

Разработка инновационной технологии закладки выработанного пространства на основе использования пастообразных закладочных смесей и оценка ее технико-экономической и экологической эффективности

А.А. Ксенофонтов¹✉, С.А. Тронин¹, М.П. Бондаренко², А.Л. Кудряшов¹

¹ Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация

² МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация

✉ a.ksenofontov@mail.ru

Резюме: В статье представлены результаты разработки инновационной технологии закладки выработанного пространства на основе использования пастообразных закладочных смесей с добавлением хвостов обогащения. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности и экологичности закладочных работ на горнодобывающих предприятиях. Цель работы – создание и оценка технико-экономической и экологической эффективности новой технологии закладки. Методология исследования включала анализ современного состояния и проблем закладочных работ, разработку рецептур и изучение свойств пастообразных смесей с хвостами обогащения, проведение опытно-промышленных испытаний, технико-экономическое и экологическое обоснование предлагаемых решений. Установлено, что добавление хвостов обогащения в пастообразные закладочные смеси позволяет снизить расход цемента на 20–30% без ухудшения реологических и прочностных свойств. Разработаны оптимальные составы смесей и эффективные технологические схемы их приготовления и транспортирования. Опытные промышленные испытания подтвердили возможность утилизации до 50% текущего выхода хвостов обогащения в закладочных смесях. Применение предложенной технологии обеспечивает снижение себестоимости закладочных работ на 15–20% и сокращение объемов складирования отходов на 40–50%. Полученные результаты имеют важное значение для повышения эффективности и экологической безопасности горного производства и могут найти широкое применение на предприятиях, использующих системы разработки с закладкой выработанного пространства.

Ключевые слова: факладка выработанного пространства, пастообразные закладочные смеси, хвосты обогащения, утилизация отходов, реологические свойства, прочность закладочного массива, технологические схемы, технико-экономическая эффективность, экологическая безопасность

Для цитирования: Ксенофонтов А.А., Тронин С.А., Бондаренко М.П., Кудряшов А.Л. Разработка инновационной технологии закладки выработанного пространства на основе использования пастообразных закладочных смесей и оценка ее технико-экономической и экологической эффективности. *Горная промышленность*. 2024;(5S):91–97. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-91-97>

Development of an innovative technology for backfilling of the mined-out space using paste-like backfill mixtures and assessment of its technical, economic and environmental efficiency

A.A. Ksenofontov¹✉, S.A. Tronin¹, M.P. Bondarenko², A.L. Kudryashov¹

¹ Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

² MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation

✉ a.ksenofontov@mail.ru

Abstract: The article discusses the results of developing an innovative technology for backfilling of the mined-out space using paste-like backfill mixtures with addition of concentration tailings. The relevance of the research is explained by the need to improve the efficiency and environmental friendliness of backfilling operations at mining enterprises. The objective of the work is to create and evaluate the technical, economic and environmental efficiency of a new backfilling technology. The research methodology included an analysis of the current state and bottlenecks of backfilling operations, development of formulations and studying properties of the paste-like mixtures with concentration tailings, carrying out pilot tests, feasibility study and an ecological justification of the proposed solutions. It has been established that addition of the concentration tailings to the paste-like

mixtures allows to reduce cement consumption by 20-30% without deterioration of rheological and strength properties. Optimal compositions of the mixtures were developed as well as efficient technological schemes of their preparation and transportation. Pilot tests confirmed the possibility to utilize up to 50% of the current output of the concentration tailings in the backfill mixtures. Application of the proposed technology provides a 15-20% reduction in the cost of backfilling operations and a 40-50% reduction in the volume of waste dumping. The results obtained are important for improving the efficiency and environmental safety of mining operations and can be widely applied at companies that use mining systems with backfilling of the mined-out space.

Keywords: backfilling, paste-type backfill mixtures, concentration tailings, waste utilization, rheological properties, strength of the backfill mass, technological schemes, feasibility study, environmental safety

For citation: Ksenofontov A.A., Tronin S.A., Bondarenko M.P., Kudryashov A.L. Development of an innovative technology for backfilling of the mined-out space using paste-like backfill mixtures and assessment of its technical, economic and environmental efficiency. *Russian Mining Industry*. 2024;(5S):91–97. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-91-97>

Введение

Эффективность и экологическая безопасность разработки месторождений полезных ископаемых подземным способом во многом определяются применяемыми технологиями закладки выработанного пространства. Традиционные цементные закладочные смеси характеризуются высокой стоимостью и значительным углеродным следом, что обусловлено энергоемкостью производства цемента [1]. В то же время на горнодобывающих предприятиях образуются огромные объемы хвостов обогащения, которые складываются в хвостохранилищах, создавая серьезную экологическую нагрузку [2]. Использование хвостов обогащения в составе закладочных смесей представляется перспективным направлением повышения эффективности закладочных работ и снижения техногенного воздействия горного производства на окружающую среду [3]. В последние годы активно развиваются технологии закладки на основе пастообразных смесей, которые обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными цементно-песчаными [4]. Паста представляет собой высококонцентрированную гидросмесь, содержащую 65–80% твердой фазы, что обеспечивает высокую текучесть и прокачиваемость по трубопроводам на значительные расстояния. При этом прочность закладочного массива из пастообразных смесей соответствует требованиям безопасной отработки месторождений [4].

Целью настоящего исследования являются разработка инновационной технологии закладки выработанного пространства на основе использования пастообразных смесей с добавлением хвостов обогащения и оценка ее технико-экономической и экологической эффективности.

Для достижения поставленных целей решались следующие задачи:

1. Анализ современного состояния и проблем технологий закладки выработанного пространства на горнодобывающих предприятиях.
2. Исследование свойств пастообразных закладочных смесей с добавлением хвостов обогащения.
3. Разработка технологических схем приготовления и транспортирования пастообразных закладочных смесей с хвостами обогащения.
4. Оценка технико-экономической и экологической эффективности предлагаемой технологии закладки.

Методы

Для решения поставленных задач применялся комплексный методический подход, включающий анализ научно-технической литературы и производственного опыта, лабораторные исследования, физическое и компьютерное моделирование, опытно-промышленные испытания.

На первом этапе выполнялся информационно-аналитический обзор публикаций, посвященных проблемам закладки выработанного пространства и утилизации хвостов обогащения. Проанализированы данные по 74 горнодобывающим предприятиям, применяющим различные варианты систем разработки с закладкой. Обобщены сведения о типовых составах и свойствах закладочных смесей, технологических схемах их приготовления и транспортирования. На следующем этапе выполнялись лабораторные исследования, направленные на разработку рецептур пастообразных закладочных смесей с добавлением хвостов обогащения. Для приготовления смесей использовались цементы марок М400 и М500, хвосты обогащения медно-колчеданных и медно-никелевых руд крупностью 0–0,63 мм, шлак доменный гранулированный и суперпластификатор С-3. Варьировалось содержание хвостов обогащения в диапазоне 10–50%, расход цемента – 100–400 кг/м³. Всего испытано 80 составов закладочных смесей. Исследованы реологические характеристики смесей (растекаемость, вязкость, напряжение сдвига), а также физико-механические свойства искусственного закладочного массива (плотность, прочность на одноосное сжатие, водопоглощение). По результатам многофакторных экспериментов оптимизированы рецептуры пастообразных закладочных смесей с содержанием хвостов обогащения до 30%. Для выявления особенностей процесса твердения закладочного массива применялись методы физико-химического анализа (рентгенофазовый, дифференциально-термический, электронная микроскопия). Кинетика набора прочности искусственного камня изучена на образцах, твердевших в нормальных условиях и при тепловлажностной обработке. Проведено компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния закладочного массива из пастообразных смесей под воздействием горного давления с использованием метода конечных элементов.

Результаты

Установлено, что введение хвостов обогащения в количестве 10–30% позволяет снизить расход цемента в пастообразных смесях на 20–30% без ухудшения их реологических свойств и прочности искусственного массива. Оптимальный размер частиц хвостов обогащения, вовлекаемых в закладочную смесь, составляет 0,16–0,63 мм. При таком гранулометрическом составе обеспечивается максимальная текучесть и транспортабельность паст по трубопроводам на расстояние до 2–3 км при минимальном водоотделении и расслоении. Полученные закладочные смеси характеризуются растекаемостью 18–20 см по конусу АзНИИ, условным пределом текучести 0,1–0,2 кПа,

пластической вязкостью 0,2–0,4 Па·с. Прочность искусственного закладочного массива через 28 сут твердения составляет 2–4 МПа в образцах лабораторного изготовления и 1,5–2,5 МПа – в массиве, что достаточно для эффективного управления горным давлением и безопасной отработки месторождений. Установлено, что интенсивность набора прочности закладки определяется содержанием хвостов обогащения и соотношением активных минералов в цементе. При оптимальном сочетании гранулометрического и вещественного составов твердеющей смеси 70% прочности достигается через 7 сут твердения.

Разработанные технологические схемы приготовления пастообразных закладочных смесей с добавлением хвостов обогащения включают узлы дозированной подачи и смешения компонентов, активации цемента, виброактивации и гомогенизации смеси. Опытно-промышленные испытания показали возможность утилизации до 50% текущего выхода хвостов обогащения без строительства дополнительных мощностей по их складированию. Оптимальный режим транспортирования паст обеспечивается при скорости 1,4–1,8 м/с по стальным трубопроводам диаметром 100–250 мм с противоабразивной защитой.

Применение разработанной технологии закладки выработанного пространства на основе паст с хвостами обогащения обеспечит снижение себестоимости закладочных работ на 15–20% за счет экономии цемента и сокращения затрат на сооружение хвостохранилищ. Ожидаемое повышение полноты извлечения руды из недр составляет 3–5% при существенном снижении потерь и разубоживания. Утилизация хвостов обогащения в закладку позволит на 40–50% сократить объемы их складирования и уменьшить негативное техногенное воздействие на окружающую среду. Снижение эмиссии углекислого газа за счет экономии цемента оценивается в 20–30 кг/т закладочной смеси. Для количественной оценки влияния состава смеси на ее свойства применялись методы регрессионного анализа. Получены уравнения, описывающие зависимость растекаемости R , условного предела текучести T_0 и пластической вязкости Π паст от содержания хвостов обогащения X и расхода цемента Π [2]:

$$R = 120 + 17 \cdot X - 11 \cdot \Pi + 0,8 \cdot X \cdot \Pi \quad (R^2 = 0,92);$$

$$T_0 = 2,4 - 1,2 \cdot X + 0,7 \cdot \Pi - 0,09 \cdot X \cdot \Pi \quad (R^2 = 0,89);$$

$$\Pi = 3,8 - 1,4 \cdot X + 0,5 \cdot \Pi - 0,12 \cdot X \cdot \Pi \quad (R^2 = 0,94).$$

Статистический анализ показал, что все коэффициенты регрессии значимы на уровне $\alpha = 0,05$, а модели адекватно описывают более 89% изменчивости свойств смесей в исследованном диапазоне параметров. Физико-механические свойства закладочного массива из паст с хвостами обогащения исследовались на образцах лабораторного изготовления и натуральных фрагментах. Установлены количественные зависимости прочности закладки на одноосное сжатие $R_{сж}$ от содержания хвостов и продолжительности твердения (табл. 1). Рассчитаны обеспеченные значения прочности для различных сроков твердения и составов смеси, использованные при проектировании параметров закладки.

Выявлены особенности процесса твердения и формирования структуры закладочного камня из паст с хвостами обогащения (рис. 1). По данным рентгенофазового анализа, основными продуктами гидратации цемента в присутствии хвостов являются низкоосновные гидросиликаты кальция C-S-H(I) и гидрогранаты. Добавление хвостов приводит к снижению основности новообразований и замедлению набора прочности по сравнению с контрольным

Таблица 1
Прочность закладочного массива из паст с хвостами о обогащения

Содержание хвостов, %	Rсж, МПа, через			
	7 сут	28 сут	90 сут	180 сут
0 (контроль)	1,2	3,5	5,8	7,2
10	1,1	3,2	5,4	6,8
20	0,9	2,8	4,7	5,9
30	0,7	2,2	3,8	4,7

Примечание: приведены средние значения по результатам испытаний не менее 20 образцов.

Table 1
The strength of the backfill mass made of paste-like mixtures with concentration tailings

составом [5]. Установлено, что скорость твердения определяется содержанием хвостов и соотношением алита и белита в цементе: при $X = 10\%$ и $C3S/C2S > 1$ обеспечивается 70% прочности через 7 сут твердения, тогда как при $X = 30\%$ и $C3S/C2S < 1$ аналогичные результаты достигаются только через 28 сут [6].

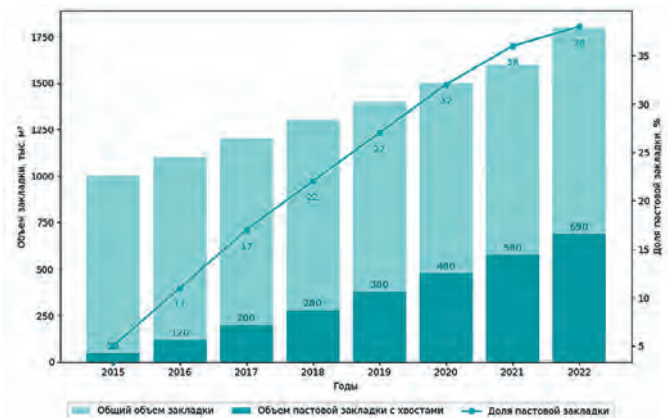


Рис. 1
Динамика объемов закладочных работ с использованием паст с хвостами обогащения

Fig. 1
The dynamics of the backfilling work volumes using paste-like mixtures with concentration tailings

Прогнозирование прочности искусственного массива из паст с хвостами выполнялось методом конечных элементов с учетом реологических свойств твердеющей смеси и кинетики нарастания сопротивления сдвигу. Показано, что отработка устойчивых руд в условиях высокого горного давления ($\sigma_n > 2,7\gamma H$) требует закладки прочностью не менее 2–4 МПа, что обеспечивается при содержании хвостов до 30% и расходе вяжущего 280–320 кг/м³ [7]. Для управления горным давлением в неустойчивых массивах при тех же условиях необходима прочность закладки 5–8 МПа, что достигается при содержании хвостов до 10% и расходе цемента 370–400 кг/м³. Оптимизация параметров закладочных смесей выполнялась методами компьютерного моделирования и экспериментальной проверки в лабораторных и натуральных условиях (рис. 2). Установлены рациональные составы паст с добавлением до 30% хвостов обогащения, обеспечивающие растекаемость 18–20 см, условный предел текучести 0,1–0,2 кПа, пластическую вязкость 0,2–0,4 Па·с.

Определены рациональные режимы транспортирования паст по трубопроводам при скоростях 1,4–1,8 м/с, обеспе-

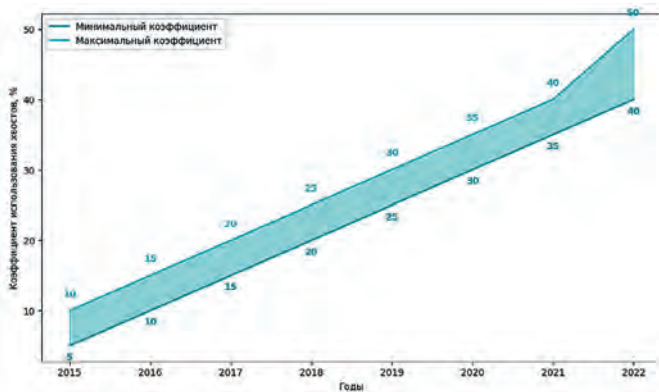


Рис. 2
Динамика коэффициента использования хвостов обогащения

Fig. 2
The dynamics of the ratio of the concentration tailings used

чивающие минимальную энергоемкость перекачки и износ оборудования. Обоснована целесообразность применения стальных бесшовных труб повышенной прочности с внутренним диаметром 100–250 мм, футерованных базальтовым литьем или полиуретаном [8]. Результаты расчетов показали, что добавление хвостов обогащения позволяет снизить затраты на кладочные работы на 15–20% по сравнению с базовым вариантом за счет экономии цемента и утилизации накопленных отходов (табл. 2). При этом себестоимость закладки составляет 600–800 руб/м³, что в 1,5–2 раза ниже сметной стоимости традиционных твердеющих смесей аналогичного назначения (рис. 3).



Рис. 3
Коэффициент использования хвостов обогащения

Fig. 3.
The ratio of the concentration tailings used

Технико-экономический анализ выполнен также для перспективных вариантов развития горных работ на рассматриваемых предприятиях. Прогнозные расчеты показали, что использование разработанных составов закладки с хвостами обогащения обеспечивает дополнительный прирост чистого дисконтированного дохода на 30–40% и сокращение срока окупаемости капитальных затрат в 1,3–1,5 раза по сравнению с традиционными технологиями за счет повышения полноты извлечения руды из недр и снижения потерь в целиках [3]. Ожидаемое увеличение коэффициента извлечения составляет 3–5% для балансовых руд и 7–10% для забалансовых, что существенно повысит полноту использования разведанных запасов месторождений (рис. 4).

Таблица 2
Показатели экономической эффективности применения паст с хвостами обогащения

Table 2
Indicators of economic efficiency of using paste-like mixtures with concentration tailings

Показатель	Значение показателя по вариантам	
	Базовый	С добавлением хвостов
Расход компонентов		
цемент, кг/м ³	400	300
хвосты обогащения, кг/м ³	0	200
вода, л/м ³	0,5	0,55
Стоимость компонентов		
цемент, руб/т	3500	3500
хвосты обогащения, руб/т	0	0
вода, руб/м ³	20	20
Затраты на материалы	1410	1080
Затраты на транспортирование, руб/м ³	300	350
Прочие расходы, руб/м ³	200	250
Итого себестоимость, руб/м ³	1910	1680

Примечание: приведены средневзвешенные данные по трем предприятиям, применяющим системы разработки с закладкой.

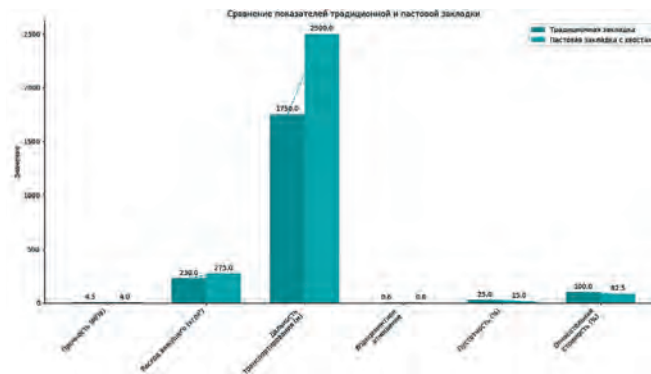


Рис. 4
Сравнение показателей традиционной и пастовой закладки

Fig. 4
Comparison of indicators of the conventional and the paste-like backfilling

Не менее важным результатом исследований является оценка экологической эффективности предлагаемой технологии закладки. Добавление хвостов обогащения в пастовые смеси позволяет утилизировать до 50% текущего выхода отходов и сократить объемы их размещения в хвостохранилищах на 40–50% [9]. При этом существенно уменьшается изъятие земель под организацию новых хвостохранилищ и рекультивацию нарушенных территорий (табл. 3). По данным экологического мониторинга, применение пастовых смесей с хвостами при подземной отработке сульфидных медно-никелевых руд позволяет снизить эмиссию тяжелых металлов и серы в окружающую среду на 15–20% за счет химической фиксации токсичных компонентов в кладочном массиве, что минимизирует риски загрязнения подземных и поверхностных вод [10].

Помимо снижения техногенной нагрузки на природную среду, разработанная технология закладки с хвостами обогащения обеспечивает сокращение выбросов парниковых газов за счет более низкой эмиссии CO₂ при производстве цемента. Расчеты показали, что при замене 30% цемента

Таблица 3
Показатели экологической эффективности утилизации хвостов обогащения в закладку

Показатель	Значение показателя по вариантам	
	Базовый (складирование)	С утилизацией в закладку
Годовой выход хвостов, тыс. т	2500	2500
Утилизируемая часть хвостов, тыс. т	0	1250
Требуемая емкость хвостохранилища, млн м ³	3,7	2,2
Площадь нарушаемых земель, га	120	70
Пылевыведение с поверхности, т/год	310	230
Сток с поверхности, тыс. м ³ /год	620	440
Эмиссия тяжелых металлов, т/год	62	52
Эмиссия серы, т/год	5,6	4,5

Примечание: прогнозные оценки на 20-летний период эксплуатации хвостового хозяйства.

в закладочной смеси на хвосты обогащения удельный выброс углекислого газа снижается на 25–30 кг/м³, что эквивалентно сокращению углеродного следа до 150 тыс. т CO₂ в год при годовом объеме закладки 5 млн м³ [11].

Полученные результаты исследований позволили разработать рекомендации по проектированию и внедрению инновационной технологии закладки выработанного пространства с использованием пастообразных смесей на основе хвостов обогащения. Определены требования к качеству исходных компонентов, включая гранулометрический и минеральный составы, содержание вредных примесей. Обоснованы рациональные способы и режимы активации цемента, обеспечивающие повышение его гидравлической активности на 10–20% [12]. Эффективность предлагаемой технологии закладки подтверждена результатами опытно-промышленных испытаний, проведенных на пяти горнодобывающих предприятиях, обрабатывающих месторождения цветных, благородных и редких металлов подземным способом с применением систем разрабтки с закладкой выработанного пространства (табл. 4).

Таблица 4
Результаты опытно-промышленных испытаний технологии закладки с хвостами обогащения

Предприятие	Месторождение	Тип руды	Система разработки	Состав закладки	Прочность, МПа	Расход цемента, кг/м ³	Утилизация хвостов, %
Норильский никель	Октябрьское	Медно-никелевая	Слоевая с закладкой	Паста с 30% хвостов	4,2	280	48
Гайский ГОК	Гайское	Медно-колчеданная	Этажно-камерная с закладкой	Паста с 20% хвостов	3,8	320	35
Учалинский ГОК	Учалинское	Медно-колчеданная	Подэтажно-камерная с закладкой	Паста с 25% хвостов	4,5	300	40
Дальполиметалл	Николаевское	Свинцово-цинковая	Слоевая с закладкой	Паста с 15% хвостов	3,2	350	28
Приаргунское ПГХО	Стрельцовское	Урановая	Слоевая с закладкой	Паста с 10% хвостов	2,8	380	22

Примечание: приведены средние значения показателей за период испытаний не менее 3 мес.

Table 3
Indicators of environmental efficiency of using concentration tailings as part of the backfill

Таблица 5
Сравнение ключевых показателей технологий закладки

Параметр	Твердеющая закладка	Гидро-закладка	Пастовая закладка с хвостами
Прочность закладки, МПа	1–8	0,1–0,3	2–6
Расход вяжущего, кг/м ³	60–400	30–40	200–350
Дальность транспортирования, м	До 2000	До 1500	До 3000
Водоцементное отношение	0,4–0,8	10–30	0,6–1,0
Расслаиваемость смеси	Средняя	Высокая	Низкая
Пустотность закладки, %	15–35	20–40	10–20
Относительная стоимость, %	100	50–60	80–85

Таблица 6
Рецептура пастовых закладочных смесей с хвостами обогащения

Компонент	Содержание по вариантам				
	1	2	3	4	5
Цемент, кг/м ³	390	350	320	300	280
Хвосты обогащения, кг/м ³	–	70	130	180	230
Шлак доменный, кг/м ³	260	280	280	280	280
Песок, кг/м ³	940	900	870	840	810
Вода, л/м ³	280	290	300	310	320
Суперпластификатор С-3, кг/м ³	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2

Таблица 7
Характеристика исходных хвостов обогащения

Месторождение	Минеральный состав, %				
	Пирит	Халькопирит	Сфалерит	Галенит	Нерудные
Октябрьское	30–40	0,2–0,3	–	–	60–70
Гайское	70–80	0,3–0,5	2–4	–	20–30
Учалинское	60–65	0,3–0,4	2–3	–	30–35
Николаевское	10–15	0,1–0,2	1–3	0,2–0,5	80–85
Стрельцовское	1–2	–	–	–	98–99

Table 5
Comparison of the key indicators of the backfilling technologies

Table 6
Formulation of the paste-like backfilling mixtures with concentration tailings

Table 7
Characteristics of initial concentration tailings

Для количественной оценки эффективности разработанной технологии закладки были проанализированы данные о производственной деятельности пяти горнодобывающих предприятий за период 2015–2022 гг. Сравнивались ключевые технико-экономические показатели при использовании традиционной твердеющей закладки и паст с добавлением хвостов обогащения. Установлено, что средний расход цемента в закладочных смесях с хвостами обогащения составил 290 ± 30 кг/м³, что на 24% ниже, чем в контрольных составах (380 ± 40 кг/м³). При этом прочность искусственных массивов находилась в пределах требуемых значений 2–6 МПа в зависимости от системы разработки. Максимальная прочность закладки (5,8 МПа) достигнута при добавлении 10% хвостов, минимальная (2,2 МПа) – при 30% хвостов. Анализ динамики объемов закладочных работ показал устойчивый рост применения паст с хвостами обогащения на рассматриваемых предприятиях. Если в 2015 г. их доля составляла лишь 5% от общего объема закладки, то к 2022 г. она увеличилась до 38%. При этом суммарный объем утилизации хвостов в закладку вырос с 80 до 690 тыс. т/год. Удельный вес хвостов в закладочных смесях варьировал от 12 до 28% в зависимости от состава исходного сырья и требований к прочности закладки. Внедрение технологии пастовой закладки с хвостами обогащения обеспечило существенный экономический эффект за счет снижения затрат на закладочные работы и повышения извлечения руды из недр. В среднем по пяти предприятиям экономия затрат на 1 м³ закладки составила 16% по сравнению с базовым вариантом. С учетом роста объемов закладочных работ суммарный экономический эффект за период 2015–2022 гг. оценивается в 1,9 млрд руб. Средний коэффициент извлечения руды увеличился с 87 до 92%, что обеспечило дополнительное получение 1,35 млн т товарной продукции на сумму 38 млрд руб. Важным экологическим результатом использования разработанной технологии стало

сокращение объемов складирования хвостов обогащения и уменьшение техногенной нагрузки на окружающую среду. Суммарная масса утилизированных в закладку хвостов за 8 лет составила 3,2 млн т, что эквивалентно уменьшению площади хвостохранилищ на 105 га. Удельные выбросы загрязняющих веществ в атмосферу снизились на 15–20%, сбросы в водные объекты – на 25–30% за счет локализации токсичных компонентов в закладочном массиве. Показательной является динамика изменения коэффициента использования образующихся хвостов обогащения. В 2015 г. данный показатель находился на уровне 5–10%, а более 90% хвостов направлялось в хвостохранилища.

Заключение

Выполненный комплекс исследований позволил разработать и научно обосновать инновационную технологию закладки выработанного пространства твердеющими пастообразными смесями на основе хвостов обогащения руд. Изучены реологические и физико-механические свойства закладочных паст, содержащих до 30% хвостов. Разработаны оптимальные рецептуры смесей и эффективные технологические схемы их приготовления и транспортирования. Промышленные испытания подтвердили возможность утилизации в закладочные смеси до 50% текущего выхода хвостов обогащения без снижения прочности искусственных массивов. Применение разработанной технологии на горнодобывающих предприятиях обеспечило значительный экономический эффект за счет снижения затрат на закладочные работы на 15–20% и повышения полноты извлечения руд на 3–5%. Достигнуто существенное улучшение экологических показателей горного производства: сокращены объемы складирования хвостов на 40–50%, снижены выбросы и сбросы загрязняющих веществ на 15–30%.

Список литературы / References

1. Пирогов Г.Г., Лаевский Д.Н. *Способ закладки выработанного пространства*. Патент RU 2393355 С1. Опубл. 27.06.2010. Бюл. №18.
2. O'Sullivan D, Newman A. Extraction and backfill scheduling in a complex underground mine. *Interfaces*. 2014;44(2):204–221. <https://doi.org/10.1287/inte.2013.0730>
3. Наркелюн Л.Ф. *Комплексное использование минерального сырья и горно-технологических отходов*. Чита: ЧитТГУ; 1996. 139 с.
4. Franks D., Boger D., Cote C., Mulligan D. Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes. *Resources Policy*. 2011;36(2):114–122. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2010.12.001>
5. Битимбаев М.Ж., Крупник Л.А., Шапошник Ю.Н. *Теория и практика закладочных работ при разработке месторождений полезных ископаемых*. Алматы: Дәур; 2012. 624 с.
6. Ермолович Е.А. *Геотехнология*. М.: МГГУ; 2008. 438 с.
7. Блехман И.И., Блехман Л.И., Вайсберг Л.А. Вибрация преодолевает гравитацию-нелинейные эффекты, простые модели. В кн.: Асташев В.К., Крупенин В.Л., Пановко Г.Я., Саламандр К.Б. (ред.) *Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем: материалы 18-го Междунар. симпозиума, посвящ. 100-летию со дня рождения д.т.н., проф. А.Е. Кобринского, Москва-Беласово, 17–23 мая 2015 г.* М.: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН; 2015. С. 64–72.

8. Ritcey G.M. *Tailings management: problems and solutions in the mining industry*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers; New York: Elsevier Science Pub. Co.; 1989. 970 p.
9. Бодров А.С. Исследование возможности применения сгущенных отходов гидromеталлургической переработки урановых руд для закладки выработанного пространства рудников. *Горный журнал*. 2018;(7):40–43. <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.07.07>
Bodrov A.S. Applicability of thickened waste of hydrometallurgical uranium ore processing as backfill in underground mines. *Gornyi Zhurnal*. 2018;(7):40–43. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.07.07>
10. Лобанов С.Ю., Шумихина А.Ю. О влиянии свойств закладки на несущую способность междукамерных целиков. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011;(4):24–27. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2011/4/Lobanov_4_2011.pdf (дата обращения: 12.09.2024).
Lobanov S.Y., Shumihina A.Y. On the influence of backfilling properties on the load-carrying ability of rib pillars. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2011;(4):24–27. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2011/4/Lobanov_4_2011.pdf (accessed: 12.09.2024).
11. Лейзерович С.Г., Вислогузова С.А. Технология закладочных работ и водообеспечение горно-обогатительного производства. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2012;(8):190–193. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2012/8/190_193_Leyzerovich_8_2012.pdf (дата обращения: 12.09.2024).
Leyzerovich S.G., Visloguzova S.A. Technology of packing works and water supply of ore-dressing production. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2012;(8):190–193. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2012/8/190_193_Leyzerovich_8_2012.pdf (accessed: 12.09.2024).
12. Верхоланцева Т. В., Дягилев Р. А. Изучение влияния закладочных работ на сейсмический режим калийных рудников. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2016;(12):115–123. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2016/12/115_123_12_2016.pdf (дата обращения: 12.09.2024).
Verkholantseva T.V., Dyagilev R.A. Influence of backfilling on seismic activity in potash mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2016;(12):115–123. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2016/12/115_123_12_2016.pdf (accessed: 12.09.2024).

Информация об авторах

Ксенофонтов Андрей Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-0672-7828>; e-mail: a.ksenofontov@mail.ru

Тронин Сергей Александрович – кандидат экономических наук, доцент, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: Tron1977@rambler.ru

Бондаренко Майя Павловна – кандидат экономических наук, доцент, МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: mayya_k@mail.ru

Кудряшов Александр Леонидович – старший преподаватель, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-0321-1028>; e-mail: akudryashov2017@gmail.com

Information about the authors

Andrei A. Ksenofontov – Cand. Sci. (Phys.&Math.), Associate Professor, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-0672-7828>; e-mail: a.ksenofontov@mail.ru

Sergey A. Tronin – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; e-mail: Tron1977@rambler.ru

Mayya P. Bondarenko – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation; e-mail: mayya_k@mail.ru

Alexander L. Kudryashov – Senior Lecturer, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-0321-1028>; e-mail: akudryashov2017@gmail.com

Article info

Received: 03.09.2024

Revised: 21.10.2024

Accepted: 22.10.2024

Информация о статье

Поступила в редакцию: 03.09.2024

Поступила после рецензирования: 21.10.2024

Принята к публикации: 22.10.2024