

Преимущества составов и технологии консолидируемых закладочных смесей из отходов сильвинита

В. И. Татарников✉

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова»
Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация*

✉ valentinpvlparker@gmail.com

Резюме. Предметом исследования являются составы и технология приготовления консолидируемых закладочных смесей из отходов обогащения сильвинита для условий глубокозалегающего месторождения калийных солей. Цель работы – обосновать формирование закладочного массива при минимизации расхода оборотного рассола и цемента. Применены рентгенодифракционный и гранулометрический анализы, полный перекрестный план лабораторных опытов, испытания плотности, подвижности, растекаемости закладочной смеси, прочности и деформируемости закладочных массивов. Установлена граница влагоотдачи бесцементной смеси на основе солеотходов при 1 780 кг/м³ и рассола 280 кг/м³, который после формирования закладочного массива достигает предела прочности 3,6 МПа на 90-е сутки хранения. Для прикровельного дозаполнения камер подобран состав из солеотходов 1 270 кг/м³, цемента 200 кг/м³ и рассола 450 кг/м³ с подвижностью 8 см, растекаемостью 13 см и прочностью сформированного закладочного массива 4,3 МПа на 90-е сутки. Пневмомеханизированная укладка смеси обеспечила плотность массива 1 590 кг/м³, усадку 3 % и отсутствие отжимных рассолов, подтвердив воспроизводимость лабораторных закономерностей при масштабировании эксперимента. Научная новизна состоит в обосновании составов и технологии приготовления закладочных смесей на основе консолидации солеотходов. Потенциал дополнительного извлечения запасов составляет 20%.

Ключевые слова: закладочная смесь, технология приготовления, отходы обогащения сильвинита, солеотходы, оборотный рассол, граница влагоотдачи, закладочный массив, пневмомеханизированная укладка, полнота извлечения запасов

Для цитирования: Татарников В.И. Преимущества составов и технологии консолидируемых закладочных смесей из отходов сильвинита. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (4): 71-82. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-4-71-82>.

Advantages of consolidating backfill mixture compositions and technology using sylvinite waste

V. I. Tatarnikov✉

Academician N. V. Melnikov Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉ valentinpvlparker@gmail.com

Abstract. The study addresses the compositions and preparation technology of consolidating backfill mixtures produced from sylvinite beneficiation waste for the Gremyachinskoye potash deposit. Its objective was to justify differentiated formation of the main backfill mass and the roof-contact zone while limiting recycled-brine and cement consumption. The methods comprised X-ray diffraction and particle-size analyses, a full-crossed laboratory experiment, measurements of density, mobility, spread, compressive strength, and deformation characteristics, and pilot-scale testing of mechanized and pneumomechanical placement. The free-brine release threshold of the cement-free mixture was established at a recycled-brine dosage of 280 kg/m³. The recommended mixture for the main backfill volume contains 1780 kg/m³ of salt waste and 280 kg/m³ of recycled brine and reaches a compressive strength of 3.6 MPa after 90 days. The mixture selected for roof-contact filling contains 1270 kg/m³ of salt waste, 200 kg/m³ of cement, and 450 kg/m³ of recycled brine; its mobility is 8 cm, its spread is 13 cm, and its 90-day compressive strength is 4.3 MPa. The novelty of the study

lies in separating mixture preparation according to the structural function of each backfill zone. A two-line process scheme is proposed: a cement-free mixture forms the main volume, whereas a locally used flowable cement-containing mixture fills the voids beneath the chamber roof. This approach prevents free-brine release, restricts cement use, increases the filling ratio above 0.9, and creates the calculated potential to increase sylvinit reserve recovery by 20% through partial extraction of inter-chamber pillars.

Keywords: consolidating backfill; sylvinit beneficiation waste; salt waste; recycled brine; free-brine release threshold; backfill mass; roof-contact filling; pneumomechanical placement; reserve recovery

For citation: Tatarnikov V.I. Advantages of consolidating backfill mixture compositions and technology using sylvinit waste. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (4): 71-82. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-4-71-82>.

Введение

Расширение производства калийных удобрений сопровождается увеличением объемов добычи и переработки сylvинита. При обогащении калийных солей выход отходов достигает 60–70 % от массы перерабатываемого минерального сырья. Основная часть техногенного сырья при освоении месторождений калийных солей представлена твердыми отходами: хвостами обогащения, шламами и оборотными рассолами, для складирования которых создаются солеотвалы, шламо- и рассолохранилища. Длительное хранение этих отходов приводит к отчуждению земель, засолению почв, поверхностных и подземных вод и росту экологической нагрузки на территории горно-обогатительных предприятий [1, 2]. Кроме того, значительная часть балансовых запасов калийных солей, разрабатываемых камерными системами, остается в междуканальных и барьерных целиках до 80 % и более. Поэтому вовлечение отходов обогащения в состав закладочных смесей представляет интерес как способ их утилизации и средство повышения полноты освоения запасов месторождений.

При подземной разработке глубокозалегающих пластов калийных солей назначение закладки не должно ограничиваться заполнением выработанного пространства и размещением отходов производства. Формируемый массив должен воспринимать системы: ограничивать конвергенцию очистных выработок, деформацию кровли и почвы, снижать нагрузку от налегающих пород и препятствовать их формированию и развитию водопроводящих трещин в водозащитной толще. Для выполнения такой функции закладочный массив должен обладать нормативными прочностными и деформационными характеристиками, минимальной усадкой и устойчивым контактом с кровлей камеры [3, 4]. Следовательно, эффективность закладочных работ определяется не только количеством размещенных отходов, но и составом смеси, технологией ее приготовления и полнотой заполнения выработанного пространства.

Высокие требования к составу и технологии приготовления закладочных смесей предъявляются в условиях разработки Гремячинского месторождения калийных солей, где продуктивный пласт залегает на глубине более 900 м и характеризуется изменчивой мощностью, неоднородностью строения, изменением углов падения и развитием флексурных нарушений. К осложняющим факторам относится наличие в подстилающих карналлитсодержащих пород, галитов, высоконапорных водоносных горизонтов, что определяет необходимость сохранения водозащитной толщи [5, 6]. Проектными решениями предусмотрена камерная одностадийная система разработки с гидравлической закладкой выработанного пространства солеотходами и сохранением междуканальных и барьерных целиков.

Физико-механические свойства вмещающих пород яв-

ляются исходными параметрами при обосновании состава закладочной смеси. Плотность пород налегающей толщи определяет величину горного давления на элементы камерной системы разработки, а прочностные характеристики – устойчивость обнажений и требуемую несущую способность закладочного массива. Пористость, трещиноватость и проницаемость пород влияют на возможность миграции и перераспределения влаги в закладочной смеси. В условиях растворимых сylvинит- и карналлитсодержащих пород выделение избыточного рассола из состава закладочной смеси может привести к снижению прочности сylvинита и растворению нижележащего пласта карналлита. Деформационные характеристики, включая склонность соляных пород к ползучести, определяют интенсивность конвергенции камер и требования к модулю деформации, усадке и полноте контакта закладки с кровлей. Существенное значение имеет также гранулометрический состав солеотходов, определяющий плотность укладки частиц, влагоудерживающую способность и фильтрационные свойства смеси, а также влияющий на ее реологическое поведение и равномерность твердения. Поэтому соотношение солеотходов, оборотного рассола и вяжущего должно обеспечивать не только нормативную прочность, но также отсутствие влаговыделения, сбалансированное распределение фракций и согласованность деформаций формируемого закладочного массива с вмещающими породами [5, 6, 12].

В мировой практике освоения калийных и соляных месторождений предусматривалось применение сухой, гидравлической и твердеющей закладок [7–9]. На рудниках Германии отходы обогащения смешивали с насыщенными рассолами и транспортировали в выработанное пространство по трубопроводам с откачкой отжимных рассолов для последующей выемки целиков [8, 10]. В зависимости от морфологии залежи недозаклад камер при таких схемах достигает 2–15 % и более. Опыт соляной шахты «Величка» (Польша) также показывает, что гидравлическая технология закладки связана с транспортированием значительного количества рассола и воздействием дополнительной влаги на вмещающие породы [11]. Таким образом, технология гидрозакладки решает задачу утилизации отходов, но не обеспечивает формирование массива как конструктивного элемента системы разработки.

Применения гидравлической закладки в условиях Гремячинского месторождения дополнительно ограничивается необходимостью подачи в рудник значительного количества оборотного рассола и последующего отвода его избытка. Выделение свободной жидкой фазы приводит к длительному контакту рассола с сylvинитом и подстилающими карналлитсодержащими породами. Такое воздействие снижает прочностные и деформационные характеристики сylvинита, а ненасыщенный по карналлиту оборотный рассол

растворяет карналлитсодержащие породы [12]. Кроме того, отсутствие нормируемых прочностных и деформационных характеристик формируемого гидрозакладочного массива не позволяет рассматривать его как несущий элемент, обеспечивающий извлечение смежных междукамерных целиков.

Альтернативой является формирование консолидированного закладочного массива из отходов обогащения сильвинита при оптимальном расходе оборотного рассола. Омоноличивание происходит преимущественно вследствие уплотнения солеотходов, кристаллизации солей и образования устойчивых межзерновых связей. Это позволяет отказаться от дорогостоящего цемента при заполнении основной части объема закладываемых камер. Однако сокращение расхода рассола для предотвращения влагоотдачи и повышения прочности массива снижает подвижность смеси и затрудняет заполнение прикровельной части камеры. Добавление цемента повышает прочность закладочного массива, но увеличивает стоимость закладочных работ и расход дорогостоящего вяжущего [4, 13, 14].

Единым составом технически трудно обеспечить отсутствие влагоотдачи, высокую плотность смеси и нормативную прочность закладочного массива. Это обусловило выбор дифференцированного подхода к составу и технологии приготовления смесей: бесцементной консолидируемой смеси из солеотходов при ограниченном расходе оборотного рассола, цементсодержащие смеси для локального дозаполнения верхней части камер. Реализация такого подхода требует раздельного дозирования и смешения компонентов смеси на передвижном закладочном комплексе.

Анализ отечественного и зарубежного опыта показал, что недостаточно изучена взаимосвязь между границей влагоотдачи смеси на основе солеотходов, расходом оборотного рассола, режимом уплотнения, достижением нормативной прочности и технологическими параметрами. Для действующего глубокозалегающего калийного рудника также отсутствует технология приготовления закладочных смесей с требуемыми физико-механическими характеристиками, позволяющая использовать преимущественно местные отходы, минимизировать расход цемента и одновременно обеспечить высокую полноту заполнения камер.

Цель выполненных исследований заключается в обосновании преимуществ разработанных составов и технологий приготовления консолидируемых закладочных смесей из отходов обогащения сильвинита, обеспечивающих отсутствие избытков рассоловыделения, требуемые прочностные характеристики закладочного массива и полноту заполнения прикровельной части камер.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: установлена граница влагоотдачи закладочной смеси на основе солеотходов и оборотного рассола; исследовано влияние расхода затворителя и способа уплотнения на плотность и прочность формируемого массива; обоснованы рациональные составы для формирования основного объема закладочного массива и дозаполнения прикровельной части камер; разработана схема их дифференцированного приготовления на двух технологических линиях; выполнена сравнительная оценка предложенных решений по показателям нормативной прочности смеси, рассоловыделения, усадки, расхода цемента и полноты заполнения выработанного пространства. Практическая реализация разработанного подхода создает предпосылки для формирования консолидированного закладочного массива как конструктивного элемента си-

стемы разработки и последующего вовлечения части запасов междукамерных целиков в отработку.

Материал и методы исследования

Объектом исследований являлись консолидируемые закладочные смеси, приготовленные из отходов обогащения калийных солей Гремячинского горно-обогатительного комбината. Для лабораторных исследований с конвейера на выходе из обогатительной фабрики была отобрана представительная проба солеотходов массой 400 кг. Отбор проб выполняли отдельными порциями в течение суток. Объем пробы оборотного рассола составил 20 л. Для приготовления цементсодержащих составов применяли цемент марки М500. Вода использовалась как затворитель для сопоставимого сравнения при установлении границы влагоотдачи и оценке влияния вида жидкой фазы на свойства смеси.

Средняя исходная влажность солеотходов обогатительной фабрики составила 8 %. По данным химического анализа, содержание NaCl достигало 80 %, KCl – 9,1 %, MgCl₂ – 0,94 %, нерастворимого остатка и CaSO₄ – 8,95 %. Минеральный состав двух исследованных партий характеризовался преобладанием галита – 82–89 %, присутствием сильвина – 1–6 %, ангидрита – 6–9 % и полигалита – до 4 %.

Минеральный состав определяли методом рентгенодифракционного анализа на дифрактометре Shimadzu XRD-6000 с Cu-анодом и графитовым монохроматором. Количественное содержание минеральных фаз рассчитывали в программном обеспечении Siroquant V4. Насыпную плотность солеотходов определяли по ГОСТ 32721-2014 методом взвешивания материала в металлическом сосуде объемом 1 дм³ [15]. Для определения гранулометрического состава применяли мокрый ситовой анализ на автоматической просеивающей машине EML 200. На верхнее сито непрерывно подавали оборотный рассол, предотвращавший агрегирование частиц. После дренирования материал на ситах высушивали и взвешивали. Более 91 % солеотходов было представлено классами крупности свыше 0,1 мм.

Солеотходы высушивали до постоянной массы, а требуемую влажность смеси создавали дозированным введением затворителя. При пересчете составов с учетом производственных условий должна учитываться фактическая влажность поступающих солеотходов.

Схема исследований и критерии выбора составов закладочных смесей

Исследования проводили последовательно: устанавливали границу влагоотдачи смеси солеотходов и затворителя; оценивали влияние расхода рассола и способа уплотнения на плотность и прочность массива; исследовали цементсодержащие смеси с различными технологическими свойствами; выполняли опытно-промышленную проверку механизированного и пневмомеханизированного способов формирования закладочного массива; разрабатывали технологическую схему раздельного приготовления смесей для основного объема камеры и прикровельного слоя.

Расход компонентов на 1 м³ приготовленной смеси определяли с соблюдением условия баланса абсолютных объемов:

$$\sum_{i=1}^n = q_i / \rho_i = 1, \quad (1)$$

где q_i – массовый расход компонента, кг/м³; ρ_i – его истинная плотность, кг/м³.

Количество лабораторных опытов планировали методом полного факторного или перекрестного эксперимента в соответствии с Р 50.1.040–2002 [16]. Для каждой серии определяли факторы, диапазоны их варьирования и число уровней. В план включали все сочетания принятых уровней, а остальные условия поддерживали постоянными.

При равномерном шаге варьирования число уровней количественного фактора рассчитывали:

$$m_i = (x_{i,max} - x_{i,min}) / \Delta x_i + 1, \quad (2)$$

где m_i – количество уровней варьирования i -го количественного фактора, $x_{i,max}$ – максимальное значение фактора, $x_{i,min}$ – минимальное значение фактора, Δx_i – шаг изменения фактора; i – порядковый номер фактора, $+1$ – учитывает одновременно начальное и конечное значения диапазона.

Число различных экспериментальных условий, определяемых по выражению

$$N_0 = \prod_{i=1}^k m_i, \quad (3)$$

где N_0 – общее количество различных составов (сочетаний факторов), Π – знак произведения; m_i – число уровней i -го фактора; k – число одновременно варьируемых факторов.

С учетом количества параллельных образцов r общее количество экспериментальных единиц составляло

$$N = rN_0, \quad (4)$$

где N – общее количество изготовленных образцов, r – количество параллельных образцов для каждого состава, N_0 – количество исследуемых составов (экспериментальных условий).

Для серии по установлению границы влагоотдачи варьировали два фактора: вид затворителя (вода или оборотный рассол ($m_1 = 2$)) и его расход от 10 до 350 кг/м³ с шагом 10 кг/м³ ($m_2 = 35$). План эксперимента включал $N_0 = 2 \times 35 = 70$ различных составов. Для каждого состава формировали три параллельных образца, поэтому общее количество экспериментальных единиц составило $N = 70 \times 3 = 210$. Принятый диапазон охватывал состояния закладочной смеси от полного удержания затворителя до устойчивого появления свободной жидкой фазы, а шаг расхода затворителя 10 кг/м³ позволял локализовать границу влагоотдачи между соседними составами смеси с интервалом не более 10 кг/м³. Количество опы-

тов в остальных сериях определяли аналогично на каждом этапе исследований.

Схема и характеристики экспериментов приведены в таблице 1.

В качестве критериев выбора составов смеси принимали отсутствие свободного рассола, достижение нормативной прочности в заданные сроки, минимальную усадку, пригодность смеси к принятому способу транспортирования и возможность заполнения прикровельных пустот при ограничении расхода цемента.

Нормативную прочность определяли по условию устойчивости вертикальных обнажений закладочного массива при отработке смежных запасов. В расчетах учитывали высоту и ширину камеры, коэффициент формы закладочного массива, длительную прочность, угол падения залежи, удельный вес пород и закладки, а также коэффициент запаса прочности, равный 1,5.

Коэффициент формы определяли по зависимости

$$\sigma_{сж2} = \frac{n}{1000k_\phi k_d} * \left(\frac{k_a \gamma_1 H_{1L}}{d} \right) + \gamma_2 h_2, \text{ МПа}, \quad (5)$$

где n – коэффициент запаса прочности, принимаемый равным 1,5; k_ϕ – коэффициент формы; k_d – коэффициент длительной прочности закладочного массива, принимаемый равным 0,5–0,7 при работе техногенных опор в условиях незаложенных камер, включая двухстадийную выемку, и 1 – при кратковременном нагружении; k_a – коэффициент, учитывающий угол падения залежи α ; γ_1 – удельный вес пород подрабатываемой толщи, кН/м³; H_1 – высота толщи пород, нагружающей закладочный массив, м; S – площадь кровли, приходящаяся на закладочный массив, м²; γ_2 – удельный вес закладочного массива, кН/м³; h_2 – высота обнаженной части закладочного массива, м.

$$k_\phi = 0,6 + 0,4a / h, \quad (6)$$

где a и h – соответственно ширина и высота закладочного массива, м.

Расчеты выполняли для камер высотой 3,7; 6 и 13 м. Диапазон изменения нормативной прочности 3,18–3,83 МПа использовали как критерий при сопоставлении экспериментальных составов.

Для итогового сравнительного анализа были выделены варианты смеси:

1. Консолидированная смесь на основе солейотходов с

Таблица 1 / Table 1

Схема экспериментальных исследований закладочных смесей / Experimental design for backfill mixture studies

Серия исследований	Варьируемый фактор	Определяемый показатель
Определение границы влагоотдачи	Расход рассола или воды от 10 до 350 кг/м ³ с шагом 10 кг/м ³	Наличие свободной жидкой фазы, влажность, прочность на 30-е сутки
Бесцементные смеси	Расход рассола – 150, 200, 250 и 280 кг/м ³ ; отсутствие дополнительного уплотнения, штыкование, виброуплотнение и комбинированное уплотнение	Плотность, потеря влаги, прочность и деформационные характеристики, динамика консолидации
Цементсодержащие смеси	Расход цемента – 80–500 кг/м ³ ; расход рассола – 150–500 кг/м ³	Плотность, подвижность, растекаемость, прочность и модуль деформации
Опытно-промышленная проверка	Механизированная послойная укладка и непрерывная пневмомеханизированная подача	Плотность массива, усадка, изменение влажности и объем выделившегося рассола
Разработка технологии приготовления	Назначение смеси, последовательность дозирования, смешения и подачи компонентов	Структура технологических линий, производительность и требования к оборудованию

рассолом солеотходов 1 780 кг/м³ и оборотного рассола 280 кг/м³.

2. Смесь для прикровельного дозаполнения слоя с добавлением цемента с расходом солеотходов 1 270 кг/м³, цемента 200 кг/м³ и оборотного рассола 450 кг/м³.

Определение границы влагоотдачи

Для установления максимального содержания жидкой фазы, при котором закладочная смесь не выделяет свободный рассол, солеотходы предварительно высушивали. В сухой материал последовательно вводили воду или оборотный рассол в количестве от 10 до 350 кг/м³ с шагом 10 кг/м³.

Приготовленными закладочными смесями заполняли полые цилиндрические формы с дренажными отверстиями. Формы устанавливали на поддоны с предварительно определенной массой, что позволяло фиксировать появление свободной жидкой фазы. Закладочную смесь во всех формах уплотняли штыкованием. Всего было испытано 70 составов: по 35 составов с водой и рассолом. Каждый состав испытывали в трех параллельных формах; общее количество образцов составило 210.

Выделение жидкости контролировали в течение 7 суток. За границу влагоотдачи принимали наибольший расход затворителя, при котором свободная жидкая фаза не выделялась. После растаривания образцы продолжали выдерживать в климатической камере, а на 30-е сутки на прессе определяли предел прочности закладочного массива при одноосном сжатии. Результаты трех параллельных испытаний усредняли.

Приготовление и испытание образцов

Лабораторные образцы закладочного массива готовили вручную путем тщательного перемешивания сухих компонентов и постепенного введения затворителя. Для эксперимента применяли стандартные кубические формы ЗФК-70 с размером ребра 70 мм. До заполнения формы взвешивали.

После укладки и уплотнения смеси повторно определяли массу формы, что позволяло рассчитывать плотность по отношению массы материала к занимаемому объему:

$$\rho = m / V, \text{ кг/м}^3, \quad (7)$$

где ρ – плотность образца или смеси, кг/м³, m – масса образца или смеси, кг, V – занимаемый объем, м³.

Влияние режима уплотнения смеси исследовали при четырех способах формирования образцов: без дополнительного уплотнения, с уплотнением штыкованием, вибрационным воздействием и сочетанием виброуплотнения со штыкованием. Образцы растаривали на 5-е сутки и устанавливали на ровную поверхность в климатической камере. Температуру поддерживали на уровне 35 °С, относительную влажность воздуха – 30 %, что соответствует температурно-влажностным условиям Гремячинского рудника.

Массу образцов контролировали через каждые 5 суток. Изменение массы и показания влагомера использовали для оценки потери влаги и динамики консолидации. Бесцементные составы испытывали преимущественно на 40, 50, 60, 90-е и 200-е сутки. Для цементсодержащих смесей применяли как ранние контрольные сроки (7, 14 и 28 суток), так и длительное хранение (38, 60, 90, 110, 140 и 200 суток).

Предел прочности при одноосном сжатии определяли на

прессе Instron по отношению максимальной разрушающей нагрузки к площади нагружаемой грани образца:

$$\sigma_{\text{сж}} = F_{\text{max}} / A, \text{ МПа}, \quad (8)$$

где $\sigma_{\text{сж}}$ – предел прочности при сжатии, МПа, F_{max} – максимальная разрушающая нагрузка, A – первоначальная площадь поперечного сечения образца, мм².

По диаграммам «напряжение, продольная деформация» определяли модуль деформации. Плотность, остаточную влажность и характер разрушения фиксировали непосредственно перед механическим испытанием.

Подвижность цементсодержащих смесей определяли с применением стандартного конуса СтройЦНИИЛ массой 300 г, высотой 145 мм и диаметром основания 75 мм. После погружения конуса в смесь в течение 10 суток измеряли глубину погружения с точностью до 2 мм. За окончательный результат принимали среднее значение трех измерений. Дополнительно фиксировали растекаемость смеси на горизонтальной поверхности. Эти показатели использовали для оценки возможности подачи смеси поршневым насосом и степени заполнения прикровельных пустот.

Опытно-промышленная проверка технологической пригодности смеси

Опытно-промышленные исследования (ОПИ) проводили на поверхности и в подземных условиях Гремячинского ГОКа. Поверхностные исследования проводились в двух гидроизолированных траншеях (рис. 1). Длину каждой траншеи принимали в два раза больше ее ширины для приближения условий деформирования массива к схеме плоской деформации. В основании устраивали гидроизоляцию и зумпф с трубой, обернутой фильтрующей тканью, для сбора и измерения объема выделившегося отжимного рассола.

В первой траншее (рис. 1а) исследовали механизированный циклический способ. Смесь укладывали послойно с контролем на отметках 0,6; 1,2 и 2,0 м, после чего выравнивали и уплотняли смесь гусеничным бульдозером. При достижении общей высоты массива 3,25 м дополнительно применяли виброролы.

Во второй траншее (рис. 1б) смесь непрерывно подавали пневматической установкой с приемным бункером и транспортным рукавом. Уплотнение смеси происходило за счет кинетической энергии воздушного потока. В ходе эксперимента изменяли угол наклона сопла; сопоставляли режимы, обозначенные по шкале установки, 270–280° и более 280°.

После заполнения траншеи на поверхности массивов устанавливали реперы.

Изменение фактической высоты сформированного массива контролировали в течение 60 суток, а относительную усадку рассчитывали по выражению

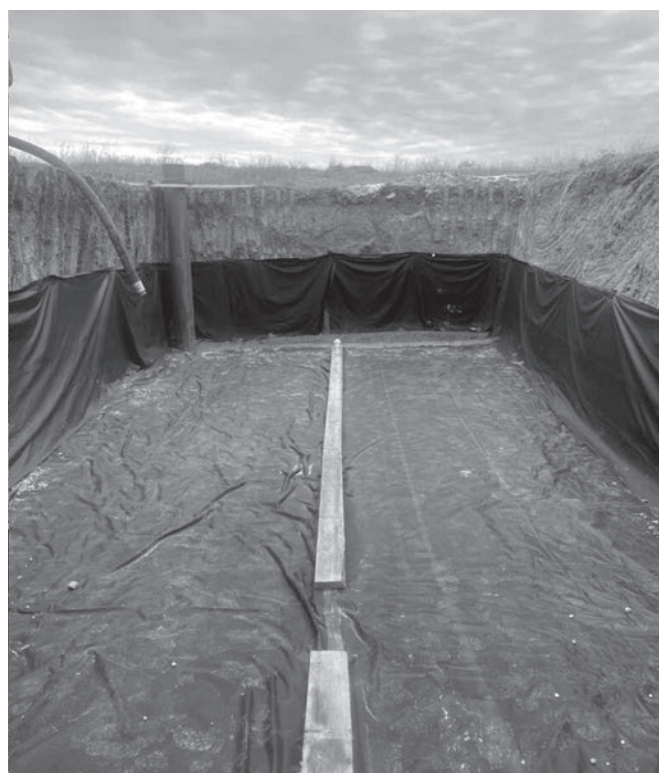
$$S_t = (h_0 - h_t) / h_0 \times 100 \%, \quad (9)$$

где S_t – относительная осадка смеси к моменту времени t , %, h_0 – первоначальная высота столба смеси, мм, h_t – высота столба смеси через время t , мм, t – время после приготовления или укладки смеси.

Одновременно измеряли плотность, влажность смеси и объем рассола, поступившего в накопительную емкость. Полученные показатели использовали для проверки воспро-



а (a)



б (b)

Рис. 1. Две опытно-промышленные гидроизоляционные траншеи вблизи солеотвала: для а – механизированного циклического способа заполнения закладочной смеси; б – пневмомеханизированного способа заполнения закладочной смеси /

Fig. 1. Two pilot-scale waterproofing trenches near the salt waste dump: a – mechanized cyclic method of backfill mixture placement; b – pneumomechanical method of backfill mixture placement

изводимости границы влагоотдачи в лабораторных и опытно-промышленных условиях [17].

В подземных условиях проверялись результаты ОПИ в рудничных условиях Гремячинского ГОКа.

Разработка технологии приготовления и обработка результатов

Технологическую схему эксперимента разрабатывали методом функционального разделения закладочного процесса на четыре последовательно выполняемых блока: транспортирование компонентов к подземному узлу; дозирование; смешивание смеси; подачу готовой смеси в камеру. Оценивали различие свойств смесей для основного массива и прикровельного слоя.

Производительность первой линии определяли исходя из необходимости размещения основного объема солеотходов при годовой производительности рудника 7,3 млн т сильвинита при графике работы в 3 смены в течение 340 суток и календарном фонде рабочего времени 8 160 ч в год. Производительность линии прикровельного дозаполнения принимали равной 23 м³/ч с учетом производительности насоса, емкости смесительного оборудования и продолжительности транспортирования закладочной смеси.

Преимущества разработанных составов закладочных смесей и технологии их приготовления оценивали по расходу оборотного рассола и цемента, наличию свободной жидкой фазы, усадке массива, пределу прочности, модулю деформации, подвижности и растекаемости закладочной смеси. При обработке экспериментальных данных рассчитывали средние значения, диапазон изменения результатов и относительное изменение показателей.

Для показателей X относительное изменение определяли по формуле

$$\Delta X = (X_2 - X_1) / X_1 \times 100 \%, \quad (10)$$

где X – экспериментальный параметр

Расчетный ресурсный эффект оценивали сопоставлением объема одного междукамерного целика с объемом пяти ранее отработанных камер. При одинаковой длине блока L объем камер принимали равным $5 \times 6 \times 11,8 L$, объем целика – $6 \times 11,8 L$. Полученный показатель рассматривали как потенциальное увеличение извлекаемого объема запасов, а не как результат уже выполненной промышленной выемки целика.

Результаты

Результаты экспериментов подтвердили возможность реализации технологического разделения цикла приготовления закладочной смеси с формированием консолидируемого закладочного массива из солеотходов и рассола и с добавлением цемента для локального дозаполнения прикровельной части камер более подвижной смесью. Полученные результаты подтверждали воспроизводимость установленных закономерностей при увеличении масштаба закладочного массива и параметрах технологии приготовления двух типов смесей.

Граница влагоотдачи и выбор составов закладочных массивов

В экспериментальной серии из 70 составов установлена верхняя граница влагоотдачи смеси, при которой смесь сохраняет весь добавленный затворитель. При использовании оборотного рассола она соответствует расходу 280 кг/м³ смеси

и влажности массива 8 %. Предел прочности таких образцов при одноосном сжатии на 30-е сутки составил 2,1 МПа. При использовании в качестве затворителя воды граница влагоотдачи достигала при расходе воды 260 кг/м³ и влажности смеси 5 %, а прочность за 30 суток составила 3,2 МПа (рис. 2). При дальнейшем увеличении расхода затворителя появлялась свободная жидкая фаза и прочность образцов резко снижалась. В случае применения рассола область максимальных значений влагоотдачи располагалась в интервале 250–280 кг/м³, после чего наблюдался выраженный спад показателя прочности.

Несмотря на более высокую динамику набора прочности образцов, затворенных водой, для последующих исследований был принят оборотный рассол обогатительной фабрики. Такое решение обеспечивает вовлечение в закладку жидкого отхода действующего производства и исключает необходимость дополнительной подачи технической воды в рудник. Установленный расход рассола 280 кг/м³ определяется тем, что в пределах этой границы закладочная смесь сохраняет способность к уплотнению и консолидации без выделения свободной жидкой фазы.

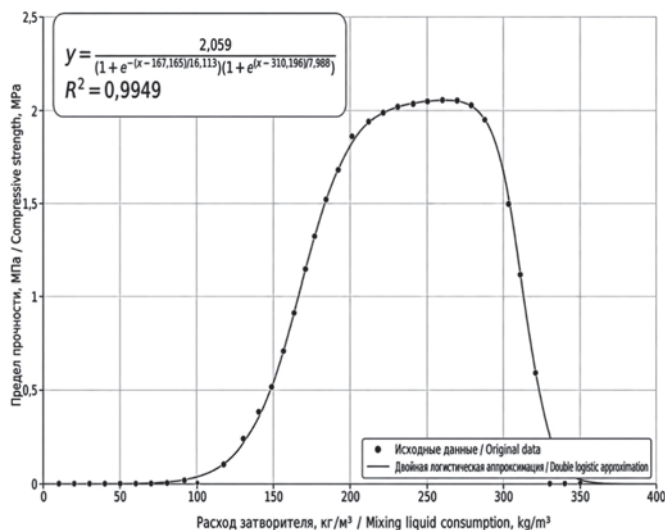


Рис. 2. Предел прочности при одноосном сжатии образцов закладочного массива на 30-е сутки твердения /
Fig. 2. Uniaxial compressive strength of backfill specimens after 30 days of curing at different brine dosages

Как видно из рисунка 2, увеличение расхода оборотного рассола в закладочной смеси до 200–230 кг/м³ сопровождается интенсивным ростом предела прочности образцов закладочного массива при одноосном сжатии. В интервале 230–280 кг/м³ прочность стабилизируется на максимальном уровне 2,0–2,1 МПа, что соответствует области рационального содержания затворителя. При расходе рассола свыше 280 кг/м³ начинается снижение прочности закладочного массива, которое после 300 кг/м³ приобретает резкий характер вследствие появления избыточной влаги и нарушения структуры формируемого массива.

Влияние уплотнения и расхода рассола на формирование прочности

Испытания образцов закладочного массива, сформированных при различной степени уплотнения, показали устойчивый рост прочности с увеличением плотности закладочного массива (рис. 3). Зависимость сохранялась как при затворении водой, так и при использовании оборотного рассола. При

одинаковой плотности образцы на воде обладали более высокой прочностью. Следовательно, для достижения требуемых прочностных характеристик закладочного массива необходимо контролировать степень уплотнения смеси при её укладке.

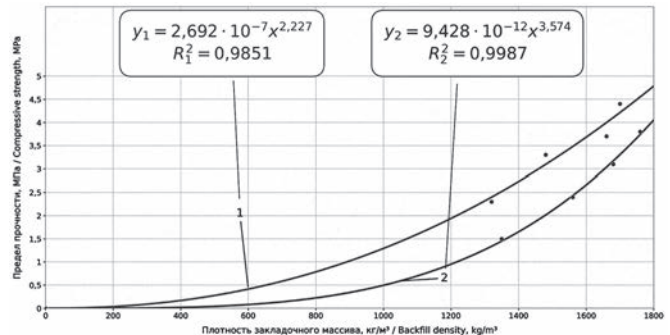


Рис. 3. Влияние плотности консолидируемого закладочного массива на прочность на 90-е сутки: 1 – состав, затворенный водой; 2 – состав, затворенный рассолом при 23 °C /
Fig. 3. Effect of backfill density on 90-day strength: 1 – water-mixed composition; 2 – brine-mixed composition at 23 °C

Длительные испытания составов консолидированной смеси позволили оценить совместное влияние расхода рассола, степени кристаллизации и уплотнения. Для состава с расходом солеотходов 1 780 кг/м³ и рассола 280 кг/м³ плотность закладочной смеси после формирования образца составила 1 900 кг/м³. К 60-м суткам плотность массива возросла до 1 948 кг/м³, остаточная влажность снизилась до 0,45 %, а предел прочности достиг 3,2 МПа. На 90-е сутки соответствующие значения составляли 1 957 кг/м³, 0,05 % и 3,6 МПа, а на 200-е сутки – 1 958 кг/м³, 0,04 % и 3,65 МПа. Основной прирост прочности происходил в интервале 40–90 суток, после чего кривые переходили в область стабилизации прочности.

Снижение расхода рассола не ускорило получение более прочного массива. Через 200 суток образцы при расходе рассола 250, 200 и 150 кг/м³ имели прочность соответственно 3,1; 2,7 и 1,7 МПа против 3,5 МПа для состава с расходом 280 кг/м³ (рис. 4). Таким образом, относительно принятого состава прочность снизилась соответственно в 1,13; 1,30 и 2,06 раза. При уменьшении содержания затворителя частицы солеотходов хуже перераспределялись при уплотнении, а количество солей, участвующих в последующей кристаллизации, становилось недостаточным для формирования прочной структуры.

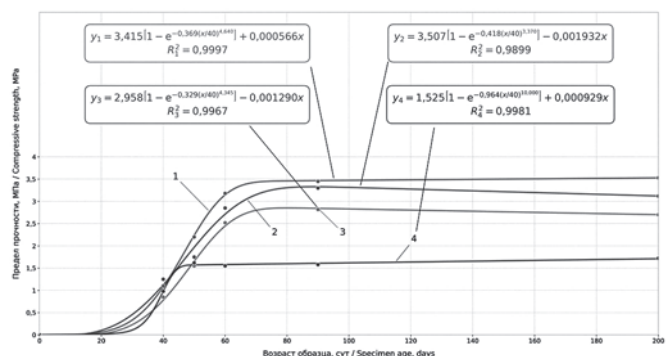


Рис. 4. Динамика формирования прочности консолидированного закладочного массива при расходе рассола: 1 – 280; 2 – 250; 3 – 200; 4 – 150 кг/м³ /
Fig. 4. Strength development of consolidated backfill at brine dosages of: 1–280; 2–250; 3–200; 4–150 kg/m³

К 90-м суткам модуль деформации образцов закладочного принятого состава превышал 300 МПа. Полученная на 60-е сутки прочность 3,2 МПа соответствует нижней границе расчетного нормативного диапазона 3,18–3,83 МПа, установленного для камер высоты 3–13. На 90–200-е сутки прочность массива 3,4–3,6 МПа находится внутри указанного диапазона. Поэтому допустимый срок обнажения и высота открываемой поверхности должны назначаться с учетом состава смеси и периода набора прочности.

Результаты опытно-промышленных исследований

При опытно-промышленных испытаниях технологии на поверхности установлено, что определяющим технологическим параметром при пневмомеханизированной укладке является угол наклона сопла, от которого зависит плотность формируемого массива. При наклоне сопла 270–280° плотность достигала 1 590 кг/м³, а усадка смеси после завершения заполнения камеры составила 3 % (рис. 5). При увеличении угла наклона сопла более чем на 280° плотность снизилась до 1 420 кг/м³, вследствие чего усадка возросла до 6 % и превысила принятое допустимое значение 5 %. При механизированной послойной укладке смеси плотность составила 1 380 кг/м³ и усадка после заполнения – 4 %. Во всех вариантах основной рост усадки завершался в течение 14–19-х суток, после чего уровень поверхности массива не изменился.

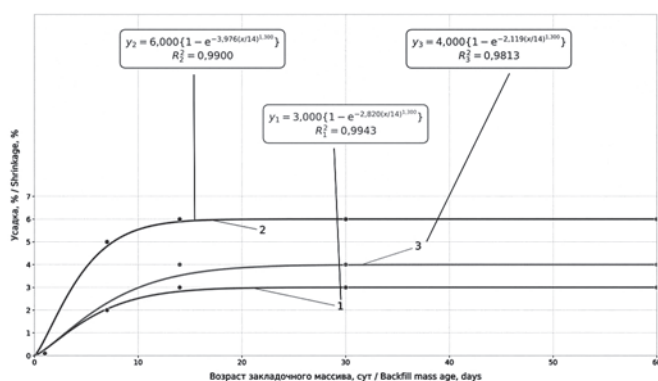


Рис. 5. Усадка закладочного массива в зависимости от способа формирования и плотности:

- 1 – пневмомеханизированная укладка, 1 590 кг/м³; 2 – пневмомеханизированная укладка, 1 420 кг/м³; 3 – механизированная укладка, 1 380 кг/м³ /
Fig. 5. Backfill shrinkage versus placement method and density: 1 – pneumomechanical, 1 590 kg/m³; 2 – pneumomechanical, 1 420 kg/m³; 3 – mechanized, 1 380 kg/m³

Различия между способами формирования закладочного массива проявились также в характере рассоловыделения. При механизированном способе укладки смеси откачка рассола продолжалась до 60-х суток (табл. 2); сумма приведенных в таблице 2 интервальных объемов составила около 2,15 м³. При пневмомеханизированном формировании массива во все сроки измерений откачанный объем рассолов был равен нулю. За весь эксперимент в притраншейном зумпфе в накопительной емкости было отмечено лишь около 0,008 м³ жидкости, объем которой не позволял выполнить откачку. Практически полное отсутствие свободного рассола связано одновременно с уплотнением закладочной смеси и снижением ее влажности воздушным потоком.

Таблица 2 / Table 2

Динамика выделения рассола при циклическом и непрерывном формировании закладочного массива / Volume of released brine during cyclic and continuous backfill formation

Время формирования массива, сутки	Объем откачки при циклическом формировании, л	Объем откачки при непрерывном способе, л
0	0	0
1	0	0
2	15	0
3	50	0
4	85	0
5	95	0
6	118	0
7	140	0
14	210	0
21	260	0
28	310	0
35	412	0
42	260	0
49	140	0
56	40	0
60	17	0

Опытно-промышленные испытания в подземных условиях

Для проверки результатов лабораторных исследований и поверхностных опытно-промышленных испытаний на Гремячинском руднике на расстоянии 560 м от ствола были пройдены 4 опытно-промышленные ниши шириной 2,0–2,5 м, высотой и глубиной по 2,5 м. Солеотходы доставляли в подземные выработки в еврокубах, после чего транспортировали к месту проведения испытаний самоходным оборудованием. Заполнение ниш выполняли с применением погрузочно-доставочной машины и вручную. Влажность укладываемой смеси составляла 8 %. Для изучения влагоотдачи две ниши были полностью гидроизолированы по почве и бортам с устройством зумпфов для сбора отжимного рассола. Усадку формируемых массивов в течение 3 месяцев контролировали системой дистанционного мониторинга «Дисконтр» и прямыми маркшейдерскими измерениями, а температурный режим – термопарами, установленными внутри массива. В период заполнения ниш закладочной смесью температура атмосферы на участке составляла 26 °С при влажности 55 %. В состав смеси, размещенной в нише № 4, дополнительно вводили 100 кг/м³ негашеной извести для оценки ее влияния на тепловой режим и консолидацию массива. После демонтажа перемычек состояние закладки оценивали визуально, посредством отбора керн и видеоэндоскопического обследования скважин.

Испытания образцов, отобранных вырезок из массива, сформированного в подземных опытно-промышленных нишах, показали достижение прочности 2,8 МПа уже через 20 суток. Этот результат подтверждает развитие консолидации в подземных условиях, однако еще не позволил достичь нижней границы нормативного диапазона 3,18 МПа. Это обеспечивается малой продолжительностью ОПИ в 60 суток и несоблюдением в подземных условиях технологии формирования закладочного массива. В поверхностной траншее

керы плотностью около 1 350 кг/м³ имели более низкую прочность (0,36–0,60 МПа) вследствие недостаточного уплотнения и сохранявшейся влажности 2,1–2,6 %. После полного высушивания прочность образцов возросла до 1,4 МПа. Сопоставление лабораторных и опытно-промышленных испытаний подтвердило, что воспроизводимость прочностных характеристик определяется не только рецептурой, но и плотностью укладки, а также условиями удаления остаточной влаги из формируемого закладочного массива.

Обоснование состава для формирования прикровельного слоя

Для заполнения прикровельных пустот исследованы цементосодержащие закладочные смеси с расходом рассола 350–500 кг/м³ (табл. 3). При содержании цемента 200 кг/м³ увеличение расхода рассола с 350 до 450 кг/м³ повышало подвижность с 2,5 до 8 см и обеспечивало растекаемость 13 см. Дальнейшее увеличение расхода рассола до 500 кг/м³ повышало подвижность до 12 см, но растекаемость увеличивалась лишь до 14 см. При расходе цемента 500 кг/м³ технологические показатели были несколько выше, однако это требовало в 2,5 раза большего количества вяжущего.

Таблица 3 / Table 3

Технологические свойства закладочных смесей из солеотходов, цемента и рассола /
Technological properties of backfill mixtures made of salt waste, cement, and brine

Состав закладочной смеси	Показатель	350 кг/м ³ рассола	400 кг/м ³ рассола	450 кг/м ³ рассола	500 кг/м ³ рассола
I (цемент – 500 кг/м ³)	Солеотходы, кг/м ³	1 250	1 120	1 050	960
	Плотность, кг/м ³	2 100	2 020	2 000	1 960
	Подвижность, см	3,8	5	10	14
	Растекаемость, см	0	0	15	22
II (цемент – 200 кг/м ³)	Солеотходы, кг/м ³	1 430	1 360	1 270	1 180
	Плотность, кг/м ³	1 980	1 960	1 920	1 880
	Подвижность, см	2,5	3,5	8	12
	Растекаемость, см	0	0	13	14

Сопоставление реологических и прочностных характеристик массивов позволило выделить приоритетный состав закладочной смеси, включающий солеотходов 1 270 кг/м³, цемента 200 кг/м³ и рассола 450 кг/м³. Его подвижность составляет 8 см, растекаемость – 13 см, а плотность приготовленной смеси – 1 920 кг/м³. Через 38 суток прочность образцов достигала 1,5 МПа, через 60 суток – 2,5 МПа, через 90 суток – 4,3 МПа и далее стабилизировалась на уровне 4,3–4,4 МПа. Модуль деформации составил 537 МПа, модуль спада – 187 МПа.

Смесь с расходом рассола 350 кг/м³ достигла более высокой прочности (7,0 МПа) на 90-е сутки, но имела подвижность только 2,5 см и не растекалась (рис. 6). При расходе рассола 500 кг/м³ подвижность увеличивалась до 12 см, но прочность на 90-е сутки снизилась до 4,1 МПа. Вариант с расходом рассола 450 кг/м³ обеспечивает достаточную подвижность для подачи насосом и высокой степени заполнения прикровельной зоны при сохранении прочности выше расчетного нормативного диапазона на 90-е сутки твердения.

Таблица 4 / Table 4

Прочностные и деформационные характеристики цементосодержащих образцов закладочного массива в процессе твердения закладочных смесей /
Strength and deformation characteristics of cement-containing backfill mixtures during curing

Показатель	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Солеотходы, кг/м ³	1 430	1 360	1 270	1 180
Рассол, кг/м ³	350	400	450	500
Цемент, кг/м ³	200	200	200	200
Предел прочности в возрасте 38 суток, МПа	2,4	1,8	1,5	1,1
Предел прочности в возрасте 60 суток, МПа	6,2	4,2	2,5	1,9
Предел прочности в возрасте 90 суток, МПа	7	5,3	4,3	4,1
Предел прочности в возрасте 110 суток, МПа	7,1	5,4	4,4	4,2
Предел прочности в возрасте 200 суток, МПа	7,2	5,2	4,3	4,25
Модуль деформации, МПа	900	693	537	466
Модуль спада, МПа	288	216	187	182

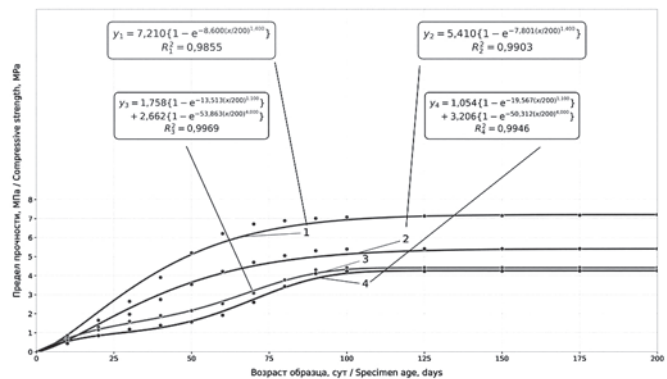


Рис. 6. Прочность цементосодержащей закладочной смеси при расходе рассола:

1 – 350; 2 – 400; 3 – 450; 4 – 500 кг/м³ /

Fig. 6. Strength of cement-containing backfill at brine dosages of:
1 – 350; 2 – 400; 3 – 450; 4 – 500 kg/m³

Локальное применение цемента только для заполнения прикровельного слоя позволяет заполнить весь объем камеры. Тем самым реологические свойства закладочной смеси с добавлением цемента обеспечивают сокращение расхода вяжущего на закладку, устраняют недозаклад в верхней части камеры.

Обоснование технологии приготовления смесей

Различие установленных требований к составам закладочных смесей обусловило разработку технологических линий, включающих четыре функциональных блока: транспортирование компонентов к подземному узлу, дозирование, смешение и подачу готовой закладочной смеси в закладываемую камеру (рис. 7). На первой стадии солеотходы смешиваются с рассчитанным количеством насыщенного рассола в пределах границы влаготдачи. При необходимости предусмотрен ввод модификаторов или заполнителей. Готовая смесь направляется на формирование основного объема консолидируемого массива. Следующая стадия дополнительно оснащается силосом для цемента и пред-

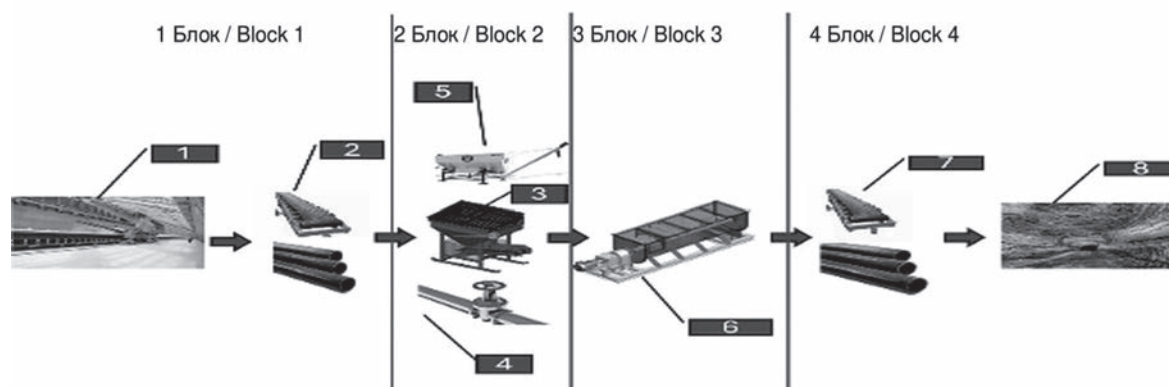


Рис. 7. Технологические линии приготовления и подачи закладочной смеси:
 1 – обогатительная фабрика; 2 – конвейер или трубопровод солеотходов; 3 – бункер-питатель; 4 – трубопровод рассола;
 5 – силос добавок или заполнителя; 6 – смеситель; 7 – закладочный конвейер; 8 – камера /
Fig. 7. Process lines for backfill preparation and delivery:
 1 – processing plant; 2 – salt-waste conveyor or pipeline; 3 – feeder bin; 4 – brine pipeline;
 5 – additive or filler silo; 6 – mixer; 7 – backfill conveyor; 8 – chamber

назначается для приготовления более подвижного состава закладочной смеси, подаваемого в прикровельную часть закладываемой камеры.

Для формирования прикровельного слоя принята производительность 23 м³/ч, согласованная с производительностью насосного оборудования, с вместимостью смесителя и допустимой продолжительностью транспортирования быстро схватывающейся смеси. В результате нижняя часть закладочного массива формируется на основе исключительно солеотходов с высокой плотностью смеси и минимальным рассоловыделением, а верхняя – из состава, способного заполнить труднодоступные прикровельные пустоты. Последовательное применение указанных составов позволит заполнить камеру и компенсировать усадку закладочного массива, в результате чего коэффициент заполнения камер будет составлять не менее 0,9.

Оценка влияния разработанной технологии на полноту извлечения запасов месторождения

Расчет потенциального ресурсного эффекта применения технологии закладки выполнен для выемочного блока, состоящего из пяти камер V_{5k} , разделенных междукамерными целиками. При одинаковой длине панели L , м, ширине камеры и целика 6,0 м и вынимаемой мощности 11,8 м объем первоначально извлекаемых запасов в пяти камерах определяется выражением

$$V_{5k} = 5 \times 6 \times 11,8 \times L = 354 L. \quad (11)$$

Объем запасов одного междукамерного целика $V_{МКЦ}$ при той же длине равен

$$V_{МКЦ} = 6 \times 11,8 \times L = 70,8 L. \quad (12)$$

После заполнения пяти камер и достижения закладочным массивом нормативных характеристик вовлечение в отработку одного междукамерного целика увеличивает извлекаемый объем относительно проектной отработки пяти камер на

$$\Delta V = \left(\frac{V_{МКЦ}}{V_{5k}} \right) \times 100 \% = \frac{70,8 L}{354 L} = 20 \%, \quad (13)$$

где ΔV – относительное увеличение извлекаемого объема запасов за счет отработки одного междукамерного целика, %.

Полученное значение роста вовлечения запасов характеризует потенциал разработанного решения. Повышение полноты извлечения запасов месторождения больше чем на 20 % не следует трактовать как уже достигнутый производственный показатель. Его реализация требует опытно-промышленной апробации в условиях отработки запасов конкретного блока, подтверждения фактической прочности закладочного массива и регламентирования последовательности выемки камер.

Обсуждение результатов

Анализ полученных результатов показывает, что формирование консолидированного закладочного массива с требуемой прочностью из солеотходов определяется не только минимизацией расхода затворителя как таковой, а сочетанием удержания рассола, уплотняемости смеси и последующего омоноличивания массива. Расход оборотного рассола 280 кг/м³ соответствует верхней границе влагоотдачи и одновременно обеспечивает наибольшую динамику набора прочности консолидированных составов закладочных смесей. Превышение расхода затворителя сопровождается выделением свободной жидкой фазы, а снижение расхода затворителя до 150–250 кг/м³ ухудшает распределение частиц в составе смеси при уплотнении. Следовательно, расход рассола должен рассматриваться как строго нормируемый структурообразующий и технологический параметр.

Опытно-промышленные исследования подтвердили, что достигнутые в лаборатории характеристики воспроизводятся только при обеспечении требуемой плотности укладки. Пневмомеханизированное заполнение закладочной смеси при угле наклона сопла 270–280° позволило получить плотность 1 590 кг/м³, ограничить усадку массива 3 % и практически исключить рассоловыделение, тогда как недостаточное уплотнение приводило к заметному снижению прочности массива. Поэтому состав смеси сам по себе не является достаточным условием для обеспечения устойчивости закладочного массива; производственный регламент закладки должен включать контроль расхода рассола, плотности, режима укладки и фактической прочности закладочного массива перед обнажением.

В отличие от известных гидравлических и пастовых составов закладочной смеси со значительным оборотом жид-

кой фазы и недозаполнением камер [7–11], разработанный подход придает массиву функцию конструктивного элемента системы разработки. Расчетный прирост извлечения запасов месторождения на 20 % требует подтверждения опытно-промышленными испытаниями отработки междукammerного целика и геомеханическим обоснованием разработки запасов конкретного блока.

Заключение

Выполненные исследования позволили обосновать дифференцированный подход к выбору состава и технологии приготовления консолидируемых закладочных смесей из отходов обогащения сильвинита.

Основные результаты заключаются в следующем:

1. По результатам полного перекрестного эксперимента, включавшего испытания 70 составов и 210 образцов, установлена граница влагоотдачи консолидированной закладочной смеси на основе солеотходов, соответствующая расходу оборотного рассола 280 кг/м³ и влажности смеси 8 %. Для принятого состава, содержащего солеотходов 1 780 кг/м³ и оборотного рассола 280 кг/м³, предел прочности образца закладочного массива при одноосном сжатии составил 2,1 МПа на 30-е сутки, 3,2 МПа на 60-е сутки и 3,6 МПа на 90-е сутки, а модуль деформации к 90-м суткам превысил 300 МПа. Снижение расхода рассола до 150–250 кг/м³ привело к снижению прочности образца закладочного массива, а увеличение расхода рассола свыше 280 кг/м³ сопровождалось выделением избыточной влаги и повышением пористости формируемого массива.

2. Опытно-промышленными испытаниями установлено существенное влияние способа укладки и плотности закладочной смеси на свойства формируемого закладочного массива. При пневмомеханизированной укладке с углом наклона сопла 270–280° достигнута максимальная плотность смеси 1 590 кг/м³, усадка ограничена 3 %, а выделение свободно-

го рассола практически исключено. Испытания штуфов закладочного массива, сформированного в четырех подземных опытно-промышленных нишах, определили прочность 2,8 МПа на 20-е сутки. Полученные результаты подтвердили консолидацию солеотходов в рудничных условиях и показывают, что наряду с регулированием состава смеси необходимо контролировать плотность и режим ее укладки, условия удаления остаточной влаги и фактическую прочность закладочного массива.

3. Для дозаполнения верхней части закладочного массива в камере подобран состав с добавлением цемента, включающий: солеотходов 1 270 кг/м³, цемента 200 кг/м³ и оборотного рассола 450 кг/м³. При таком составе закладочная смесь характеризуется подвижностью 8 см, растекаемостью 13 см и плотностью 1 920 кг/м³. Предел прочности сформированного массива составляет 2,5 МПа на 60-е сутки и 4,3 МПа на 90-е сутки, модуль деформации – 537 МПа. Состав пригоден для пневмоподачи в трубопровод и обеспечивает заполнение прикровельных пустот при относительно небольшом расходе цемента.

4. Разработана технологическая схема с двумя линиями приготовления и подачи закладочной смеси, которая позволяет готовить смесь из солеотходов и оборотного рассола и более подвижную цементсодержащую смесь дозаполнения прикровельных пустот.

5. Для расчетного блока из пяти камер установлено, что выемка одного междукammerного целика после достижения закладочным массивом нормативных характеристик обеспечивает потенциальное увеличение извлекаемого объема запасов как минимум на 20 %, значение характеризует перспективу применения разработанной технологии для конкретной расчетной схемы и не является уже достигнутым показателем по месторождению. Реализация геотехнологии требует геомеханического обоснования и опытно-промышленной апробации в более широких масштабах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Барях А.А., Смирнов Э.В., Квиткин С.Ю. и др. Калийная промышленность России: проблемы рационального и безопасного недропользования. *Горная промышленность*. 2022; (1): 41–50. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1-41-50>.
Baryakh A.A., Smirnov E.V., Kvitkin S.Yu., et al. Russian potash industry: issues of rational and safe mining. *Russian Mining Industry*. 2022; (1): 41–50. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1-41-50>.
2. Рыльникова М.В., Олейник Д.Н., Цупкина М.В. Совершенствование правовой и научно-методической базы обращения и управления отходами недропользования. *Горная промышленность*. 2024; (5S): 44–48. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-44-48>.
Ryl'nikova M.V., Oleinik D.N., Tsupkina M.V. Improvement of the legal and scientific-methodological framework for mining waste handling and management. *Russian Mining Industry*. 2024; (5S): 44–48. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-44-48>.
3. Ковальский Е.Р., Громцев К.В. Разработка технологии закладки выработанного пространства при выемке. *Записки Горного института*. 2022; 254: 202–209. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.36>.
Kovalskii E.R., Gromtsev K.V. Development of the technology of stowing the developed space during mining. *Journal of Mining Institute*. 2022; 254: 202–209. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.36>.
4. Wu A., Wang Y., Ruan Z., et al. Key theory and technology of cemented paste backfill for green mining of metal mines. *Green and Smart Mining Engineering*. 2024; 1 (1): 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.gsme.2024.04.003>.
5. Рыльникова М.В., Бергер Р.В., Яковлев И.В. и др. Техничко-технологические решения по закладке выработанного пространства при отработке глубокозалегающих пластов сильвинита. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2024; (S2): 167–176. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20240214>.
Ryl'nikova M.V., Berger R.V., Yakovlev I.V., et al. Backfill technologies and designs for deep-level sylvinitic mining. *Physicotechnical Problems of Mineral Resource Development*. 2024;(S2):167–176. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20240214>.
6. Коротченкова О.В. Минералогические особенности соляных пород Гремячинского месторождения калийных солей. *Стратегия и процессы освоения георесурсов: сборник научных трудов*. Пермь, 2018; 16: 8–11.
Korotchenkova O.V. Mineralogical features of salt rocks of the Gremyachinskoye potash deposit. *Strategy and Processes of Geo-resources Development: Collection of Scientific Papers*. Perm: 2018; 16: 8–11. (In Russ.).
7. Рыльникова М.В., Бергер Р.В., Яковлев И.В. и др. Классификация технологий закладки для условий подземной разработки соляных месторождений. *Горная промышленность*. 2024; (5S): 64–70. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-64-70>.

- Rylnikova M.V., Berger R.V., Yakovlev I.V., et al. Classification of backfilling technologies for underground mining of salt deposits. *Russian Mining Industry*. 2024; (5S): 64-70. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-64-70>.
8. Kovalsky E., Kongar-Syuryun C., Morgoeva A., et al. Backfill for advanced potash ore mining technologies. *Technologies*. 2025; 13 (2): 60. <https://doi.org/10.3390/technologies13020060>.
 9. Jin R., Wang X., Zhang S., et al. Slurry transportation characteristics of potash mine cemented paste backfills via loop test processing. *Processes*. 2024; 12 (12): 2929. <https://doi.org/10.3390/pr12122929>.
 10. Pinkse T., Quensel R., Lack D., et al. Introducing a new approach for the stowage of waste brines from potash mines of the Werra district in Germany as a measure to ensure the safe and sustainable continuation of potash extraction and processing. *Proceedings of the 27th World Mining Congress*. Montreal, 2023: 127-134.
 11. d'Obyrn K. Selection of backfilling technology works in the Ksawer chambers complex of the Wieliczka Salt Mine. *Górnictwo i Geoinżynieria*. 2012; 36 (1): 107-115.
 12. Радченко Д.Н., Бергер Р.В., Татарников В.И. и др. Экспериментальное исследование характера и последствий взаимодействия соляных пород с гидрозакладочными рассолами при подземной разработке месторождений калийных солей. *Маркшейдерия и недропользование*. 2023; (6): 60-67. https://doi.org/10.56195/20793332_2023_6_60_67.
Radchenko D.N., Berger R.V., Tatarnikov V.I., et al. Experimental study of the nature and consequences of interaction of salt rocks with hydrofilling brines during underground development of potassium salt deposits. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2023; (6): 60-67. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2023_6_60_67.
 13. Hu Y., Hu R., Zhang B., et al. Research on mechanical properties and mix proportion design of solid waste-based cemented paste backfill. *Case Studies in Construction Materials*. 2024; 21: 03618. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03618>.
 14. Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Комашенко В.И. и др. Управление свойствами твердеющих смесей при закладке выработанного пространства рудных месторождений. *Записки Горного института*. 2020; 243: 285-292. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.3.285>.
Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Komashchenko V.I., et al. Management of hardening mixtures properties when stowing mining sites of ore deposits. *Journal of Mining Institute*. 2020; 243: 285-292. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.3.285>.
 15. ГОСТ 32721–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Песок природный и дробленый. Определение насыпной плотности и пустотности. М.: Стандартинформ; 2019.
GOST 32721–2014. Automobile roads of general use. Natural and crushed sand. Determination of bulk density and voids. Moscow: Standartinform; 2019. (In Russ.).
 16. Р 50.1.040–2002. Статистические методы. Планирование экспериментов. Термины и определения. М.: ИПК Издательство стандартов; 2002: 40.
R 50.1.040–2002. Statistical methods. Design of experiments. Terms and definitions. Moscow: IPK Standards Publishing House; 2002: 40. (In Russ.).
 17. Татарников В.И., Бергер Р.В. Результаты опытно-промышленных испытаний условий физико-механических характеристик консолидированного закладочного массива на основе солеотходов Гремячинского месторождения. *Горная промышленность*. 2025; (5S): 69-73. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5S-69-73>.
Tatarnikov V.I., Berger R.V. Results of pilot-scale industrial tests on the physical and mechanical properties of consolidating backfill based on salt waste from the Gremyachinskoye deposit. *Russian Mining Industry*. 2025; (5S): 69-73. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5S-69-73>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Валентин Игоревич Татарников – аспирант отдела проблем моделирования и управления горнотехническими системами, младший научный сотрудник лаборатории интеллектуальных методов мониторинга горнотехнических систем, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация;
e-mail: valentinpvlparker@gmail.com

Критерии авторства:

Автор выполнил постановку задачи, планирование и проведение исследований, обработку и интерпретацию результатов, подготовку и редактирование рукописи.

Конфликт интересов:

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 20.07.2026

Поступила после рецензирования: 27.07.2026

Принята к публикации: 03.08.2026

ABOUT THE AUTHORS

Valentin I. Tatarnikov – Postgraduate Student, Department of Challenges in Modelling and Management of Mining Systems; Junior Researcher, Laboratory of Intelligent Monitoring Methods of Mining Systems, Academician N. V. Melnikov Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;
e-mail: valentinpvlparker@gmail.com

Contribution:

The author formulated the research problem, planned and conducted the study, processed and interpreted the results, and prepared and revised the manuscript.

Conflict of interest:

The author declares no conflict of interest.

Article info

Received: 20.07.2026

Revised: 27.07.2026

Accepted: 03.08.2026