

УДК 622.272.2:622.36

DOI: 10.46698/VNC.2023.34.99.014

Оригинальная статья

Твердеющие закладочные смеси на калийных рудниках: перспективные материалы, регулирующие напряжённно-деформированное состояние массива

Ч.Б. Конгар-Сюрюн^{ID}, Е.Р. Ковальский^{ID}

Санкт-Петербургский горный университет, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург,
Васильевский остров, 21 линия, д.2,
e-mail: s225063@stud.spmi.ru

Статья поступила: 20.10.2023, доработана: 30.11.2023, принята к публикации: 04.12.2023

Резюме: Актуальность. Анализ опыта отработки калийных месторождений показал, что традиционно применяемые технологии извлечения характеризуются низкой эффективностью. Добыча калийных солей, в основном, осуществляется с применением систем с естественным поддержанием очистного пространства, что предопределяет высокие потери в оставляемых целиках. При этом такие технологии не всегда обеспечивают сохранность водозащитной толщи, нарушение которой ведёт к проникновению над-солевых вод в рудник, вызывает «размывание» целиков ввиду высокой растворимости соляных пород и является причиной полного затопления рудников. **Целью работы** является анализ ранее проведённых исследований, где рассмотрены способы регулирования напряжённого состояния массива и снижения интенсивности деформационных изменений подработанного массива при отработке месторождений калийных солей и разработка вектора развития технологий и материалов для заполнения образующихся пустот, которые позволят регулировать нагрузку от вышележащего массива и препятствовать боковым деформациям оставляемых целиков. **Методология.** Для достижения поставленной цели был проведён анализ практики ведения горных работ на калийных месторождениях в совокупности с обзором ранее выполненных исследований в области извлечения полезных ископаемых подземным способом. **Результаты исследования.** В статье проанализированы составы закладочной смеси, применяемые в горной промышленности. Выделены факторы, влияющие на рецептуру закладочной смеси и приведены перспективные материалы для условий калийных рудников.

Ключевые слова: калийные соли, отходы обогащения, закладочные смеси, система разработки, калийный рудник, напряжённно-деформированное состояние.

Для цитирования: Конгар-Сюрюн Ч.Б., Ковальский Е.Р. Твердеющие закладочные смеси на калийных рудниках: перспективные материалы, регулирующие напряжённно-деформированное состояние массива. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(4): 177-187. DOI: 10.46698/VNC.2023.34.99.014

DOI: 10.46698/VNC.2023.34.99.014

Original paper

Hardening backfill at potash mines: promising materials regulating stress-strain behavior of rock mass

Ch.B. Kongar-Syuryun , E.R. Kovalski 

St. Petersburg Mining University, 2, 21st Line, 199106 St. Petersburg,
Russian Federation, e-mail: s225063@stud.spmi.ru

Received: 20.10.2023, revised: 30.11.2023, accepted: 04.12.2023

Abstract: Relevance. Analysis of potash mining experience has shown that traditional technologies are characterized by low efficiency. Method with natural support is mainly used for potash mining, which predetermines high losses in the remaining pillars. At the same time, such technologies do not always ensure the preservation of water protection strata. The violation of water protection strata leads to the penetration of above-salt water into the mine, causes “erosion” of pillars due to the high solubility of salt rocks, and causes complete flooding of mines. **Aim** of the article is analysis of earlier studies on control and reduction of stress-strain behavior of rock mass for potash mines and development vector of technologies and materials for filling mined-out voids to control the overlying mass and prevent lateral deformations of pillars. **Methods.** To achieve this purpose, mining practices at potash deposits were analyzed in conjunction with a review of previous research on underground mineral extraction. **Results.** The paper analyzes the compositions of hardening backfill used in the mining industry. Factors influencing backfill composition are identified and promising components for potash mines conditions are given.

Keywords: potash salt, processing waste, backfill, mining method, potash mine, stress-strain behavior.

For citation: Kongar-Syuryun Ch.B., Kovalski E.R. Hardening backfill at potash mines: promising materials regulating stress-strain behavior of rock mass. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(4): 177-187. DOI: 10.46698/VNC.2023.34.99.014

Введение

В настоящее время с ростом населения Земли возрастает спрос на продукты питания. Это предполагает широкое использование неорганических удобрений, основой для производства которых являются калийные соли. Действующие и проектируемые рудники, осуществляющие добычу калийных солей, применяют системы с естественным поддержанием очистного пространства [Барях и др., 2022], что приводит к высоким потерям полезного ископаемого, оставляемого в охранных целиках, а также высокому уровню аварийности по фактору нарушения сплошности водозащитной толщи [Baryakh et al., 2001; Блохин и др., 2021; Заалишвили и др., 2022].

Перспективным способом решения представленной проблемы видится применение системы с закладкой выработанного пространства на основе твердеющих смесей [Хайрутдинов и др., 2022]. Данный способ позволит регулировать напряжённое состояние массива и снизить интенсивность его деформационных изменений.

Предлагаемые твердеющие смеси должны обеспечить создание высокопрочного искусственного массива, способного воспринимать нагрузку от подработанного массива и препятствовать боковым деформациям оставляемых целиков [Васильева и др., 2021; Zuev et al., 2019], позволяющего реализовать технологию многостадийной выемки с целью извлечения оставшихся целиков или уменьшения ширины неизвлекаемых целиков [Ковальский и др., 2023]. В данной статье приводится анализ возможных материалов, которые могут быть применены для условий калийных рудников в качестве закладки.

Методы и материалы исследования

При выборе рецептуры закладочной смеси для калийных рудников необходимо выделить факторы, определяющие специфику калийных месторождений:

- наличие нескольких мощных надсолевых водоносных горизонтов;
- водорастворимость вмещающих пород и добываемой руды;
- пластичность/текучесть соляных пород, слагающих целики;
- низкий предел длительной прочности соляных пород;
- относительно невысокая стоимость конечного продукта, затрудняющая внедрение дорогостоящих технологий разработки.

Наличие надсолевых водоносных горизонтов в совокупности с таким фактором как водорастворимость вмещающих пород и добываемой руды предопределяет применение систем разработки с удержанием кровли на целиках. При этом пластичность (текучесть) и низкий предел длительной прочности соляных пород ограничивает срок воспринимаемой целиками нагрузки и не обеспечивает полное сохранение водозащитной толщи. Таким образом, разработка экономически обоснованных составов твердеющих закладочных смесей, необходимых для внедрения многостадийной выемки на калийных рудниках, видится весьма актуальной задачей.

Результаты работы и их обсуждение

При выборе рецептуры закладочной смеси необходимо принять во внимание следующие факторы:

- нормативная прочность создаваемого искусственного массива, определяющая нагрузку подработанного массива;
- время набора прочностных свойств, от чего зависит взаимоувязка во времени очистных и закладочных работ;
- компрессионные характеристики, которые характеризуются деформационными изменениями создаваемого искусственного массива в момент набора прочности и после его полного отверждения, и определяют зависимость усадки закладочного массива от нагрузки на него;
- реологические характеристики закладочной смеси, которые характеризуют её транспортабельность, сохранение свойств на всём протяжении перемещения и удобоукладываемость;
- стоимостные показатели отдельно взятых компонентов и закладочной смеси в целом, что предопределяет стоимость закладочных работ и возводимого искусственного массива.

На расчётные значения прочностных характеристик искусственного массива влияет множество факторов: глубина ведения горных работ; принимаемая система

разработки; порядок отработки камер; очередь закладываемой камеры и другое.

Основным компонентом закладочной смеси, обеспечивающим требуемую прочность искусственного массива, является вяжущее. На большинстве рудных месторождений, обрабатываемых системами с закладкой выработанного пространства, в качестве вяжущего применяется цемент или его производные. На калийных рудниках, где в качестве заполнителя выступают солеотходы, а в качестве затворителя – насыщенный соляной раствор, может быть применен только магнезиальный цемент. Но относительно невысокая стоимость конечного продукта затрудняет применение закладочных смесей на основе цементного вяжущего. Затраты на ведение закладочных работ составляют до 30% от общей себестоимости 1 тонны руды, а из них до 75% приходится на стоимость вяжущего [Benzaazoua et al., 2010; Peyronnard, Benzaazoua, 2012].

В целях оптимизации состава в качестве вяжущего наиболее перспективным вариантом видятся доменные гранулированные шлаки. Применение шлаков позволит существенно снизить расходы на вяжущее, что, безусловно, приведёт к уменьшению стоимости возведения закладочного массива, а также исключит затраты на строительство и содержание отвалов и хвостохранилищ [Golik et al., 2023a; Golik et al., 2023b; Каунг и др., 2023]. Ранее были проведены исследования по изучению химического состава шлаков девяти металлургических предприятий России [Голлик и др., 2020]. Химический состав доменных шлаков близок к составу портландцемента, поэтому эти шлаки имеют вяжущие свойства. В зависимости от количества кремнезема и глинозема шлаки классифицируются по степени активности. Шлаки с высокой активностью создают массивы большей прочности. Максимальную активность проявляют шлаки Чусовского и Череповецкого металлургических комбинатов.

Особое внимание следует уделить обработке шлаков. Основными механическими способами улучшения свойств вяжущих компонентов является дробление, измельчение и вибрационное воздействие. Исследованию влияния степени измельчения сырья на активность клинкера посвящено множество работ [Курякова, 2003]. Большинство исследований показывают, что чем больше площадь поверхности частиц, тем выше активность получаемого материала. Активность шлаков возрастает благодаря изменению структуры и внутреннего строения материала за счёт создания новых или вторичных кристаллических структур, что приводит к значительному повышению прочностных характеристик массива после полного затвердевания. Активационная обработка – механическая активация в дезинтеграторе является наиболее дешёвым и простым способом воздействия. Помимо улучшения прочностных характеристик и однородности создаваемого массива, активационная обработка улучшает реологические свойства закладочной смеси, что значительно повышает её транспортабельность смеси.

Устойчивое транспортирование твердеющих закладочных смесей по всей трассе трубопровода, их равномерное распределение в очистном пространстве обуславливаются присущими ими реологическими и техническими характеристиками.

Подвижность закладочной смеси служит характеристикой, определяющей удобоукладываемость (способность растекаться/распределяться в пространстве), и является основным техническим свойством закладочной смеси. Таким образом, удобоукладываемость в заданное пространство (форму) и уплотнение в нём при помощи или действия различных механизмов или приёмов определяет подвижность

закладочной смеси. При этом закладочная смесь на всей технологической цепочке от приготовления до укладки в очистное пространство должна сохранять свою консистенцию и быть стойкой к расслоению. Глубина погружения эталонного конуса в закладочную смесь определяет её подвижность. Погружение эталонного конуса на величину 9–14 см свидетельствует о её пригодности для трубопроводного транспортирования [Монтянова, 2009; Шендрик и др., 1980].

Предельное напряжение сдвига и вязкость относятся к основным реологическим характеристикам, описывающим состояние твердеющих закладочных смесей. Именно данные коэффициенты являются основополагающими при расчёте движения закладочной смеси по трубопроводу и его параметров. Снижение предельного напряжения сдвига и коэффициента внутреннего трения (вязкости), а как следствие рост подвижности закладочной смеси достигается путём увеличения водосодержания. Необходимо отметить, что увеличение водотвёрдого отношения снижает качество закладочного массива после отверждения смеси [Васильева и др., 2023]. По данным [Wang et al., 2022] коэффициент внутреннего трения (вязкость) закладочной смеси, пригодной для транспортирования, не должен превышать 0,46 Па·с. При такой вязкости предельное напряжение сдвига в соответствии с данными [Монтянова, 2009] для самотечной подачи закладочной смеси не должно превышать 200 Па, а при комбинированной подаче (при включении в систему перекачивающих насосов) не должно соответствовать значениям более 150 Па [Шендрик и др., 1980]. Также при расчёте условий транспортирования необходимо принимать во внимание, что временной фактор оказывает влияние на изменения реологических характеристик смеси [Дидманидзе и др., 2020; Дидманидзе и др., 2021].

Одним из способов регулирования и управления реологическими свойствами закладочной смеси является применение различных добавок – пластификаторов. Пластификаторы – поверхностно-активные вещества, образующие на частицах материала водные оболочки, способствующие улучшению транспортабельности данного материала и уменьшающие угол его растекания, что увеличивает полноту заполнения очистной камеры [Плеханова, 2005].

Лигносульфат технический (ЛСТ), мылонафт, сульфитно-спиртовая барда (ССБ), сульфитно-дрожжевая бражка (СДБ) являются наиболее известными и широко применяемыми пластифицирующими добавками, как в горной промышленности, так и в смежной строительной отрасли. Современные пластифицирующие добавки по совокупной эффективности проигрывают лигносульфонату техническому [Монтянова и др., 2019]. Лигносульфат является побочным продуктом (отходом) целлюлозно-бумажной промышленности, что подтверждает его экономическую эффективность. А технологическая эффективность подтверждается тем, что данная добавка выступает как пластификатор, так и активатор. Адсорбционное взаимодействие лигносульфоната происходит как с тонкодисперсными частицами закладочных смесей, что улучшает транспортабельность, так и с продуктами гидратации цемента, что увеличивает прочностные характеристики создаваемого массива после полного отверждения смеси. Предыдущие исследования, где в качестве заполнителя применялись галитовые отходы переработки калийных руд показали, что добавление только 1% лигносульфоната увеличивает прочностные характеристики искусственного массива не менее чем в 1,4 раза [Вотяков, 2009].

В последнее время большую популярность приобретают исследования армирующих добавок (армирующая фибра), которые в основном применяются в строи-

тельстве. Благодаря своим свойствам фибру рассматривают как альтернативную замену традиционному армированию и называют её микроарматурой. Тонкие волокна, выполненные из полипропилена, полимеров, стекла, базальта, стали или других материалов называют фиброй. Выбор вида фибры зависит от назначения материала: повышение прочности, увеличение срока службы конструкции, снижение или полное предотвращение растекания или усадки и другое. Использование фибр в качестве компонента закладочной смеси позволит увеличить прочность материала и уменьшить относительную деформацию усадки закладочного массива, что позволит реализовать предназначение закладки в управлении горным давлением. Следует учитывать, что применение фибры обязывает производить комплексное исследование, так как армирование закладочной смеси сгущает её, что увеличивает вязкость и напряжение сдвига. Применение фибры в закладочной смеси необходимо совмещать с использованием пластифицирующих добавок.

Следует отметить, что закладочные работы снижают интенсивность опасных геомеханических процессов, что подтверждается результатами мониторинга. Постоянный мониторинг состояния целиков и водозащитной толщи на калийных рудниках является важнейшим вопросом контроля безопасности ведения горных работ [Соколов и др., 2023; Казанин и др., 2023; Гендлер и др., 2023а; Гендлер и др., 2023b] и необходимой мерой по защите рудников от затопления. На калийных рудниках производят регистрацию разрушения несущих элементов системы разработки, динамика данных по которым позволяет прогнозировать поведение целиков и подработанного массива, также предусмотрена система сейсмологического мониторинга, описанная в работе [Ганапати и др., 2020]. На калийных рудниках ведется постоянный визуально-маркшейдерский контроль над развитием процессов сдвижения и нарушения [Mikolas et al., 2021], который с развитием технологий стал дополняться спутниковыми интерферометрическими технологиями [Vasova et al., 2021].

Выводы

1. Замена традиционного способа разработки, применяемого при извлечении калийных солей, на технологию с многостадийной выемкой руды представляется перспективной;
2. С целью внедрения многостадийной выемки на калийных рудниках необходимо разработать рецептуру закладочной смеси, позволяющей обеспечить нормативную прочность после отверждения;
3. С целью снижения себестоимости закладочной смеси и уменьшения влияния горных работ на окружающую среду региона безусловным её компонентом должны являться галитовые отходы обогащения, применяемые в качестве инертного заполнителя;
4. Растворимость инертного заполнителя, а также растворимость вмещающих пород, слагающих целики, предопределяет применение насыщенного рассола в качестве затворителя;
5. Одним из наиболее перспективных материалов для использования в качестве вяжущего являются металлургические шлаки;
6. Механическая активационная обработка в дезинтеграторе компонентов закладочной смеси значительно увеличивает прочностные характеристики искусственного массива, создаваемого на её основе;

7. Применение различных добавок позволяет регулировать характеристики закладочной смеси или массива после её отверждения.

8. Армирующее вещество – фибра в составе закладочной смеси видится перспективным материалом для создания высокопрочного закладочного массива.

Литература

1. Барях А.А., Смирнов Э.В., Квиткин С.Ю., Тенисон Л.О. Калийная промышленность России: проблемы рационального и безопасного недропользования. // Горная промышленность. – 2022. – №1. – С. 41–50. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1-41-50.

2. Блохин Д.И., Иванов П.Н., Дудченко О.Л. Экспериментальное исследование термомеханических эффектов в водонасыщенных известняках при их деформировании. // Записки Горного института. – 2021. – Т.247. – С. 1–10. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.1.

3. Васильева М.А., Волчихина А.А., Кускильдин Р.Б. Совершенствование механизма водоотделения при закладочных работах. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – №4. – С. 125–139. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_125.

4. Васильева М.А., Волчихина А.А., Морозов М.Д. Оборудование и технологии для проведения работ по дозакладке выработанного пространства. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 6. – С.133-144. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_133.

5. Вотяков М.В. Повышение полноты извлечения запасов калийных руд на основе закладки выработанного пространства галитовыми отходами: дис...канд техн наук. Москва, 2009. – 140 с.

6. Ганапати П.Г., Заалишвили В.Б., Чандрасекаран С.С., Мельков Д.А. Комплексный мониторинг склоновых процессов в Индии и России. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2020. – Т. 12 № 4. – С. 572–581. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-572-581.

7. Гендлер С.Г., Прохорова Е.А. Методические основы выбора приоритетных направлений управления охраной труда при подземной добыче угля на основе анализа динамики интегрального риска травматизма и профессиональной заболеваемости. // Горный журнал. – 2023а. – №9. – С. 41–48. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.06.

8. Гендлер С.Г., Прохорова Е.А. Методические основы выбора приоритетных направлений управления охраной труда при подземной добыче угля на основе анализа динамики интегрального риска травматизма и профессиональной заболеваемости. // Горный журнал. – 2023б. – №9. – С. 41–48. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.06.

9. Голик В.И., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Тюляева Ю.С., Хайрутдинов А.М. Использование вяжущих на основе металлургических шлаков в составе закладочных смесей. // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2020. – Вып. 4. – С. 389–400.

10. Дидманидзе О.Н., Афанасьев А.С., Хакимов Р.Т. Математическая модель фазового перехода сжиженного метана в криогенном баке транспортного средства. // Записки Горного института. – 2020. – Т. 243. – С. 337–347. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.337.

11. Дидманидзе О.Н., Афанасьев А.С., Хакимов Р.Т. Метановое число природного газа и его влияние на эффективность рабочего процесса газового двигателя. // Записки Горного института. – 2021. – Т. 251. – С. 730–737. DOI:10.31897/PMI.2021.5.12.

12. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Фидарова М.И., Харебов К.С. Инструментальная мера сейсмической интенсивности по данным сети K-Net. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14. № 2. – С. 331–340. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-331-340.

13. Казанин О.И., Сидоренко А.А., Евсюкова А.А., Лю Цзылу Обоснование технологий поддержания выемочных выработок при отработке пологих угольных пластов на больших глубинах. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 9-1. – С. 5–21. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_5.

14. Каунг П.А., Семикин А.А., Хайрутдинов А.М., Дехтяренко А.А. Вовлечение техногенных отходов в переработку – парадигма ресурсного обеспечения устойчивого развития. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15. № 2. – С. 385–397. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-385-397.

15. Ковальский Е.Р., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Петров Д.Н. Проблемы и перспективы внедрения многостадийной выемки руды при отработке запасов калийных месторождений. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15. № 2. – С. 349–364. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-349-364.

16. Курякова Н.Б. Разработка технологии производства строительных материалов на основе комплексного использования металлургических шлаков и других отходов чусовского металлургического завода: дис ... канд.техн.наук. Пермь, 2003. – 158 с.

17. Монтянова А.Н. Формирование закладочных массивов при разработке алмазных месторождений в криолитозоне. М., Горная книга, 2009. – 597.

18. Монтянова А.Н., Трофимов А.В., Румянцев А.Е., Вильчинский В.Б., Наговицин Ю.Н. Опыт и эффективность применения пластифицированных закладочных смесей. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2019. – Т. 17. № 1. – С. 18–25. DOI: 10.18503/1995-2732-2019-17-1-18-25.

19. Плеханова Т.А. Бесцементная композиция для закладки выработанных пространств на основе техногенных материалов. // Химическая физика и мезоскопия. – 2005. – № 1. – С. 104–112.

20. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Рожков А.А., Соломеин Ю.М. Экогеотехнология добычи бедных руд с созданием условий для попутной утилизации отходов горного производства. // Записки Горного института. – 2023. – Т.260. – С.289–296. DOI: 10.31897/PMI.2023.21.

21. Хайрутдинов М.М., Каунг П.А., Чжо З.Я., Тюляева Ю.С. Обеспечение экологической безопасности при внедрении ресурсовозобновляемых технологий. // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – №5. – С. 57–62. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-5-57-62.

22. Шендрик В.К., Волощенко В.Л., Комчугов А.А. Типовая технологическая инструкция производства закладочных работ на горнорудных предприятиях Минчермета УССР. 1980. Кривой Рог. НИГРИ. 83 с.

23. Vacova D., Khairutdinov A.M., Gago F. Cosmic Geodesy Contribution to Geodynamics Monitoring. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 906. – 012074. DOI:10.1088/1755-1315/906/1/012074.

24. Baryakh A., Asanov V., Gheghin A., Pankov I. Dynamic failure of salt interchamber pillars. // Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej. – 2001. – Vol. 73. No. 40. – pp. 12–13.

25. Benzaazoua M., Peyronnard O., Belem T., Fried E., Stephant A., Dublet G. Key issues related to behaviour of binders in cemented paste backfilling. // Proceedings of the Thirteenth International Seminar on Paste and Thickened Tailings. – 2010. – pp. 345–363.

26. Golik V.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Brigida V., Efremkov E.A., Sorokova S.N., Mengxu Q. Tailings Utilization and Zinc Extraction Based on Mechanochemical Activation. // Materials. – 2023b. – Vol. 16. – P. 726. DOI: 10.3390/ma16020726.

27. Golik V.I., Mitsik M.F., Aleksakhina Y.V., Alenina E.E., Ruban-Lazareva N.V., Kruzhkova G.V., Kondratyeva O.A., Trushina E.V., Skryabin O.O., Khayrutdinov M.M. Comprehensive Recovery of Metals in Tailings Utilization with Mechanochemical Activation. // Resources. – 2023a. – Vol. 12. – P. 113. DOI: 10.3390/resources12100113.

28. Mikolas M., Mikusinec J., Abrahamovsky J., Tyulyaeva Y., Srek J. Activities of a Mine Surveyor and a Geologist at Design Bases in a Limestone Quarry. // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. – 2021. – 906(1). – P. 012073. DOI: 10.1088/1755-1315/906/1/012073.

29. Peyronnard O., Benzaazoua M. Alternative by-product based binders for cemented mine

backfill: Recipes optimisation using Taguchi method. // Minerals Engineering. – 2012. – Vol. 29. – pp. 28–38. DOI: 10.1016/j.mineng.2011.12.010.

30. Wang X., Sun K., Shao J., Ma J. Study on Mechanical and Rheological Properties of Solid Waste-Based ECC. // Buildings. – 2022. – 12. – P. 1690. DOI: 10.3390/buildings12101690.

31. Zuev B.Yu., Zubov V.P., Fedorov A.S. Application prospects for models of equivalent materials in studies of geomechanical processes in underground mining of solid minerals. // Eurasian Mining. – 2019. – No.1. – pp. 8–12.

References

1. Baryakh A.A., Smirnov E.V., Kvitkin S.Y., Tenison L.O. Russian potash industry: Issues of rational and safe mining. Russian Mining Industry. 2022. No. 1. pp. 41–50. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1-41-50. (In Russ.)

2. Blokhin D.I., Ivanov P.N., Dudchenko O.L. Experimental study of thermomechanical effects in water-saturated limestones during their deformation. Journal of Mining Institute. 2021. Vol. 247. pp. 3–11. DOI:10.31897/PMI.2021.1.1. (In Russ.)

3. Vasilyeva M.A., Volchikhina A.A., Kuskildin R.B. Improvement of water segregation in backfilling. MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2023. No. 4. pp. 125–139. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_125. (In Russ.)

4. Vasilyeva M.A., Volchikhina A.A., Morozov M.D. Re-backfill technology and equipment. MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2021. No. 6. pp. 133–144. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_133. (In Russ.)

5. Votyakov M.V. Improving the recovery of potash ore reserves by backfilling the mined-out space with halite waste: thesis. Moscow. 2009. 140 p. (In Russ.)

6. Ganapathy G.P., Zaalishvili V.B., Chandrasekaran S.S, Melkov D.A. Integrated monitoring of slope process in India and Russia. Sustainable Development of Mountain Territories. 2020. Vol. 12. No. 4. pp. 572–581. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-572-581. (In Russ.)

7. Gendler S.G., Prokhorova, E.A. Methodical framework for selecting occupational safety management priorities in underground coal mining on the basis of integrated occupational illness and injury risk dynamics analysis. Gornyi Zhurnal. 2023a. No. 9. pp. 41–48. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.06. (In Russ.)

8. Gendler S.G., Prokhorova, E.A. Methodical framework for selecting occupational safety management priorities in underground coal mining on the basis of integrated occupational illness and injury risk dynamics analysis. Gornyi Zhurnal. 2023b. No. (9). pp. 41–48. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.06. (In Russ.)

9. Golik V.I., Kongar-Syuryun Ch.B., Tyulyaeva Yu.S., Khairutdinov A.M. The use of binders based on metallurgical slags in the composition of based mixtures. Izvestiya Tula State University. 2020. Vol. 4. pp. 389–400. (In Russ.)

10. Didmanidze O.N., Afanasev A.S., Khakimov R.N. Mathematical model of the liquefied methane phase transition in the cryogenic tank of a vehicle. Journal of Mining institute. 2020. Vol. 243. pp. 337–347. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.337. (In Russ.)

11. Didmanidze O.N., Afanasev A.S., Khakimov R.T. Natural gas methane number and its influence on the gas engine working process efficiency. Journal of Mining institute. 2021. Vol. 251. pp. 730–737. DOI:10.31897/PMI.2021.5.12 (In Russ.)

12. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Fidarova M.I., Kharebov K.S. Instrumental measure of seismic intensity based on K-Net data. Sustainable Development of Mountain Territories. 2022. Vol. 14. No. 2. pp. 331–340. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-331-340. (In Russ.)

13. Kazanin O.I., Sidorenko A.A., Evsiukova A.A., Zilu Liu Justification of the longwall panel entries support technology when mining gently inclined coal seams at large depths. MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2023. No. 9-1. pp. 5–21. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_5. (In Russ.)

14. Kaung P.F., Semikin A.A., Khayrutdinov A.M., Dekhtyarenko A.A. Recycling of industrial waste is a paradigm of resource provision for sustainable development. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023. Vol. 15. No. 2. pp. 385–397. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-385-397. (In Russ.)

15. Kovalski E.R., Kongar-Syuryun Ch.B., Petrov D.N. Challenges and prospects for several-stage stoping in potash mining. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023. Vol. 15. No. 2. pp. 349–364. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-349-364. (In Russ.)

16. Kuryakova N.B. Development of technology for production of construction materials on the basis of integrated use of metallurgical slags and other wastes of Chusovskiy metallurgical plant: thesis. Perm. 2003. 158 p. (In Russ.)

17. Montyanova A.N. Formation of fill mass during the development of diamond deposits in the cryolithozone. Moscow. Gornaja kniga. 2009. 597 p. (In Russ.)

18. Montyanova A.N., Trofimov A.V., Rumyantsev A.E., Vilchinskiy V.B., Nagovitsyn Yu.N. Experience and efficiency of application of plasticized backfilling concrete. *Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after. G.I. Nosov*. 2019. Vol. 17. No. 1. pp. 18–25. DOI: 10.18503/1995-2732-2019-17-1-18-25 (In Russ.)

19. Plekhanova T.A. Cementless composition for filling mined spaces on the basis of technogenic materials. *Chemical Physics and Mesoscopy*. 2005. No. 1. pp. 104–112. (In Russ.)

20. Sokolov I.V., Antipin Y.G., Rozhkov A.A., Solomein Y.M. Environmental geotechnology for low-grade ore mining with the creation of conditions for the concurrent disposal of mining waste. *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 260. pp. 289-296. DOI: 10.31897/PMI.2023.21. (In Russ.)

21. Khayrutdinov M.M., Kaung P.A., Chzho Z.Ya., Tyulyaeva Y.S. Ensuring Environmental Safety in the Implementation of the Resource-renewable Technologies. *Occupational Safety in Industry*. 2022. No. 5. pp. 57–62. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-5-57-62 (In Russ.)

22. Shendrik V.K., Voloshchenko V.L., Komchugov A.A. Typical technological instruction for the production of stowing operations at mining enterprises of the Ministry of Chernet of the Ukrainian SSR. 1980. Krivoy Rog, NIGRI: 83 p. (In Russ.)

23. Bacova D., Khairutdinov A.M., Gago F. Cosmic Geodesy Contribution to Geodynamics Monitoring. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 906. P. 012074. DOI:10.1088/1755-1315/906/1/012074.

24. Baryakh A., Asanov V., Gheghin A., Pankov I. Dynamic failure of salt interchamber pillars. *Prace Naukowe Instytutu Geotechniki I Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej*. 2001. Vol. 73. No. 40. pp. 12–13.

25. Benzaazoua M., Peyronnard O., Belem T., Fried E., Stephant A., Dublet. G. Key issues related to behaviour of binders in cemented paste backfilling. *Proceedings of the Thirteenth International Seminar on Paste and Thickened Tailings*. 2010. pp. 345–363.

26. Golik V.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Brigida V., Efremenkov E.A., Sorokova S.N., Mengxu Q. Tailings Utilization and Zinc Extraction Based on Mechanochemical Activation. *Materials*. 2023a. Vol. 16. P. 726. DOI: 10.3390/ma16020726.

27. Golik V.I., Mitsik M.F., Aleksakhina Y.V., Alenina E.E., Ruban-Lazareva N.V., Kruzhkova G.V., Kondratyeva O.A., Trushina E.V., Skryabin O.O., Khayrutdinov M.M. Comprehensive Recovery of Metals in Tailings Utilization with Mechanochemical Activation. *Resources*. 2023b. Vol. 12. P. 113. DOI: 10.3390/resources12100113.

28. Mikolas M., Mikusinec J., Abrahamovsky J., Tyulyaeva Y., Srek J. Activities of a Mine Surveyor and a Geologist at Design Bases in a Limestone Quarry. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021. Vol. 906. P. 012073. DOI: 10.1088/1755-1315/906/1/012073.

29. Peyronnard O., Benzaazoua M. Alternative by-product based binders for cemented mine backfill: Recipes optimisation using Taguchi method. *Minerals Engineering*. 2012. Vol. 29. pp. 28–38. DOI: 10.1016/j.mineng.2011.12.010.

30. Wang X., Sun K., Shao J., Ma J. Study on Mechanical and Rheological Properties of Solid Waste-Based ECC. Buildings. 2022. Vol. 12. P. 1690. DOI: 10.3390/buildings12101690.

31. Zuev B.Yu., Zubov V.P., Fedorov A.S. Application prospects for models of equivalent materials in studies of geomechanical processes in underground mining of solid minerals. Eurasian Mining. 2019. No.1. pp. 8-12.