

ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.693

ТЕХНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ЗАКЛАДКЕ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА ПРИ ОТРАБОТКЕ ГЛУБОКОЗАЛЕГАЮЩИХ ПЛАСТОВ СИЛЬВИНИТА

**М. В. Рыльникова, Р. В. Бергер, И. В. Яковлев,
В. И. Татарников, П. О. Зубков**

*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН,
E-mail: rylnikova@mail.ru, Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

Для снижения параметров деформирования горных пород, склонных к пучению и пластическому деформированию, развитию гео- и газодинамических явлений, предложена технология формирования консолидированного закладочного массива на основе солеотходов и оборотного рассола обогатительной фабрики с расходом его в пределах границы влагоотдачи. Выполнен комплекс лабораторных исследований по поиску составов закладочной смеси, адаптированных к условиям разработки глубокозалегающих калийных месторождений с оценкой их деформационных и прочностных характеристик. Представлены новые принципы и технико-технологические решения по доставке закладочных материалов и извлечению запасов глубокозалегающих пластов сильвинита путем создания в очистном подземном пространстве горнотехнических конструкций, обеспечивающих формирование консолидированных закладочных массивов с коэффициентом заполнения выработанного пространства, близким к единице. Это позволит увеличить извлечение сильвинита за счет частичной отработки запасов междукammerных и барьерных целиков.

Месторождение калийных солей, глубокое залегание, полнота освоения, нелинейное деформирование, консолидированная закладка, закладочная смесь, технология формирования закладочного массива, доставка компонентов, логистика

DOI: 10.15372/FTPRPI20240214
EDN: XGXOKO

Сохраняющаяся в мире тенденция возрастающего спроса на калийные удобрения обусловлена увеличением объемов сельскохозяйственного производства. Она определяет необходимость изыскания принципиально новых высокоэффективных технологий ведения горных работ на месторождениях калийных солей, адаптированных к стремительно усложняющимся горно-геологическим и горнотехническим условиям [1 – 7]. Неизбежное увеличение глубины отработки калийных месторождений связано прежде всего с высоким риском развития зон повышенного горного давления, как следствие, совершенствованием существующих способов поддержания выработанного пространства.

В мировой практике одним из наиболее распространенных способов заполнения выработанного пространства при подземной разработке калийных месторождений является гидроза-

кладка [8]. Существенный недостаток ее применения — переувлажнение бортов и почвы выработок с понижением прочности соляных пород и возникновение риска развития высоких пластических деформаций, что влечет за собой снижение несущей способности целиков и нарушение целостности водозащитной толщи [9–10]. Кроме того, применение гидрозакладки в условиях освоения подземных рудников по добыче калийных солей не способно обеспечить коэффициент заполнения выработанного пространства закладочной смесью (ЗС), близкий к 1.0 (100 %), для последующего извлечения междукammerных и барьерных целиков ввиду длительного дренажа, усадки и уплотнения формируемого закладочного массива (ЗМ). Решением указанной проблемы стало формирование консолидированного ЗМ на основе солеотходов с добавлением затворителя смеси (рассола или воды) в границах отсутствия водоотдачи с достижением требуемой несущей способности массива. Усовершенствование существующих принципов и технико-технологических решений по транспортированию смеси и заполнению ею выработанного пространства способно обеспечить высокую полноту закладки и утилизацию всех формируемых отходов добычи и переработки минерального сырья в недрах земли [11, 12].

Среди устоявшихся терминов до настоящего времени нет определения, отражающего суть процесса формирования монолитного ЗМ на основе солеотходов с высокой полнотой заполнения выработанного пространства [13]. Необходимость выделения смесей консолидированной закладки в самостоятельную категорию связана с тем, что их характеристики отличаются от тех, которые присущи устоявшимся видам закладок, таким как сыпучая, гидравлическая, твердеющая, льдопородная, бутобетонная и др. Консолидированные ЗС представлены соляными породами или отходами их переработки и способны в определенных условиях при заданных температурном режиме и влажности формировать монолитный ЗМ с требуемой прочностью и деформационными характеристиками.

Следует уточнить понятие монолитного консолидированного ЗМ. Монолитный ЗМ формируется в ходе твердеющей, инъекционной, льдопородной, бутобетонной и консолидированной закладки. Монолитный консолидированный ЗМ образуется в результате кристаллизации солеотходов под воздействием затворителя (воды или насыщенного раствора солей того же состава), при этом расход затворителя определяется границами водоотдачи в заданных параметрах рудничной атмосферы — горного давления, температуры и влажности [14]. Консолидированная закладка уплотняется механическим способом или под действием собственной силы тяжести, характеризуется отсутствием отжима рассолов, процессами усадки и кристаллизации, обеспечивая по мере кристаллизации солей формирование монолитного и прочного закладочного массива.

СПЕЦИФИКА УСЛОВИЙ ЗАЛЕГАНИЯ КАЛИЙНЫХ ПЛАСТОВ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ

Деятельность горнодобывающих предприятий тесно связана с привлечением в эксплуатацию новых участков месторождений и увеличением глубины горных работ при усложнении горно-геологических и горно-химических условий разработки. Переход к разработке соляных месторождений на больших глубинах сопровождается ростом пластических деформаций соляных пород, окружающих горные выработки. Залегание вблизи почвы промышленных пластов слабых пород в условиях больших глубин приводит к интенсивному их выдавливанию в выработку, пучению почвы. Повышенное горное давление и температура на таких глубинах изменяют физико-механические свойства пород, делая их более пластичными и увеличивая риск обрушений в горных выработках ввиду развития процессов нелинейного деформирования горных пород.

На участках первоочередной выемки соляного рудника глубина промышленного сильвинитового пласта превышает 1100 м, вблизи кровли промышленного пласта залегают достаточно

прочные ангидритовые и ангидрит-доломитовые породы, отличающиеся более высокой прочностью и деформационными характеристиками по сравнению с породами соляных пластов. При этом подстилающие породы представлены карналлитами и обладают меньшей прочностью, склонны к пучению, газовыделению при обнажении и подработке. Горные работы ведутся в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях, что связано с залеганием и невыдержанной мощностью соляных пластов, флексурными нарушениями и гидрогеологическими условиями. При разработке месторождений калийных солей требуется обязательное сохранение водоупорной толщи, обеспечение ее целостности и сплошности, отсутствие водопрводящих трещин. Этим объясняется необходимость применения камерной системы разработки с консолидированной закладкой выработанного пространства солеотходами. Информация о деформационных особенностях породных массивов в сложных условиях нелинейного развития пластических деформаций во вмещающих породах, о физико-механических свойствах пород отрабатываемых запасов калийных солей ограничена. В этой связи проведен комплекс исследований для обоснования требований к составу и свойствам ЗС, выбору технологии закладки, которые играют ключевую роль в обеспечении полноты освоения запасов и безопасности горных работ.

Анализ условий разработки глубокозалегающих калийных месторождений подтвердил необходимость создания в выработанном пространстве горнотехнических конструкций на основе увлажненных солеотходов, обеспечивающих формирование консолидированных ЗМ с коэффициентом заполнения выработанного пространства, близким к 1, путем размещения ЗС самоходной техникой по аналогии с опытом закладки камер сухими солеотходами. Консолидированные ЗМ на основе солеотходов и рассола должны обеспечивать: нормативную прочность при перемещении по ним самоходного оборудования; нормативную прочность ЗМ по фактору вертикальных обнажений при отработке смежных междуканальных целиков; полноту заполнения выработанного пространства; отсутствие рассолоотдачи для исключения разупрочнения целиков и пучения пород почвы.

Нормативная прочность ЗМ при работе технологического оборудования зависит от типа и веса машины, перемещаемой по ЗМ, размеров колес, давления воздуха в шинах, формы и вида протектора, а также усилия черпания при погрузке. В зависимости от принятой технологии ведения закладочных работ и применяемого оборудования для закладки выработанного пространства нормативная прочность ЗМ не выше 3 МПа [15]. По фактору перемещения самоходного оборудования формируемые консолидированные ЗМ должны иметь прочность на одноосное сжатие в пределах 1 МПа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПОИСКУ СОСТАВОВ ЗАКЛАДОЧНОЙ СМЕСИ ДЛЯ УСЛОВИЙ РАЗРАБОТКИ ГЛУБОКОЗАЛЕГАЮЩИХ КАЛИЙНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Анализ ранее опубликованных результатов исследований, направленных на оценку свойств солеотходов в ходе их длительного хранения в отвалах, показал, что солеотходы в отвале с течением времени консолидируются с формированием достаточно прочных массивов. Спустя 2 года хранения в отвале после дренажа рассолов в результате консолидации солеотходов предел прочности отобранных сухих образцов превысил 3 МПа. При этом снижался показатель рассолонасыщения, сокращалась пористость в массиве. Аналогичные процессы консолидации протекают в подземных горных выработках, заложенных сухой смесью солеотходов, исчисляясь годами ввиду длительного дренажа и уплотнения гидравлической ЗС, ее усадки и высыхания. Интенсификация протекания процессов естественной консолидации ЗМ на основе солеотходов может быть достигнута на базе изыскания технологии формирования консолидированных ЗМ с оптимизацией расхода солеотходов, затворителя и вяжущих.

Комплексные экспериментальные исследования по подбору состава консолидированных ЗС на основе солеотходов включали изучение исходных свойств материалов и подбор оптимальных составов ЗС, определение их прочностных и деформационных характеристик в динамике набора прочности в условиях одноосного и объемного сжатия. Установлен оптимальный состав ЗС: 1700 кг/м³ солеотходов при расходе затворителя в границе рассолоотдачи 280 кг/м³ смеси. Через 10 сут выдержки в климатической камере прочность всех образцов смеси установленного состава превысила 1.5 МПа, в возрасте 50 сут — 2.2 МПа, в возрасте 60 сут — 3.2 МПа, что достаточно для технологического обнажения ЗМ высотой до 9.2 м. Анализ динамики набора прочности образцами в течение 90 сут выдержки в климатической камере подтвердил, что максимальная прочность соответствует полному высыханию образца и кристаллизации соли из рассола (табл. 1). Образцы, затворенные при расходах рассола менее 280 кг/м³ смеси, набирают меньшую прочность. Так, средняя прочность образцов с расходом рассола 250 кг/м³ в возрасте 200 сут в 1.12 раз ниже, чем образцов, затворенных в пределах границы влагоотдачи. В аналогичный период прочность образца при расходе рассола 200 кг/м³ ниже в 1.3 раза, при расходе рассола 150 кг/м³ — ниже в 2 раза по сравнению с образцами, затворенными при расходе рассола в предельной границе влагоотдачи.

ТАБЛИЦА 1. Динамика набора прочности кубических образцов закладочного массива с размером ребра 70 мм, с контролем остаточной влажности

| Состав, кг/м ³ | | Возраст образца, сут | Влажность, % | Масса, г | Потеря, г | Предел прочности, МПа |
|---------------------------|--------|----------------------|--------------|----------|-----------|-----------------------|
| Солеотходы | Рассол | | | | | |
| 1700 | 280 | 1 | 9.0 | 680.0 | 0 | 0.3 |
| | | 5 | 7.1 | 666.7 | 13.3 | 0.4 |
| | | 10 | 5.8 | 654.1 | 12.6 | 0.4 |
| | | 15 | 4.9 | 643.7 | 10.4 | 0.5 |
| | | 20 | 3.9 | 635.4 | 8.3 | 0.6 |
| | | 25 | 3.4 | 628.4 | 7.0 | 0.8 |
| | | 30 | 2.9 | 622.5 | 5.9 | 1.1 |
| | | 45 | 2.2 | 619.8 | 2.7 | 1.4 |
| | | 50 | 1.5 | 618.1 | 1.7 | 2.0 |
| | | 60 | 0.4 | 616.3 | 1.8 | 3.1 |
| | | 90 | 0.2 | 616.2 | 0.1 | 3.3 |

Определены деформационные характеристики консолидированного ЗМ в условиях одноосного сжатия на образцах кубической формы. Модуль деформации образцов составляет на 28 сут — 100 МПа, на 60 сут — 250 МПа, на 90 сут после полного высыхания и консолидации массива — 300 МПа (рис. 1).

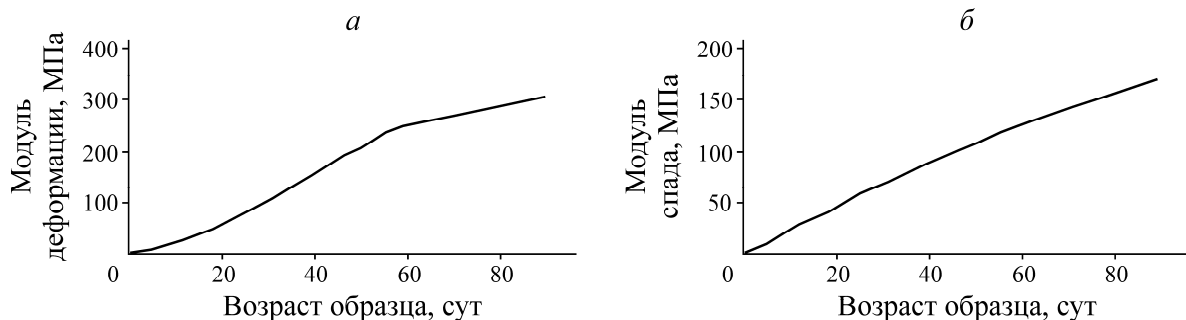


Рис. 1. Модули деформации (а) и спада (б), полученные при испытании кубических образцов при одноосном сжатии в динамике набора прочности

При выборе параметров технологии подземной разработки глубокозалегающих калийных месторождений определяющее значение имеют деформационные характеристики ЗМ в условиях объемного сжатия. Для испытаний подготовлены цилиндрические образцы диаметром 42 мм и высотой 84 мм. Деформационные характеристики ЗМ на основе солеотходов и рассола в условиях объемного сжатия свидетельствуют, что при увеличении бокового давления в 2 раза прочность образцов повышается в 1.45 раза (рис. 2).

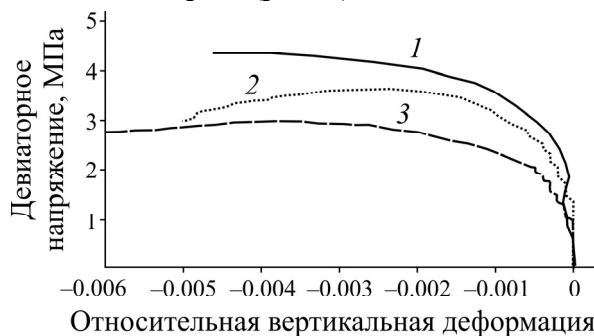


Рис. 2. Продольное деформирование образцов на основе солеотходов в количестве 1700 кг/м³ и рассола 280 кг/м³ на 30 сут консолидации при боковом давлении в испытаниях, МПа: 1 — 2; 2 — 1.5; 3 — 1

Необходимые условия для перехода ЗМ в состояние объемного сжатия в короткие сроки создаются путем дозакладки камер под кровлю. Такое решение позволяет достигнуть высокую полноту заполнения выработанного пространства под кровлю с целью плавной передачи нагрузки от подрабатываемой водозащитной толщи и создать условия для отработки запасов междукammerных и барьерных целиков камерами последующих очередей.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАКЛАДОЧНЫХ МАССИВОВ С ВЫСОКОЙ ПОЛНОТОЙ ЗАПОЛНЕНИЯ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА

В соответствии с концепцией формирования в очистных камерах консолидированных ЗМ на базе смесей из солеотходов в ряде случаев с добавлением вяжущих выполнялся анализ текущей горнотехнической ситуации на калийных месторождениях и систематизированы предпроектные проработки в области технологии закладки выработанного пространства. В ходе оценки возможностей обеспечения полноты заполнения камер смесями на основе пород от проходки выработок погрузочно-доставочными машинами (ПДМ) установлено, что в России успешно применяются возможности заложения выработанного пространства условно сухими солеотходами с достаточно высокой полнотой заполнения. Визуальным обследованием определено, что недозакладка камеры составляет 0.4–0.6 м.

Достаточно обширный опыт механизированной закладки выработок самоходными вагонами накоплен на рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей. На рудниках ООО «ЕвроХим-УКК», ПАО «Уралкалий» коэффициент заполнения камер составляет 60–80 % и определяется габаритами самоходного вагона по высоте. С учетом угла залегания сильвинитового пласта со средним падением до 12–14° коэффициент заполнения очистных камер варьирует в среднем в пределах 65–90 %.

На базе выполненного анализа существующих технологических схем закладки выработанного пространства сухими солеотходами предложены принципы организации работ, обеспечивающие высокую полноту заполнения выработанного пространства (рис. 3). Согласно схеме, представленной на рис. 3, солеотходы, подаваемые конвейерами по выработкам главного направления, в узле перегрузки поступают на панельный закладочный конвейер, откуда направляются к технологической камере для приготовления ЗС.

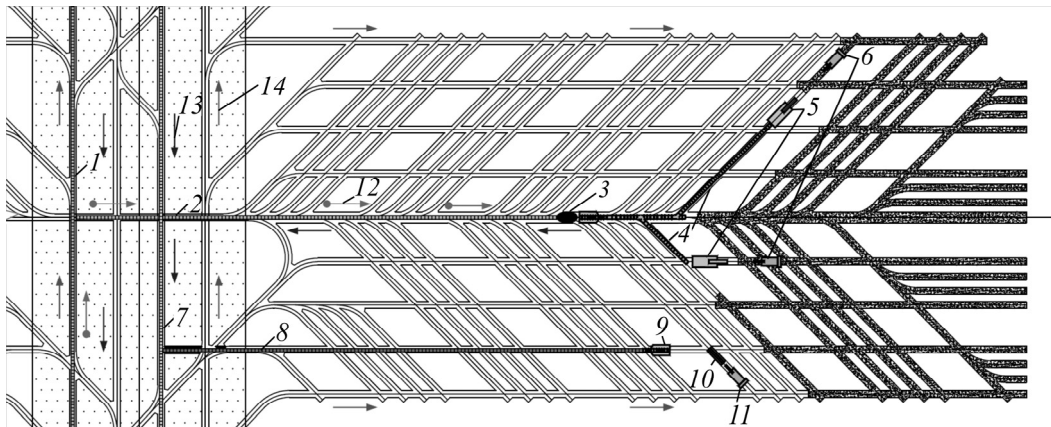


Рис. 3. Схема организации работ в панели при ведении закладочных работ с применением закладочного комплекса и средств механизации для уплотнения массива: 1 — панельный закладочный штрек с закладочным конвейером; 2 — блоковый закладочный конвейер; 3 — установка приготовления закладочной смеси; 4 — участковый конвейер; 5 — консоль/метатель; 6 — троллейная ПДМ; 7 — магистральный конвейер; 8 — блоковый конвейер очистных работ; 9 — дробилка-питатель; 10 — самоходный вагон; 11 — проходческий комбайн; 12 — направление движения ЗС; 13 — исходящая струя воздуха; 14 — свежая струя воздуха

Предложены технологии ведения закладочных работ с учетом специфики залегания и мощности разрабатываемых пластов сильвинита в камерах высотой 3, 6 и 13 м.

В наиболее сложном варианте закладки камер высотой 3 м целесообразно рассмотреть условия послойного формирования консолидированного массива мощностью 0,8–1,5 м для пригрузки почвы и целиков в нижней части камер (рис. 4).

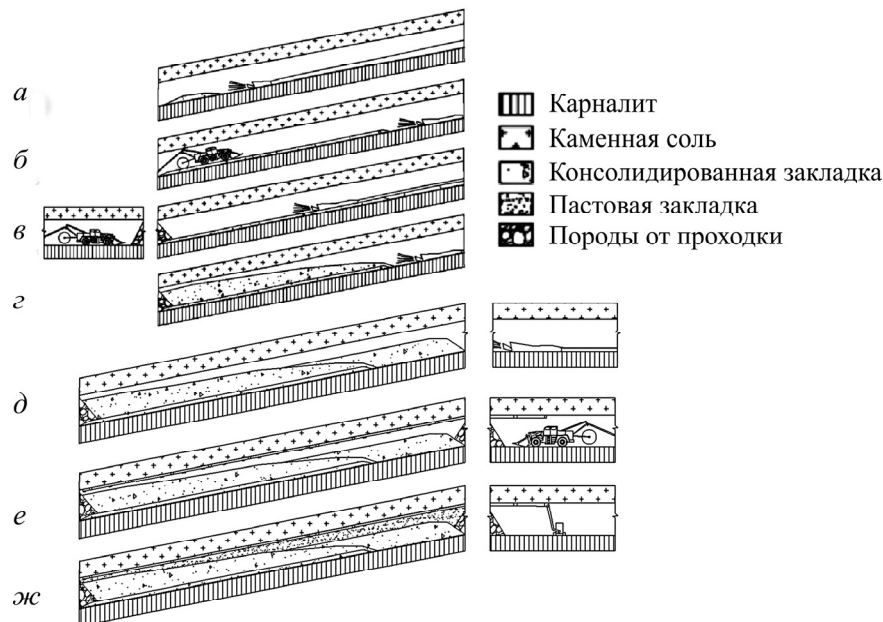


Рис. 4. Принципиальная технологическая схема ведения закладочных работ в камерах высотой 3 м: а — заполнение первого слоя закладочной смесью с помощью метателей; б — укатывание сформированного слоя при помощи ПДМ с прицепным катком; в — формирование насыпной переемычки с одной стороны камеры; г, д — заполнение камеры с помощью метателя без укатывания; е — формирование второй насыпной переемычки; жс — заполнение последнего слоя твердеющей закладочной смесью

Для уплотнения ЗМ применяются участковые конвейеры, трубопроводный транспорт или ПДМ с последующим проведением работ по дозакладке камер под кровлю посредством высоконапорных насосов. Согласно технологической схеме (рис. 4), первый слой на основе солеотходов отсыпается конвейерами или метателями и уплотняется с использованием средств механизации на высоту до 0,8 м. При этом в ходе выполнения работ обеспечивается выравнивание первого слоя ковшом ПДМ с пригрузкой и укатывание ЗС в почве выработок, особенно на контакте с целиками. После формирования упрочненного слоя в камере формируется ЗМ под кровлю по трубопроводу, уложенному в кровле камеры с подачей ЗС под давлением.

Работы по дозаполнению камер под кровлю бетононасосом предусматривают установку пневмопоршневого насоса со стороны вывода трубопровода, монтаж соединительных патрубков, проверку на герметичность при нагнетании ЗС в камеру. После выполнения этих работ в верхнюю точку камеры с уклоном вниз подается ЗС с добавлением цемента для заполнения пустот (рис. 5). Закладочный слой с добавлением цемента характеризуется повышенной подвижностью и призвана обеспечивать уплотнение нижележащего слоя.

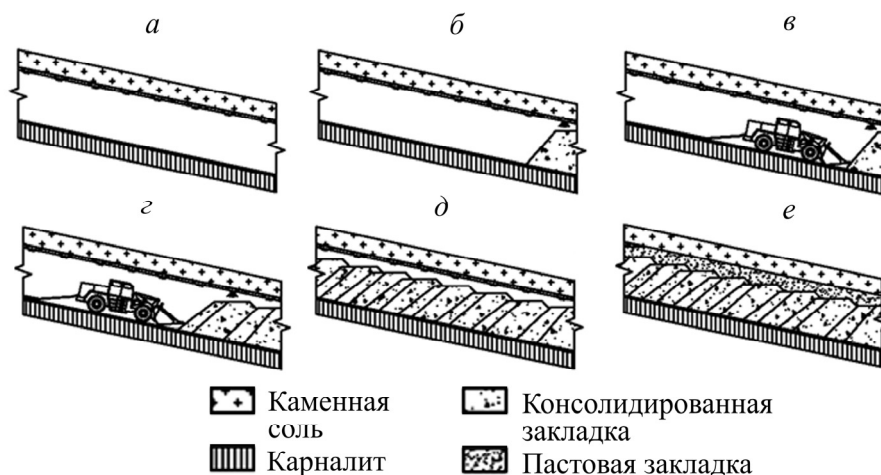


Рис. 5. Вариант уплотнения закладочной смеси на основе солеотходов с применением троллейной ПДМ: а — монтаж трубопровода; б — формирование первой насыпи закладочной смесью; в — уплотнение закладочного массива с помощью ПДМ; г — формирование последующих слоев закладочного массива; д — сформированная закладочная камера с недозакладом до 5 %; е — заполнение недозаклада твердеющей смесью

На первом этапе заполнения выработанного пространства подаются увлажненные солеотходы в границах влагоотдачи, проводится выравнивание и уплотнение по всей площади механическими средствами. При этом в процессе уплотнения ЗС должна быть достигнута нормативная прочность по фактору безопасного передвижения самоходной техники с возможностью последующего технологического обнажения ЗМ. Требуется обеспечение деформационных характеристик для плавного прогиба потолочины и передачи нагрузки от пород водозащитной толщи с исключением формирования в ней водопроводящих трещин. В зависимости от высоты камеры уплотнение слоя проводится до границы с кровлей, определяемой по условиям работы самоходного оборудования.

ЛОГИСТИЧЕСКАЯ СХЕМА ДОСТАВКИ ЗАКЛАДОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРИГОТОВЛЕНИЯ СМЕСИ И РАЗМЕЩЕНИЕ ЕЕ В ОЧИСТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Для соблюдения параметров технологии закладки на базе формирования консолидированных ЗМ требуется поиск решений по высокопроизводительной подаче солеотходов и рассола в единой логистической системе прямых и обратных грузопотоков рудника. В калийных руд-

никах транспортировка материалов для создания ЗМ осуществляется обратным грузопотоком с поверхности, который отличается от прямого потока постоянством параметров во времени и равномерностью. При этом особенностью закладочного грузопотока калийных рудников является отсутствие бункеров или складских помещений больших объемов для промежуточного хранения ЗМ, что обуславливает необходимость автоматизации процессов транспортирования.

При формировании консолидированного ЗМ возможны следующие виды транспортирования. Первый предусматривает разделенную транспортировку солеотходов и соляных рассолов по самостоятельным транспортным путям к технологической закладочной камере с последующим приготовлением ЗС, при которой компоненты смешиваются перед укладкой в выработанном пространстве. Второй — совместное гидротранспортирование смеси в системе трубопроводного транспорта для частичного обезвоживания до предела границы влагоотдачи с выдачей отжимного рассола по трубопроводу на поверхность для использования в оборотном цикле обогатительной фабрики.

На время ведения работ в подземном блоке в камере размещается основное оборудование для приготовления закладочных смесей, которые затем транспортируются и размещаются в выработанном пространстве с последующей дозакладкой пустот (рис. 6).

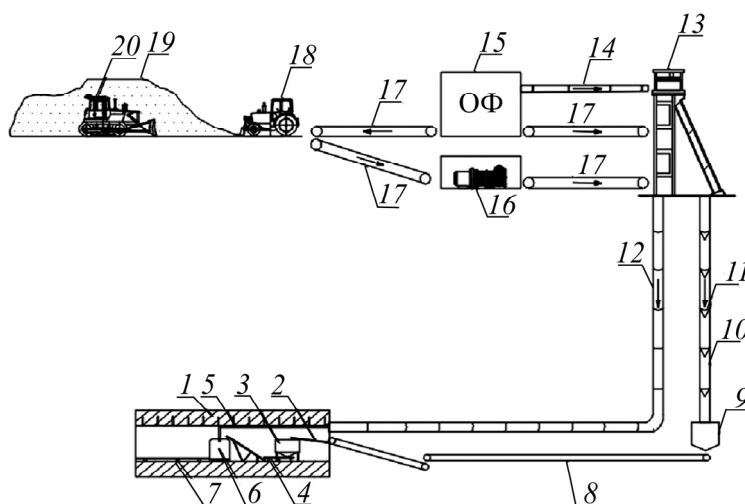


Рис. 6. Логистическая схема движения закладочных материалов и смеси: 1 — техническая камера; 2 — конвейер для подачи солеотходов; 3 — бункер-питатель; 4 — питающий конвейер; 5 — участковый трубопровод с рассолом; 6 — смеситель; 7 — участковый закладочный конвейер; 8 — магистральная конвейерная линия; 9 — приемный бункер; 10 — солеспуск; 11 — буферный гаситель; 12 — подземный рассолопровод; 13 — ствол комплекс подачи солеотходов; 14 — поверхностная часть рассолопровода; 15 — обогатительная фабрика; 16 — модуль обезвоживания отходов обогащения; 17 — конвейер; 18 — фронтальный погрузчик; 19 — солеотвал; 20 — бульдозер-рыхлитель

Линия транспортирования компонентов ЗС для формирования консолидированного ЗМ предусматривает перемещение условно сухих солеотходов, обезвоженных до влажности 5 %, и рассола, подаваемого по трубопроводному солеспуску ствола на горизонт очистных работ. Далее они следуют по магистральным линиям ленточных конвейеров в выработки и в панельные закладочные штреки, откуда подаются к блоку, находящемуся в закладке. В блоке устанавливается местный короткий блоковый конвейер до подземной технологической камеры приготовления ЗС, где в смесителе обеспечивается перемешивание дозируемых солеотходов и рассола.

Использование солеотходов, включающих хвосты обогащения, шламы, рассолы, в качестве ЗМ с заданными технологическими характеристиками для формирования требуемых реологических свойств смеси, прочностных и деформационных характеристик консолидируемого ЗМ обеспечивает утилизацию всех твердых и жидких отходов производства. В этой связи требуется внедрение дополнительных технологических модулей в логистическую систему калийных рудников для обеспечения необходимых транспортальных характеристик и физико-механических свойств ЗМ.

ВЫВОДЫ

Исследования по выбору состава консолидированных закладочных смесей на основе солеотходов с учетом специфики условий освоения глубокозалегающих месторождений калийных солей предполагают комплекс методов изучения исходных свойств материалов, входящих в состав закладочной смеси, подбор оптимальных составов смеси и изучение ее реологических, прочностных и деформационных характеристик в динамике набора прочности в условиях одноосного и объемного сжатия. Сформулированы новые принципы и разработаны технико-технологические решения по извлечению запасов глубокозалегающих пластов сильвинита системой разработки с формированием консолидированного закладочного массива. Разработанная технология формирования консолидированного закладочного массива направлена на достижение максимальной плотности смеси при высокой степени заполнении выработанного пространства, приближая коэффициент заполнения к единице.

Технология предусматривает интенсификацию процессов уплотнения смеси на основе солеотходов и рассола с последующим дозакладом под кровлю твердеющей смеси при добавлении цемента, что позволяет не только увеличить степень извлечения калийного сырья, но и обеспечить полную утилизацию солеотходов при решении вопросов промышленной безопасности горных работ с формированием единой технологической и логистической системы подземного рудника. Высокопроизводительная подача солеотходов и рассолов на рудник для их дальнейшего смешения и уплотнения обеспечивает полноту заполнения выработанного пространства и возможность извлечения запасов междукammerных и барьерных целиков. Предложенная технология, в отличие от методов гидрозакладки, является экономически более затратной и характеризуется большими технологическими рисками при реализации технологической схемы рудника. Однако она обладает неоспоримым преимуществом — открытие новых перспектив для повышения извлечения целиков калийного сырья при безопасной утилизации всех отходов, что обеспечивает устойчивое развитие горнодобывающей отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левкевич Р. Е., Сенотрусова С. В. Производство минеральных удобрений в России: тенденции развития отрасли // *Инновации и инвестиции*. — 2023. — № 8.
2. Тибилев Д. П., Домахина Ю. А. Развитие потенциала добычи калийных руд, производства сульфатных удобрений на территории Калининградской области и реализации сульфата калия на мировом рынке // *Экономика промышленности*. — 2020. — Т. 13. — № 2. — С. 225–232.
3. Антипин Д. А. Проблемы и перспективы рынка калийных удобрений в России и за рубежом // *Скиф*. — 2021. — № 3 (55).
4. **Natural Resources** Canada: Potash facts. URL: <https://www.nrcan.gc.ca/our-natural-resources/minerals-mining/minerals-metalsfacts/potash-facts/20521>
5. **Sfgate**: The Advantages of Potassium Fertilizer. URL: homeguides.sfgate.com/advantages-potassium-fertilizer-75526.html
6. Заяц Е. Ю. Прогноз развития калийного рынка // *Проблемы управления* (Минск). — 2014. — № 4 (53). — С. 89–94.

7. Нуров Р., Гурбанова О., Аннаев Г., Нуров А. Роль химии в сельском хозяйстве // *Cognitio Rerum*. — 2024. — № 1. — С. 34–37.
8. Крупник Л. А., Шапошник Ю. Н., Шапошник С. Н., Турсунбаева А. К. Технология закладочных работ на горнодобывающих предприятиях Республики Казахстан // *ФТПРПИ*. — 2013. — № 1. — С. 95–105.
9. Рыльникова М. В., Яковлев И. В., Сахаров Е. М., Бергер Р. В. Обоснование структуры и параметров логистической схемы подземного рудника при разработке глубокозалегающих месторождений калийных солей системами с закладкой выработанного пространства // *Горн. пром-сть*. — 2023. — № 2. — С. 134–139.
10. Радченко Д. Н., Бергер Р. В., Татарников В. И., Зубков П. О. Экспериментальное исследование характера и последствий взаимодействия соляных пород с гидрозакладочными рассолами при подземной разработке месторождений калийных солей // *Маркшейдерия и недропользование*. — 2023. — № 6 (128). — С. 60–67.
11. Pinkse T., Quensel R., Lack D., Zimmermann R., Fliss T., Scherzberg H., Marx H., Niessing S., Deppe S., Eichholtz M., and Waldmann L. 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, Conf. Int. Mine Water Association “Mine water: Technological and Ecological Challenges”, Russia, Perm, 2019.
12. Горное дело. Терминологический словарь / авторы-сост. А. В. Атрушкевич, Т. Н. Бочкарева, В. С. Забурдяев. — М.: Горная книга, 2016. — 635 с.
13. Каплунов Д. Р., Радченко Д. Н. Выработанные пространства недр: принципы многофункционального использования в полном цикле комплексного освоения месторождений твердых полезных ископаемых // *Горн. журн.* — 2016. — № 5. — С. 28–33.
14. Закладочные работы в шахтах. — М.: Недра, 1989. — 398 с.
15. Справочник по разработке соляных месторождений / под ред. Р. С. Пермякова. — М.: Недра, 1986. — 212 с.

Поступила в редакцию 06/II 2024

После доработки 01/III 2024

Принята к публикации 14/III 2024