

Секция 1. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 504.55.054:622(470.6)

ГВОЗДКОВА Т.Н.¹, ГОЛИК В.И.², ПОЛУХИН О.Н.³

¹ к.т.н., доцент, директор филиала КузГТУ в г. Междуреченске, kuzstu@km.ru

² д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Центра геофизических исследований Владикавказского научно-образовательного центра РАН и Правительства Республики Северная Осетия-Алания, г. Владикавказ, v.i.golik@mail.ru

³ д.т.н., ректор Белгородского государственного университета, pon@bsu.edu.ru

**ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ХВОСТОВ
ОБОГАЩЕНИЯ РУД ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТВЕРДЕЮЩИХ СМЕСЕЙ**

Аннотация. Обоснована техническая возможность и условия утилизации хвостов обогащения минерального сырья для изготовления твердеющих закладочных смесей. Обоснован в качестве основного критерий оптимальности горных технологий и условия его реализации. Охарактеризована сущность новой технологии, отличающейся извлечением металлов до уровня санитарных требований, и приведены результаты извлечения металлов из хвостов обогащения руд и углей.

Ключевые слова: минеральное сырье, металлы, хвосты обогащения, геомеханика, напряжение, активация, механохимия, экономика, экология, добыча, технология.

Добыча минерального сырья, благодаря увеличению объема и географии развития добычных работ, обусловленного динамичным развитием потребностей человеческого сообщества, вышла в лидеры природо-разрушающих технологий. разрушение земной поверхности в регионах добычи сопровождается деградацией всех сфер окружающей среды.

Поэтому главной целью управления состоянием массива горных пород должно быть сохранение земной поверхности от разрушения путем рационального управления горным давлением, которое сводится к обеспечению оптимальных параметров элементов системы "естественные массивы – искусственные массивы – поверхность" по критерию сохранности земной поверхности [1].

Основным критерием эффективности управления состоянием массива горных пород является себестоимость связанных с этим работ или приведенные затраты на 1 м³ погашенных пустот. По этому критерию предпочтительно обрушение руд и пород с потерями сырья, разубоживанием и изменением экологического равновесия. При оценке эффективности этого способа допускается систематическая ошибка, поскольку действительная стоимость земель, минерального сырья и изменения экологической обстановки пока еще не могут быть выражены в материальном измерении с достаточной точностью.

В работах Котенко Е.А., Куликова В.В., Демина Н.В., Голика В.И. и др. предложен критерий оптимальности в виде условия сохранения земной поверхности от разрушения, который является приоритетным при технико-экономическом сравнении технологий.

Благодаря критерию сохранности земной поверхности, способы управления массивом становятся в сравнимые условия, отвечая концепции гуманного подхода к использованию недр и земли. Критерий исключает из числа возможных способы управления с обрушением пород с выходом на земную поверхность, породившие экологические проблемы в районах Кузбасса, Донбасса, КМА, Урала и других горнодобывающих областей России и Зарубежья [3].

При разработке скальных месторождений для управления горным давлением, чаще всего, используется свойство дискретных массивов создавать устойчивые конструкции за счет назначения безопасных параметров очистных выработок.

Крепь участвует в процессе формирования вокруг выработок устойчивых зон мощностью, равной первым метрам.

Нарушенные породы не теряют устойчивости, если не превышен предельный пролет (Г.Н.Кузнецов, В.Д. Слесарев, С.В.Ветров и др.). Условием прочности породной конструкции является самозаклинивание пород в примыкающем к нетронутому массиву слое. Феномен остаточной несущей способности пород создается всегда, но используется не всегда, что ведет к разубоживанию и потерям минерального сырья.

Усиление жесткости породной конструкций осуществляется инъектированием в пространство между породными кусками связующих материалов, креплением и ограничением пролетов выработок. Радикальным же способом управления массивом является создание искусственных массивов из твердеющих смесей.

Поскольку закладка пустот твердеющими смесями отличается повышенными затратами, проблемой становится обоснование возможности использования дешевых смесей с малой несущей способностью при определенных условиях.

В практике управление геомеханической сбалансированностью массива с сохранением земной поверхности обеспечивается разделением массивов на участки, для которых удовлетворяются условия [2]:

$$L_{\phi} < L_{\text{пред}} \text{ и } H > h_r, \quad (1)$$

где H , h_r - глубина работ от поверхности и высота зоны влияния выработок, м;

L_{ϕ} , $L_{\text{пред}}$, L_o - соответственно, пролеты фактические, предельные по условию образования свода естественного равновесия и сохранения плоской кровли (рис.1).

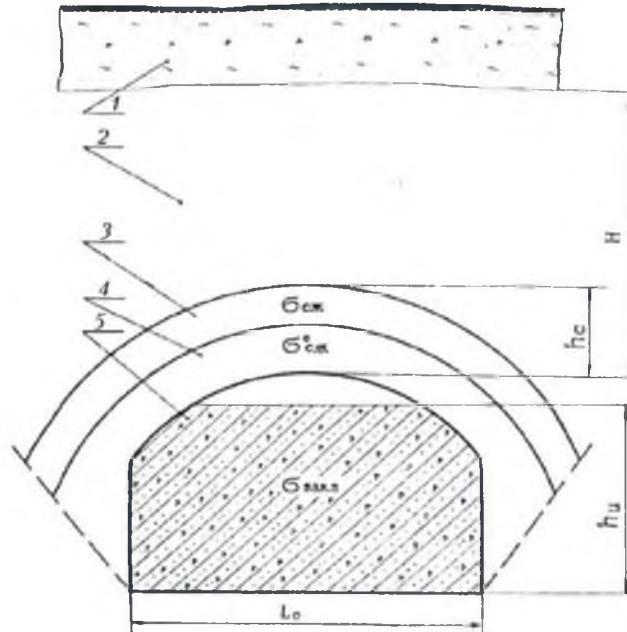


Рис.1. Схема напряжений в геомеханической системе: 1 – наносы; 2 - породы; 3- верхний слой нарушенных пород 4 - нижний слой нарушенных горных пород; 5 - искусственный массив; H -глубина работ; h_e –высота свода естественного равновесия; h_u – высота искусственного массива; σ_1 -вертикальные напряжения в массиве; $\sigma_{сж}$ - напряжения в верхних слоях свода естественного равновесия; $\sigma_{сж}^o$ - напряжения в нижнем слое свода естественного равновесия; $\sigma_{закл.}$ - напряжения в искусственном массиве; L_o – ширина выработки

Участки шахтного поля разделяются на пролеты с устойчивой плоской кровлей, при которых напряжения в элементах геомеханической системы не превышают критических значений. Практически эта задача решается раскройкой месторождения на геомеханически сбалансированные участки с помощью рудных целиков или искусственных массивов из твердеющей закладки. Надежность конструкции проверяется на возможность обрушения налегающих пород до поверхности построением зон влияния выработок (рис.2).

В пределах геомеханически сбалансированных участков могут быть применены менее прочные и более дешевые составы твердеющих смесей. Такой подход позволяет использовать для управления состоянием массива твердеющие смеси, изготовленные на основе материалов с пониженной активностью компонентов из хвостов переработки руд [4].

Накопление хвостов обогащения твердого минерального сырья увеличивает опасность химического воздействия на среду токсичными компонентами, среди которых наиболее опасны тяжелые металлы.

Традиционные методы обогащения не позволяют утилизировать хвосты до уровня санитарных требований, поэтому радикальной мерой снижения опасности химического загрязнения окружающей среды является только полная утилизация техногенного сырья.

Предлагаемая авторами природоохранная концепция обращения с хвостами переработки минерального сырья исходит из того, что оно является неиспользуемым и опасным при хранении ресурсом, использование которого при определенных условиях может обеспечить эколого-экономический эффект.

Применяемые технологии добычи и переработки руд характеризуются потерей части ценных компонентов в хвостах на всех переделах (рис.3).

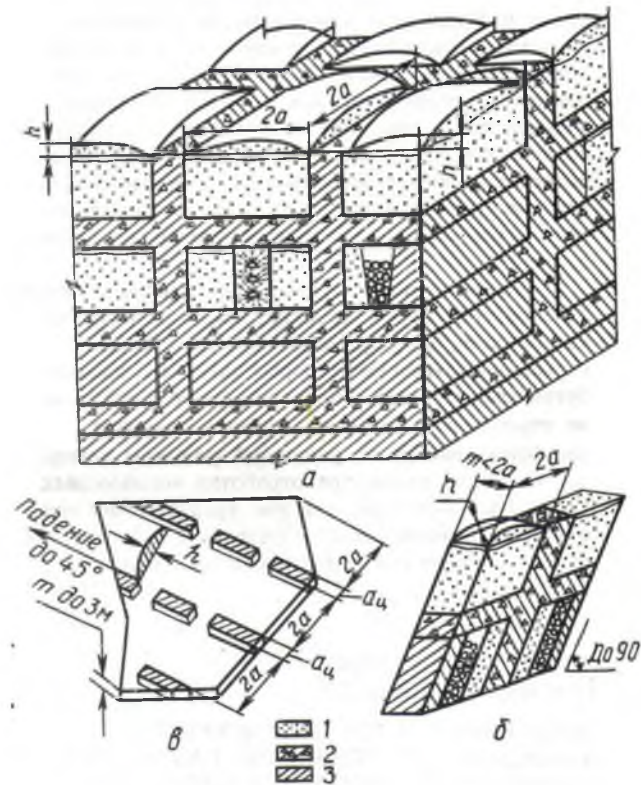


Рис.2. Разделение рудного поля на безопасные участки: а – массивное месторождение; б - крутопадающее месторождение средней мощности; в - пологое месторождение; 1- малопрочные твердеющие смеси; 2- прочные твердеющие смеси; 3- руда; $2a$ – пролет предельного свода естественного равновесия пород; $a_{ц}$ – ширина целика; h - высота предельного свода естественного равновесия пород; m – мощность рудных тел



Рис.3. Схема добычи и переработки руд

Так, комбинирование методов магнитного, гравитационного и электрохимического обогащения позволяет выделять целевые продукты только из богатых хвостов обогащения. Возможности извлечения металлов увеличиваются в ходе химического выщелачивания с извлечением металлов из хвостов обогащения в растворы, а из них – в товарные осадки. Так выщелачивают из хвостов обогащения с недоступным для традиционных технологий содержанием золота, медь и уран.

В ходе сорбционного выщелачивания извлекаемые из хвостов обогащения металлы осаждаются на ионообменную смолу, а из нее снимаются в процессе десорбции.

Принципиально новая технология эксплуатирует ранее неизвестный феномен активации вещества большой механической энергией при скорости обработки более 250 м/с [9].

Под механической активацией понимают повышение каталитических свойств веществ при измельчении, ускорение химических реакций, повышение прочности. Эффект механической активации проявляется в дезинтеграторах (рис.4).

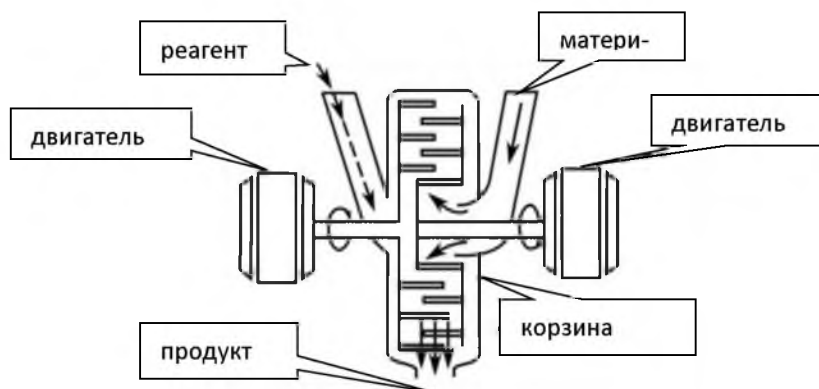


Рис.4. Выщелачивание хвостов в дезинтеграторе

Материал подается в центральную часть рабочего органа и подвергается многократным ударам бил на дисках, вращающихся со скоростью 1000 об/мин во встречных направлениях. За счет перегрузки в нем накапливается энергия особого вида и происходит структурное изменение его состояния. Скорость удара в дезинтеграторе на порядок больше, чем в вибрационных и шаровых мельницах, а ускорение достигает миллионов ускорений свободного падения.

Активация создает в материале электрически неравномерно заряженные центры, а по границам скопления примесей происходит разрушение материала, поэтому процессы сепарирования фаз активизируются, а выход целевого продукта увеличивается.

Использование дезинтегратора в горной практике впервые в мире осуществлено на месторождении «Шокпак» в Северном Казахстане в составе закладочного комплекса. Установка ДУ-65, укомплектованная универсальными ступицами, 4- и 3-рядными роторами и двигателями мощностью 200 - 250 кВт обеспечивала выход активного класса до 55 %, а в комбинации с вибро-мельницей - до 70 %, что позволяло активированному шлаку конкурировать с товарным цементом [10].

Установка располагалась в отдельном здании с площадью основания 5-7 м в трех уровнях. Материал доставляли на верхнюю отметку и пропускали сквозь сито с отверстиями 20 мм в установку. Из дезинтегратора продукты измельчения поступали в бункер - успокоитель и направлялись в технологическую цепь. При мокрой схеме измельчения в дезинтегратор подали воду, а продукты активации направляли в виде пульпы.

Проблемой использования хвостов обогащения является наличие не извлеченных металлов. Из руд извлекаются только главные металлы, а сопутствующие остаются в хвостах. Суммарная стоимость не извлеченных их хвостов и теряемых в закладочных смесях металлов может даже превосходить стоимость извлеченных.

Механохимическая технология позволяет одновременно с повышением активности компонентов смесей извлекать и металлы. Экспериментальное обоснование этого феномена осуществлено на хвостах обогащения цветных и черных металлов и углей. Применена единая методика выщелачивания в режимах:

1. Агитационное выщелачивание необработанных хвостов.
2. Агитационное выщелачивание предварительно активированных хвостов.
3. Выщелачивание хвостов в дезинтеграторе.
4. Агитационное выщелачивание активированных в дезинтеграторе хвостов.
5. Многократное выщелачивание хвостов в дезинтеграторе.

Эксперименты осуществлены с использованием математического планирования по плану Венкена-Бокса. Независимыми факторами являлись:

- содержание серной кислоты в выщелачивающем растворе (X_1) 2-10 г/л;
- содержание хлорида натрия в выщелачивающем растворе (X_2) 20-160 г/л;
- весовое соотношение массы выщелачивающего раствора и выщелачиваемой массы (X_3) в единичном эксперименте (50г) 4-10;
- время выщелачивания (X_4) в пределах 0,15-1,0 ч.

Полиметаллические руды Садонских месторождений (Россия, Северный Кавказ) обогащают в тяжелых суспензиях с извлечением свинца и цинка - 80-85 %, серебра - 60%, кадмия - 56%, висмута - 30 % и выходом хвостов 25-50% от объема перерабатываемых руд. Химический состав хвостов, %: SiO_2 - 31,4; Fe - 4,4; Ca O - 1,96; S - 1,88; Ag - 0,015; Cu - 0,18; Mn - 0,015; K_2O - 3,5; Al_2O_3 - 0,8; $Ti O_2$ - 0,03; Zn - 0,95; Pb - 0,84.

Извлечение металлов в раствор характеризуется табл. 1.

Таблица 1

Результаты извлечения цветных металлов в раствор

Серии	Свинец, %	Цинк, %
1-я	24,8	39,2
2-я	33,9	44,4
3-я	35,7	46,1
4-я	13,2	10,3
5-я	21,5	21,6
6-я	21,6	21,9

Экспериментально установлено:

- активация в дезинтеграторе с агитационным выщелачиванием вне его увеличивает извлечение из хвостов обогащения: по свинцу – в 1,4 раза, по цинку – в 1,1 раза;
- выщелачивание в дезинтеграторе по сравнению с вариантом раздельной активации и выщелачивания обеспечивает примерно одинаковое извлечение, но сокращает продолжительность процесса с 15 - 60 минут до секунд, т.е. на 2 порядка.

Результаты эксперимента позволяют утверждать:

- выщелачивание хвостов в дезинтеграторе эффективнее, чем агитационное выщелачивание;
- в порядке убывания степени влияния на процесс, следуют: содержание в выщелачивающем растворе реагента, частота вращения роторов дезинтегратора, число циклов выщелачивания в дезинтеграторе и соотношение Ж:Т.

Железистые кварциты КМА. Хвосты обогащения мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов представляют собой мелкодисперсный минеральный порошок с содержанием 40 - 70% фракции крупностью менее 0,071 мм.

Химический состав хвостов: SiO₂ – 64%, Fe – 8%, Al₂O₃ – 5,2%, Mn – 3,2%, K₂O – 0,7%, P – 0,1%, Ca – 0,8%, Mg O – 0,2%, Cu – 5·10⁻³%, Ni - 4·10⁻³%, Zn - 5·10⁻⁴%, As, Ba, Be, Bi, Co, Cr, Li, Mo, Nb, Pb, Sb, Sn, Sr, Ti, V, Y – на уровне (30-50)·10⁻⁵%.

При содержании железа в хвостах 8% однократным выщелачиванием извлекается 1% железа. Путем дальнейшего увеличения циклов переработки можно достичь безопасного по санитарным требованиям уровня содержания железа.

Переработка различными методами в течение одинакового времени характеризуется показателями (табл.2).

Таблица 2

Результаты выщелачивания металлов

Вид выщелачивания	Остаток в хвостах, %					
	Al ₂ O ₃	Mn	K ₂ O	P	Ca	Mg O
Агитационное выщелачивание	4,9	2,8	0,3	0,07	0,25	0,16
Выщелачивание активированных хвостов	4,2	2,5	0,2	0,07	0,23	0,14
Выщелачивание в дезинтеграторе	3,7	2,3	0,2	0,06	0,20	0,11
Многократная механохимическая активация	3,5	2,2	0,2	0,07	0,18	0,11

После извлечения металлов до уровня санитарных требований отходы обогащения становятся пригодными для изготовления закладочных смесей и бетонной товарной продукции. При этом механическая активация хвостов в дезинтеграторе без выщелачивания увеличивает прочность смеси с 1,30 до 1,52 МПа или в 1,17 раз.

Использование хвостов обогащения приносит прибыль, величина которой может быть описана моделью:

$$\Pi = \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{n=1}^N \{M_{ey} \cdot C_{my} + Q_y \cdot C_{qy}\} - \sum_{z=1}^3 [K(1 + E_{ny}) + E_q + E_x] - [(M_e \cdot C_m + Q \cdot C_q) + Q_r \cdot C_r] K_c K_y K_r K_6 K_l K_{br} K_q \rightarrow \max \quad (2)$$

где P - продукты утилизации хвостов; O - виды хвостов; T - процессы переработки хвостов; F - время переработки; N - фазы существования хранилищ; M_{ey} - количество металлов из хвостов; C_{my} - цена металлов; Q_y - количество восстановленных эффектов; C_{qy} - цена утилизированных

веществ; E_q - коэффициент процентной ставки на кредит для утилизации; E_x - коэффициент процентной ставки на кредит для производства металлов; E_{ny} - коэффициент процентной ставки на восстановление окружающей среды; M_c - количество потерянных металлов; C_M - цена потерянных металлов; Q - количество потерянных эффектов; C_q - цена потерянных полезных веществ; Q_r - количество эффектов поражения среды; C_r - затраты на компенсацию глобальных факторов поражения; Z - затраты на управление; K - затраты на управление хранилищами; K_c - коэффициент самоорганизации хвостов; K_y - коэффициент утечки продуктов выщелачивания; K_r - коэффициент дальности утечки растворов; K_b - коэффициент влияния на биосферу; K_r - коэффициент влияния загрязнения на соседние регионы; K_{bp} - коэффициент реализации опасности со временем; K_r - коэффициент риска поражения окружающей среды от неучтенных факторов.

Накопление на земной поверхности некондиционного металлосодержащего сырья формирует глобальную проблему, радикальным решением которой является утилизация опасного и ценного техногенного сырья.

Реализация концепции безотходной утилизации некондиционного минерального сырья обеспечивает, в том числе, возможность использования хвостов переработки для приготовления твердеющих смесей при добыче минерального сырья подземным способом. Успех реализации концепции зависит от объемов использования процессов химического выщелачивания и механической активации в дезинтеграторе в рамках единого цикла.

Основным эффектом утилизации хвостов переработки является исключение необходимости хранения хвостов переработки на земной поверхности с включением их в природный цикл и возвращением земли в пользование.

Новая технология является первой в горной промышленности попыткой безотходной технологии добычи металлов. Как у всех пионерных методов, у нее есть много требующих решения вопросов, например, увеличение износоустойчивости рабочего органа дезинтегратора, дифференцированное извлечение металлов из раствора выщелачивания и др.

Список литературы

1. *Голик В.И.* Концептуальные подходы к созданию мало- и безотходного горнорудного производства на основе комбинирования физико-технических и физико-химических геотехнологий. Горный журнал. 2013. №5. С.93-96.
2. *Голик В.И.* Подземная разработка месторождений. Инфра - М, М. 2013.- 117 с.
3. *Голик В.И.* Природоохранные геотехнологии в горном деле. /Голик В.И., Полухин О.Н. Белгород: ИД «Белгород» НИУ «БелГУ», 2013. С.282.
4. *Голик В.И.* Проблемы глубокой утилизации отходов переработки угля. Маркшейдерия и недропользование. 2013. №4.
5. *Голик В.И.* Пути повышения активности вяжущих из отходов производства при изготовлении твердеющих смесей./ Голик В.И., Исмаилов Т.Т., Логачев А.В., Лузин Б. Горный информационно-аналитический бюллетень. М.2009. №12.С.45-49.
6. *Полухин О.Н.* Извлечение металлов из хвостов обогащения железных руд. / Голик В.И., Полухин О.Н. Цветная металлургия. 2013. №4.С.52-57.
7. *Полухин О.Н.* Концепция извлечения металлов из хвостов переработки железных руд. / Голик В.И., Полухин О.Н. Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск. № ОС4. - 2013. - № 3. М.: «Горная книга». С.56-61.
8. *Цидаев Т.С.* Эквивалентность вяжущих свойств отходов производства. / Голик В.И., Цидаев Т.С., Цидаев Б.С. Цветная металлургия. М.2011.№ 12.С.35-40.
9. *Golik V.I.* Mechanochemical Activation of the Ore and Coal Tailings in the Desintegrators. / Golik V.I., Komachshenko V.I., Drebenstedt K. DOI: 10.1007/978-3-319-02678-7_101, Springer International Publishing Switzerland 2013.
10. *Rasorenov Y.I.* Activation of Technogenic Resources in Disintegrators. / Golik V.I., Komachshenko V.I., Rasorenov Y.I. DC 10.1007/978-3-319-02678-7_107, Springer International Publishing Switzerland 2013.