26 т/м³, при этом содержание твердых веществ в составе закладки — 85 % от общего состава.

Согласно предыдущим исследованиям, 47 % от совокупной массы частиц приходится на частицы размером < 75 мкм. Тем не менее распределение частиц породы по гранулометрическому составу неоднородно. Выделяются следующие диапазоны распределения частиц по раз-

меру: ~75 % частиц менее чем 150 мкм; ~25 % частиц менее чем 30 мкм; ~15 % частиц менее чем 17 мкм. Данную пустую породу нельзя назвать мелкой, однако мелкие частицы составляют 25 % от ее общей массы, делая ее более непроницаемой. В ходе оценки прочности цементированного закладочного материала на сжатие установлено, что спустя определенный период выдержки прочность достигает пикового значения 0.7–1.6 МПа с усадкой 25.0–26.5 см при доле портландцемента в смеси 3.5 %.

Из каждого слоя закладки в выработке взято по 20 образцов (рис. 2). Окончательная пастовая закладка имела высоту 30 м. Процесс занял 10 сут при скорости закладки 1500 м³/сут. Из накопительной емкости рядом со смесительной установкой ежедневно в течение месяца с помощью весов плотности (компания Магсу, США) измерялась плотность закладки. Она составила 2.20–2.90 г/см³, что обеспечивало необходимую текучесть и пластичность, а также достижение прочности 0.80 МПа. Каждый образец подписывался и помещался в лабораторию, находящуюся внутри шахты, для последующего хранения. Потребовалось 40 сут для дренирования излишка воды через специальные заглушки, расположенные в нижней части закладки, и затвердевания закладки. После завершения данного процесса началась добыча руды из соседнего забоя.

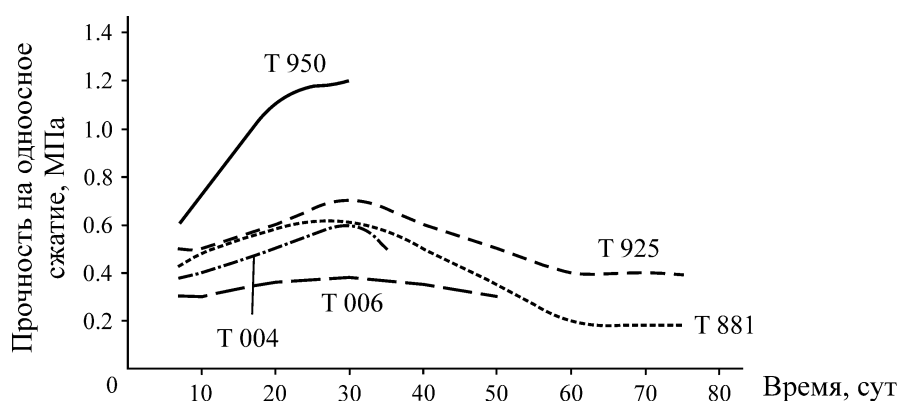


Рис. 2. Изменение прочности на сжатие из слоев закладки T 004, T 006, T 881, T 950, T 925

Анализ данных из лаборатории по испытаниям закладки на простое сжатие показал неравномерное распределение уровней сопротивляемости. В первые 7 сут выдержки она изменялась от 0.5 до 0.9 МПа, в последующие 7 сут выросла с 0.9 до 1.6 МПа. Увеличение сопротивляемости закладки на сжатие повышалось на протяжении 28 сут, после чего постепенно уменьшалось (рис. 2). Это вызвано химическими реакциями, протекающими ввиду наличия сульфатов в использованной воде, в которой содержались концентрации CaSO_4 , соли бария (BaCl_2), свинца (PbNO_3), алюминия и кальция с постоянным стехиометрическим соотношением и $\text{pH} > 10.5$. В результате сульфат вступил в реакцию с гидроксидом кальция, высвобожденным во время гидратации цемента, образуя сульфат кальция (гипс), который вступил в реакцию с гидрированным алюминатом кальция и образовался гидросульфалюминат кальция (эттрингит) [17]. Вероятно, высокая начальная сопротивляемость обусловлена наличием сульфидов, тогда как последующее ее уменьшение произошло вследствие снижения прочности закладки из-за реакции цемента с сульфатами.

Для расчета состава закладочной цементной смеси применялся практический стандарт выбора пропорций для нормального, тяжелонагруженного и монолитного бетона (таблица).

Варианты состава цементной закладочной смеси

Материал	Вариант			
	1	2	3	4
Цемент, кг/м ³	75	90	103	138
Вода, л/м ³	60	72	82	110
Пустая порода, кг/м ³	2812	2760	2717	2843
Плотность, кг/м ³	2940	2922	2902	2843
Пропорция вода : цемент	0.800	0.800	0.800	0.800

В ходе испытания измерялась удельная плотность заполнителя и цемента, абсорбция воды заполнителем, определялся гранулометрический состав заполнителя, его объемный вес и содержание влаги. Несмотря на то, что сопротивляемость идеальной закладочной смеси должна превышать текущее значение 0.8 МПа, такие показатели сложно получить из-за значительной неравномерности размера частиц пустой породы, образованной в результате взрывных работ. Поэтому выбрана цементная закладочная смесь, обладающая в 2 раза бóльшим сопротивлением, чтобы гарантировать отсутствие смешивания закладочного материала с рудой, из которой может вымываться цинк (рис. 3).

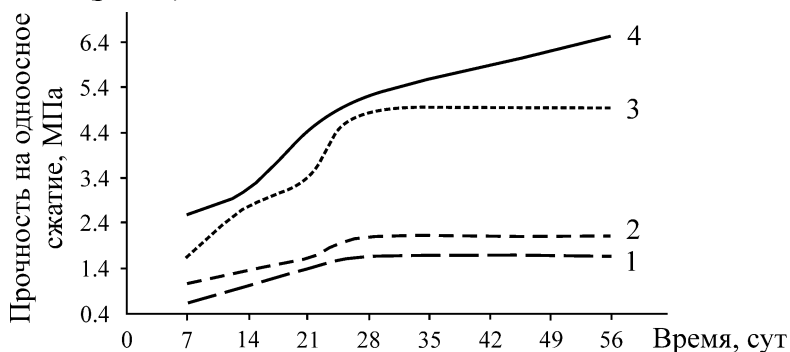


Рис. 3. Изменение сопротивляемости цементных закладочных смесей с разным количеством цемента со временем: 1–4 — варианты из таблицы

Для гарантии соответствия цементной закладочной смеси требуемым характеристикам и необходимой прочности, рассчитывалась средняя прочность полученного бетона на сжатие. Перед добавлением цементной пульпы в пустую породу необходимо знать начальные данные о структуре, составе и статистических наблюдениях за аналогичными смесями. Основные переменные величины могут быть классифицированы. Заполнители должны соответствовать стандарту NTP 400.012, цемент — NTP 334.090, вода — D.S. 031-2010-SA, добавки — NTP 209.038.

Ниже приведены параметры цементной закладочной смеси при доле цемента 3 %:

<i>Смесь</i>	
Удельная сопротивляемость, кг/см ²	20.00
Пропорция вода : цемент	0.80
Требуемая консистенция, см	0
Содержание удержанного воздуха, %	1.00
<i>Заполнитель</i>	
Максимальный размер частиц, см	7.50
Максимальный номинальный размер частиц, см	5.00
Модуль крупности частиц	8.40
Удельный вес рыхлой и компактной породы с естественной влажностью, кг/м ²	1.79 / 1.91
Удельная масса заполнителя, кг/м ²	3.01
Естественная и абсорбированная влажность, %	3.10 / 0.60

Добавки

Удельный вес цемента (портландцемент, тип 1), кг/м ³	3110
Принятая плотность воды, кг/м ³	1000
<i>Расчет смеси в абсолютном объемном выражении</i>	
Цемент, кг/м ³	90
Вода, л/м ³	72
Заполнитель, кг/м ³	2678
Воздух, %	1

Для заполнения одной выработки требуется 12–22 тыс. м³ закладочной смеси в зависимости от последовательности разработки, выемки и размера очистной области на каждом этаже. Для выполнения такого объема работы нужно оценить параметры автоматизированного механического оборудования с суточной производительностью 500 м³, достаточной для закладки одной выработки в течение месяца, затем появится возможность для постройки закладочного комплекса и использования оборудования для одновременной закладки нескольких выработок. На рис. 4 представлено оборудование, требуемое для производства и транспортировки закладочной смеси из цемента, пустой породы и воды.

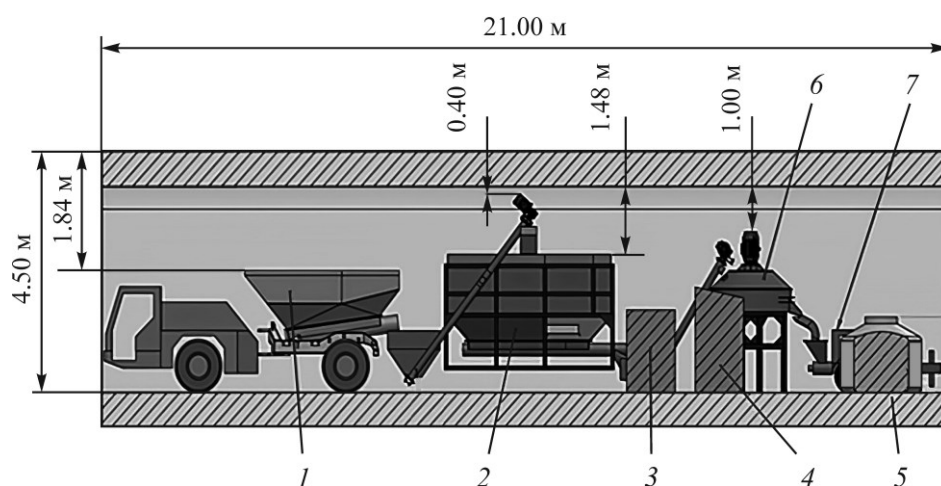


Рис. 4. Схема мобильного смесительного комплекса: 1 — цементовоз; 2 — горизонтальная смесительная установка; 3 — электрическая панель; 4 — кабина управления; 5 — резервуар с водой; 6 — планетарный смеситель; 7 — насос

Минимальные требования выполнения цикла закладочных работ включают подготовку выработки к закладке, а также наличие камеры для смешивания закладочной смеси, камеры для смешивания цементной пульпы, области для хранения пустой породы и мобильного смесительного комплекса.

Закладочные камеры размером 5 × 4 м должны располагаться не более чем в 40 м от камеры смешивания и удовлетворять следующим условиям. Камера смешивания должна иметь отрицательный уклон (–1 ÷ –2 %, это помогает равномерно замешивать материал без потери пульпы на стороне камеры, где происходит закладка), освещение, вентиляцию и разбрызгиватели цементной пульпы в закладочную смесь. Важно соблюдать меры безопасности, включающие возведение дамбы и навеса для защиты оператора удаленного управления фронтальным погрузчиком Scooptram.

На рассматриваемом руднике применялась пастовая и сухая закладки в зависимости от последовательности добычи, а также от разрабатываемого этажа. Перед началом работы рассчитывалось нужное количество пустой породы для цементной закладки. Принято, что суточная потребность в пустой породе для цементной закладки составляет 500 м^3 (рис. 5).

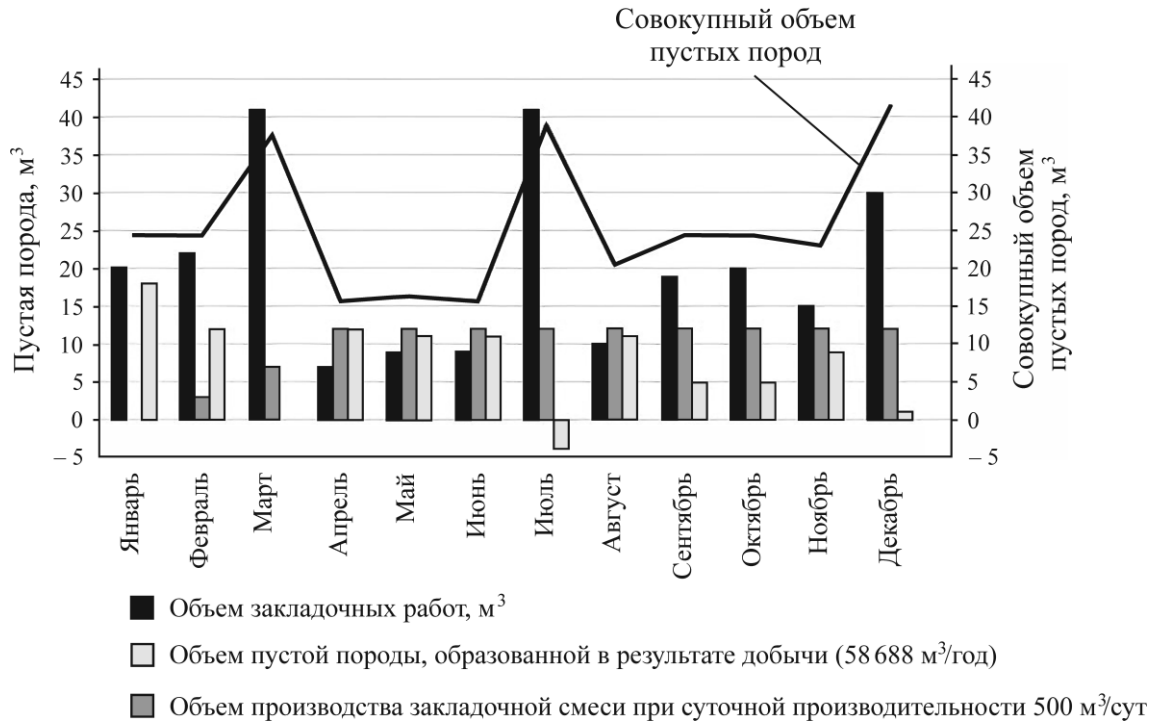


Рис. 5. Гистограмма потребления пустой породы (2018 г.)

Анализ производительности фронтальных погрузчиков Scooptram с ковшами разного объема в качестве основополагающего оборудования в процессе закладки показал, что проектную скорость выполнения работ можно достичь. При транспортировке материала на значительные расстояния наибольшей производительностью обладают погрузчики с большими ковшами, т. е. выбор ковша зависит от планировки камеры. Камера смешивания не должна находиться более чем в 120 м для оптимального времени транспортировочного цикла. Для выполнения суточной нормы закладки (500 м^3) погрузчики должны быстро укладывать закладочную смесь, рекомендуемый объем ковша 6.8 м^3 (рис. 6).

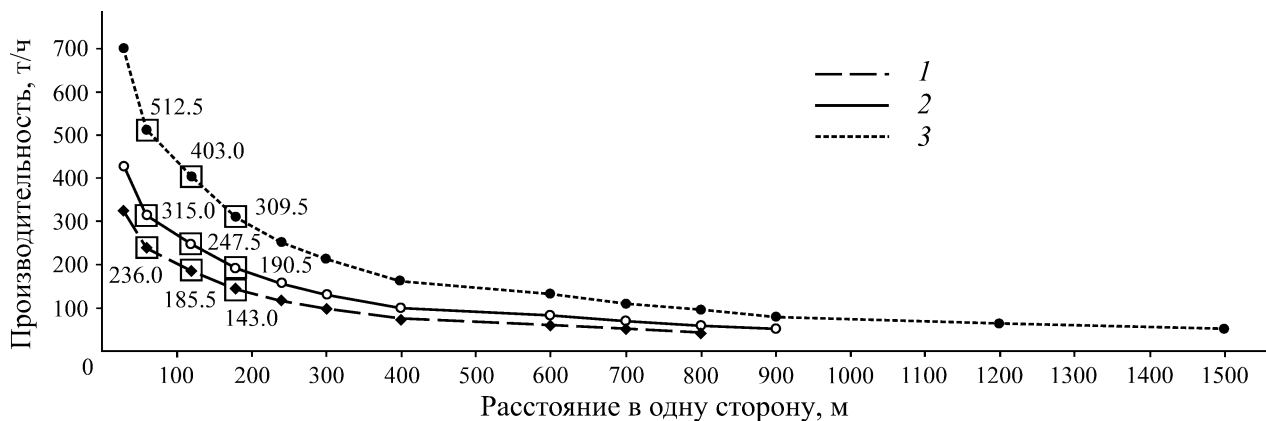


Рис. 6. Производительность фронтального погрузчика Scooptram с ковшами объемом 4.6 (1), 6.1 (2) и 9.9 м^3 (3)

Технологическая последовательность закладочных работ:

- накопление пустой породы в соответствующей камере;
- транспортировка пустой породы фронтальным погрузчиком Scooptram с ковшем объемом 4.6 м^3 из камеры накопления в камеру смешивания;
- подача цементной пульпы через трубы диаметром 10.2 см (такой размер позволяет прокачивать цементную пульпу без перепадов давления);
- разбрызгивание цементной пульпы на пустую породу через четыре выпускных отверстия диаметром 5 см, расположенных на расстоянии 8 м по длине камеры;
- перемешивание закладочной смеси фронтальным погрузчиком в два цикла;
- транспортировка цементной закладочной смеси фронтальным погрузчиком в выработку (рис. 7);
- окончательная закладка выработки за счет потока смеси по уклону выработки до достижения соответствующей высоты.



Рис. 7. Перемешивание и транспортировка цементной закладочной смеси

Система цементной закладки погашенных выработок основана на лабораторных и инженерных испытаниях, цель которых обеспечить безопасность и эффективность выполнения работ, исключающих загрязнение массива тяжелыми металлами (их вымывание из пустой породы). Доля цемента в закладочной смеси определяется на основе результатов лабораторных испытаний. Несмотря на изменяющееся значение прочности, пониженная доля цемента в закладочной смеси по-прежнему обеспечивает требуемую безопасность. Отметим, что в случае с пастовой закладкой зафиксировано снижение потребления воды на 33 % и цемента на 0.5 %, что привело к сокращению затрат, уменьшению разубоживания рудного материала и повышению доли извлечения полезных элементов.

На руднике Cerro Lindo запланировано проектирование закладочных работ, включающее взаимодействие всех участников процесса: автоматизацию технологических операций; использование высокотехнологического оборудования и моделей устойчивости обнажений. Эксплуатационные преимущества данной технологии связаны с выполнением закладочных работ с ограниченным привлечением оборудования и человеческих ресурсов.

ВЫВОДЫ

Внедрение технологии цементной закладки не требует значительных инвестиционных затрат. Она позволяет снизить использование территорий на поверхности в качестве отвалов, что является важной составляющей в совокупности затрат на руднике Cerro Lindo и иных горнодобывающих предприятиях ввиду выполнения многочисленных экологических требований. Цементная закладка отработанных выработок позволяет сэкономить затраты на внутреннее землепользование, а также на транспортировку (386 тыс. т пустой породы).

Подготовка и укладка цементной закладочной смеси при подэтажной выемке имеет себестоимость на 20 % меньше по сравнению с пастовой закладкой. Эта экономия отражается в меньших затратах на укладку 1 м³ закладочной смеси за счет исключения использования насосных мощностей, электричества, необходимости прокладки протяженных труб и других требований, необходимых для применения пастовой закладки. Внедрение такой системы позволит извлекать рудную массу в большем объеме благодаря устойчивости стенок выработок в ходе работ по добыче (1.6 МПа), а также снизить загрязнение чистой породы тяжелыми элементами. По оценкам, объем извлекаемой рудной массы на одну выработку вырастет на 3 %.

Данная технология обеспечивает высокую безопасность, так как горные рабочие не присутствуют при выполнении работ, а управление оборудованием осуществляется с помощью программируемого логического контроллера, включенного в процесс подготовки цементной пульпы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Qi C. and Fourie A.** Cemented paste backfill for mineral waste rock management: Review and future perspectives, *Miner. Eng.*, 2019, Vol. 144. — 106025.
2. **Dudeney A. W. L., Chan B. K. C., Bouzalakos S., and Huisman J. L.** Management of waste and wastewater from mineral industry processes, especially leaching of sulphide resources: State of the art, *Int. J. Miner., Reclam. Environ.*, 2013, Vol. 27. — P. 2–37.
3. **Sun W., Wang H., and Hou K.** Control of waste rock-tailings paste backfill for active mining subsidence areas, *J. Clean. Prod.*, 2018, Vol. 171. — P. 567–579.
4. **Singh P., Ghosh C. N., Behera S. K., Mishra K., Kumar D., Buragohain J., and Mandal P. K.** Optimisation of binder alternative for cemented paste fill in underground metal mines, *Arab. J. Geosci.*, 2019, Vol. 12. — 462 p.
5. **Raffaldi M. J., Seymour J. B., Richardson J., Zahl E., and Board M.** Cemented paste backfill geomechanics at a narrow-vein underhand cut-and-fill mine, *Rock Mech. Rock Eng.*, 2019, Vol. 52. — P. 4925–4940. DOI:10.1007/s00603-019-01850-4.
6. **Karim R., Simangunsong G. M., Sulistianto B., and Lopulalan A.** Stability analysis of paste fill as stope wall using analytical method and numerical modeling in the kencana underground gold mining with long hole stope method, *Procedia Earth Planet Sci.*, 2013, Vol. 6. — P. 474–484.
7. **Guo J. Xing, Ding K., and Jian Y.** Study on compaction characteristics of paste backfilling and its application, *Geotech. Geoleng.*, 2019, Vol. 37. — P. 1185–1194.
8. **Sivakugan N., Veenstra R., and Naguleswaran N.** Underground mine backfilling in Australia using paste fills and hydraulic Fills, *Int. J. Geosynth. Gr. Eng.*, 2015, Vol. 1. — P. 1–7.

9. **Wu J., Feng M., Mao X., Xu J., Zhang W., Ni X., Ni X., and Han G.** Particle size distribution of aggregate effects on mechanical and structural properties of cemented rockfill: Experiments and modeling, *Constr. Build. Mater.*, 2018, Vol. 193. — P. 295–311.
10. **Cabrera Laura J.** Aspectos geotecnicos del relave cementado en la aplicacion del método minado sublevelstopping, *SRK Consult.*, 2017.
11. **Stone D.** Factors that affect cemented rockfill quality in Nevada mines, *The 9th Int. Symp. Min. Backfill*. Montreal, Canada, 2007. — P. 1–6.
12. **Sainsbury D. and Sainsbury B.** Design and implementation of cemented rockfill at the Ballarat Gold Project, *Mine Fill 2014 Proc. 11th Int. Symp. Min. Backfill*, 2014. — P. 1–12.
13. **Mitchell R. J., Olsen R. S., and Smith J. D.** Model studies on cemented waste rock used in mine backfill, *Can. Geotech. J.*, 1982, Vol. 19. — P. 14–28.
14. **Belem T. and Benzaazoua M.** Design and application of underground mine paste backfill technology, *Geotech. Geol. Eng.*, 2008, Vol. 26. — P. 147–174.
15. **Doerner C. A. C.** Effect of delayed backfill on open stope mining methods, 2005. — 76 p.
16. **Swan G. and Brummer R.** Backfill design for deep, underhand drift-and-fill mining, *MINEFILL 2001 Proc. Seventh. Int. Symp. Min. with Backfill*, Seattle, Washington, 2001. — P. 359–368.
17. **Cadorin L., Carissimi E., and Rubio J.** Avances en el tratamiento de aguas acidas de minas, *Av. en el Trat. aguas acidas minas.*, Universidad Tecnologica de Pereira, 2007. — P. 849–854.

Поступила в редакцию 19/II 2021

После доработки 09/VII 2022

Принята к публикации 30/VI 2023