



УДК 504.55.054:622(470.6)

**ОБОСНОВАНИЕ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
УТИЛИЗАЦИИ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ РУД КМА**
**JUSTIFICATION OF ECOLOGICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF KMA
ORE TAILINGS RECYCLING**

В.И. Голик¹, О.Н. Полухин²
V.I. Golik¹, O.N. Poluhin²

¹ Центр геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН и Правительства Республики Северная Осетия-Алания, Россия, Республика СО-Алания, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а

² Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85

¹ Tsentr Geophysical Investigations of Vladikavkaz Scientific Center RAS and the Government of the Republic of North Ossetia-Alania, 93a Markova St, Vladikavkaz, 362002, the Republic of SB-Alania, Russia

² Belgorod State National Research University, 85, Pobeda St, Belgorod, 308015, Russia

E-mail: v.i.golik@mail.ru

Ключевые слова: хвосты, обогащение, экономика, экология, доход, ущерб, металлы, товар, модель, утилизация, технология, механохимия, активации, твердеющие смеси, подземный способ, разработка, месторождение.

Key words: tails enrichment, economy, environment, income, damage to, metals, product model, recycling, technology, mechanochemistry, activation, hardening mixture underground method, development, field.

Аннотация. Следствием горного производства является накопление хвостов переработки минерального сырья с интенсификацией воздействия на окружающую среду. Реальной мерой снижения опасности может быть только полная утилизация хвостов переработки. Фактор экономической эффективности предлагаемой безотходной технологии состоит в том, что при сравнимых затратах извлекается большее количество металла за счет более полного освоения запасов недр. Управление ресурсами хвостохранилища может быть прибыльным даже без производства продукции из утилизируемых хвостов, если при этом опасность для окружающей природной среды уменьшается радикально. Инструментом получения прибыли при полной утилизации хвостов обогащения может быть механохимическая технология переработки, опробованная для условий месторождений КМА в НИУ «БелГУ». Определено, что извлечение металлов из хвостов в товарные продукты методами механохимии существенно превышает извлечение традиционными технологиями и может быть доведено до уровня санитарных требований. Экономическая эффективность полной утилизации хвостов обогащения складывается из стоимости полученных металлов, сырья для строительной индустрии и снижения величины ущерба окружающей среде. Механохимическая активация хвостов в дезинтеграторе является шагом по пути решения проблемы обеспечения сырьем для изготовления твердеющих смесей при переходе в близкой перспективе предприятий КМА на подземный способ разработки месторождений, для обеспечения которого потребуется добыча сырья для приготовления твердеющих смесей.

Resume. A consequence of mining and processing industry of the enterprises of KMA is the accumulation of iron ore tailings with multifaceted impact on the environment. Only a complete utilization of tailings can be considered as a real measure to reduce the risk. The factor of economic efficiency of the proposed non-waste technology is that at comparable costs a greater amount of metal is extracted due to a fuller development of reserves of mineral resources. Tailings resources management can be profitable even without manufacture of products of recyclable tails if this reduces radically the risk to the environment. Tool for profit at full utilization of tailings can be mechanochemical processing technology which has been tested at BSNRU "BelSU" for the conditions of KMA. It has been established that the recovery of metals from tailings in commercial products by Mechanochemistry methods exceeds significantly the extraction by conventional technologies and can be brought to a level of sanitary requirements. Economic efficiency of the complete utilization of tailings is formed by the cost of the obtained metal, raw materials for the construction industry and the decrease of environmental damage.

Mechanochemical activation of tailings in a disintegrator is a step on the way to solving the problem of providing the raw material for the manufacture of hardening mixtures in the transition in the near term of enterprises of KMA to underground mining, which will require extraction of raw materials for the preparation of hardening mixtures.

Введение

Следствием горного производства является накопление отходов добычи и переработки минерального сырья с интенсификацией химического воздействия на среду их токсичных компонентов, среди которых для флоры, фауны и социума наиболее опасны тяжелые металлы. Некондиционное минеральное сырье занимает значительные площади земли, загрязняет атмосферу, открытые и подземные водные источники, снижает урожайность сельскохозяйственных культур, повышает заболеваемость населения и т. п. Для предотвращения и ликвидации негативного воздействия горно-обогатительного производства на природные ресурсы и окру-

жающую среду горные предприятия осуществляют природоохранные мероприятия, расходуя на это значительные материальные, трудовые и финансовые ресурсы, или платят значительные штрафы, осложняющие их финансовое состояние.

Радикальной мерой снижения глобальной для биосферы Земли опасности может быть только полная утилизация опасного и, вместе с тем, ценного сырья, которыми являются хвосты обогащения. Однако, развитие этого направления сдерживается высоким уровнем затрат и несовершенством законов об охране природы. До сих пор загрязняющее среду предприятие оплачивает не весь ущерб, а только его незначительную часть. А природоохранным мероприятием считается биологическая рекультивация отходов с не полностью извлеченными опасными ингредиентами.

Новая концепция обращения с отходами переработки минерального сырья исходит из того, что оно является неиспользуемым и опасным при хранении ресурсом, использование которого может обеспечить эколого-экономический эффект [Трубецкой и др., 2012].

В распоряжении горного предприятия могут быть два варианта обращения с некондиционным минеральным сырьем, извлеченным на земную поверхность:

- хранение с использованием мер уменьшения ущерба окружающей среде;
- переработка с изменением качества и утилизацией продуктов переработки.

Общий недостаток первого варианта – невозможность предотвращения главной опасности – химической миграции металлов, поэтому он не может быть рекомендован для токсичного минерального сырья.

Вариант с полной утилизацией радикально уменьшает опасность, но для большинства предприятий пока недоступен из-за недостаточной освоенности технологии, продолжительности процесса и высокой стоимости осуществления.

Условие эколого-экономической эффективности извлечения металлов из хвостов:

$$P_y > U_c + Z_n,$$

где P_y – прибыль при утилизации хвостов; U_c – ущерб окружающей среде в денежном выражении; Z_n – затраты на переработку хвостов.

Ущерб от хранения хвостов может даже превосходить ценность добываемых полезных ископаемых, учитывая срок существования рудников 20–40 лет, а существования хвостохранилищ – столетия. Так, ликвидация последствий влияния урановой составляющей полиметаллических руд в Европе потребовала больше затрат, чем стоимость добытого из них серебра.

Концепция обращения с некондиционным минеральным сырьем исходит из того, что поскольку нет возможности оценить действительный ущерб Человеку, флоре и фауне, следует технологически исключить возможность нанесения этого ущерба, т. е. не хранить, а утилизировать хвосты. Пока такую возможность представляет только технология с механохимической активацией процессов выщелачивания.

Результаты исследований в области утилизации хвостов путем выщелачивания металлов сводится к следующему:

- варианты технологий адекватно характеризуются количественными и качественными параметрами;
- активация хвостов в дезинтеграторе с выщелачиванием по сравнению с традиционным агитационным выщелачиванием увеличивает извлечение металлов в 1.5- 2 раза;
- активация сырья в дезинтеграторе одновременно с выщелачиванием по сравнению с вариантом отдельной активации и выщелачивания увеличивает извлечение на такую же величину, но уменьшает время выщелачивания на два порядка.

Металлические продукты переработки хвостов обогащения: промышленные продукты, концентраты, кварцевый флюс. Нерудная часть хвостов представляет собой кварцевый материал. По химическому и минеральному составам хвосты различаются содержанием оксидов железа, которые привносятся железосодержащими минералами: пирит, пирротин, сфалерит, галенит, халькопирит, гидроксиды железа.

После классификации и удаления металлических компонентов хвосты пригодны для производства тарного стекла и стекловолокна, которое используется для производства теплоизоляционных материалов – плит, матов, а также как заменитель металла при армировании строительных материалов.

Из расплавленных хвостов путем отливки, кристаллизации и отжига возможно получение силикатных кристаллических изделий: кислотоупорные химически стойкие изделия, износостойкие изделия, плиты, термостойкие и декоративные изделия и др.

Полная утилизация хвостов обогащения увеличивает экономический и экологический потенциал предприятий по добыче рудных полезных ископаемых и обеспечивает доход, величина которого складывается из снижения величины ущерба от хранения хвостов, стоимости



полученных при переработке металлов и неметаллов, сырья для строительной индустрии и попутной товарной продукции [Шестаков, 1990].

Объекты и методы исследования

В регионах КМА запасы богатых железных руд на глубине до 150 м разрабатываются открытым способом. В ближайшей перспективе основные запасы железных руд предстоит добывать подземным способом разработки не только потому, что увеличивается экономически доступная глубина локализации руд, но и потому, что открытый способ разработки вступил в антагонистические противоречия с жизненными интересами регионов [Петин, 2006].

Часть наиболее богатых руд уже сейчас извлекается из недр с потерями до 60%. Из обогащенных с потерями металлов руд металлургической переработкой извлекается железо и еще несколько металлов. Хвосты переработки попадают в хранилища и в виде пыли и сажи распределяются между субъектами живого вещества.

В Российских регионах, в том числе КМА, имеются условия для утилизации металлосодержащих хвостов обогащения: запасы техногенного сырья, инфраструктура и кадры. Но пока происходит бесконтрольное использование хвостов для нужд населения и теневого бизнеса. В результате территория регионов засоряется опасными продуктами переработки и еще более усугубляет свой статус катастрофической загрязненности химическими продуктами.

Использование металлосодержащих отходов переработки без извлечения металлов происходит и в промышленных масштабах. Камеры очистных блоков используют для простого размещения хвостов обогащения без исполнения функций управления состоянием массива, считая это природоохранным мероприятием.

Суммарная стоимость полезных элементов в хвостах обогащения, возможно, сравнима со стоимостью извлекаемого железа. Так, ресурсы золота, в текущих отходах четырех ГОКов КМА составляют 3 т/год при содержании 0.5 г/т. Рано или поздно технология извлечения всех металлов будет рентабельной, поэтому хвосты обогащения должны храниться как сырье для будущих обитателей Планеты.

Считается общепризнанным, что комплексная переработка хвостов является актуальной задачей; в регионе сложились условия для освоения технологий комплексной переработки; переработка улучшит экологическую обстановку. Но добыча и переработка минеральных ресурсов производится с образованием сверхнормативных отходов при использовании устаревших технологий. При этом считается нормальным, что заболеваемость и преждевременная смерть населения регионов компенсируется штрафами, которые на самом деле несопоставимы по величине с получаемой прибылью от пользования недрами.

Владельцы хвостохранилищ не считают себя ответственными за их состояние; критически относятся к предлагаемым технологиям безотходной утилизации; не вкладывая средств в разработку технологий глубокой переработки; предпочитают получить прибыль за счет увеличения основного производства, не тратя средств на компенсацию наносимого ими ущерба.

Ситуация с утилизацией хвостов в России резко отличается от практики развитых в горном отношении стран. В Германии, например, утилизация отходов добычи и переработки минералов осуществляется или предпринимателем или подрядчиком за счет средств, отчисляемых с начала добычи ресурсов в установленном законом порядке.

Проблема обращения с хвостами обогащения железистых кварцитов весьма актуальна для предприятий Белгородской области. Возможность полной утилизации хвостов обогащения должна быть экономически обоснована с учетом всего комплекса факторов. Объектами исследований безотходной утилизации хвостов обогащения являются предприятия региона, в частности, комбинат «КМА руда», Яковлевский рудник, Лебединский, Стойленский, Михайловский ГОК, Белгородская горнодобывающая компания и др., в связи с близкой перспективой перехода на подземную разработку месторождений железных руд

Эколого-экономические принципы эффективного управления состоянием хвостохранилищ основываются на учете объективных закономерностей окружающей среды. В хвостохранилищах в течение всего срока их существования развиваются физико-химические процессы природного выщелачивания, поэтому отвалы воды содержат полезные в случае извлечения и опасные в противном случае ингредиенты в количествах, достаточных для переработки. Активация хвостов в рабочей камере дезинтегратора реагента переводит в раствор большую часть всех металлов, что сравнимо с заводским извлечением металлов из небогатых руд.

Эффективность технологии определяется соотношением компенсационных затрат и ущерба от хранения отходов, производственной мощностью утилизирующего предприятия и его технологическим уровнем (рис. 1).

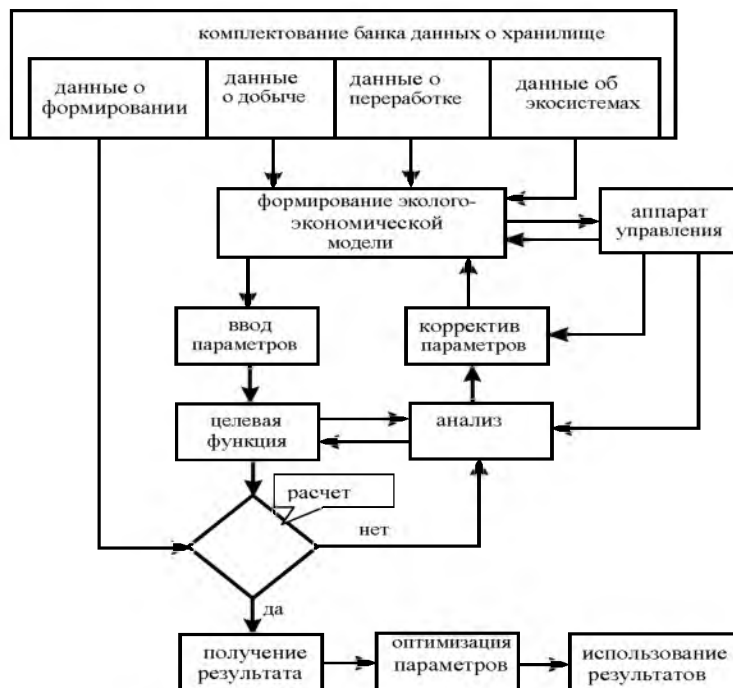


Рис. 1. Схема исследования эффективности управления отходами обогащения
 Fig. 1. Scheme of the study of tailings management effectiveness

Область эффективного применения природоохранных технологий утилизации некондиционного минерального сырья находят как совокупность значений, отвечающих приемлемому качеству окружающей среды при доступных затратах путем моделирования технологических и экономических показателей. Особенность оценки эффективности рассматриваемой технологии – необходимость учета не только общей массы дохода, который возможно получить, но и его прирост по сравнению с аналогом. Базируясь на теории сравнительной эффективности, отбирается лучший вариант из числа возможных, для которого производят расчет оценочных показателей абсолютной эффективности инновации.

Эффективность утилизации некондиционного минерального сырья повышается при реализации направлений использования (рис. 2).

Применяемый метод исследования основан на том, что некондиционные минеральные ресурсы в результате использования инновационных методов обработки, в данном случае выщелачивание металлов из хвостов обогащения, становятся товаром [Голик и др., 2012].

Экономический эффект определяется как превышение стоимостной оценки результатов над стоимостной оценкой совокупных затрат:

$$\Theta = \sum_{t=1}^T P_t - \sum_{t=1}^T Z_t ,$$

где Θ – суммарный экономический эффект за расчетный период; P_t – стоимостная оценка результатов работы о предприятия в t-м году; Z_t – стоимостная оценка совокупных затрат по предприятию в t-м году; T – время расчетного периода.

Получение экономического эффекта возможно в случае оптимизации параметров системы «добыча–переработка» на основе модели В.А. Шестакова [2004]:

$$\sum_{t=1}^{t_p} \Pi_{p1t} = \sum_{t=1}^{t_{c1}} A_{ct} (\Pi_{Дот} - C_{Дот}) \frac{1}{(1+E)^{t_{c1}-1}} - \sum_{t=1}^{t_{c1}} K_r \frac{(1+E_K)^{t_{cr}}}{(1+E)^{t_{cr}-1}} + \frac{1}{(1+E)^{t_{cr}}} \sum_{t=1}^{t_p-t1} A_{rt} (\Pi_{Дрт} - C_{Дрт}) \cdot \frac{1}{(1+E)^{t_p-t_c-1}} + \sum_{t=1}^{t_p-t_{c1}} Y_t \frac{1}{(1+E)^{t_p-t_{c1}-1}}$$

где A_{rt} – производственная мощность участка по переработке хвостов в t-й год, т/год; t_{cr} – срок подготовки хвостов и строительства цеха переработки хвостов, лет; K_r – затраты на подготовку хвостов и строительство цеха в t-й год, руб./год; $\Pi_{Дрт}$ и $C_{Дрт}$ – извлекаемая ценность и эксплуатационные затраты в t-м году, руб./т; E_K – коэффициент, учитывающий величину процентной ставки за кредит; Y_t – ущерб окружающей среде от хранения хвостов в t-м году.

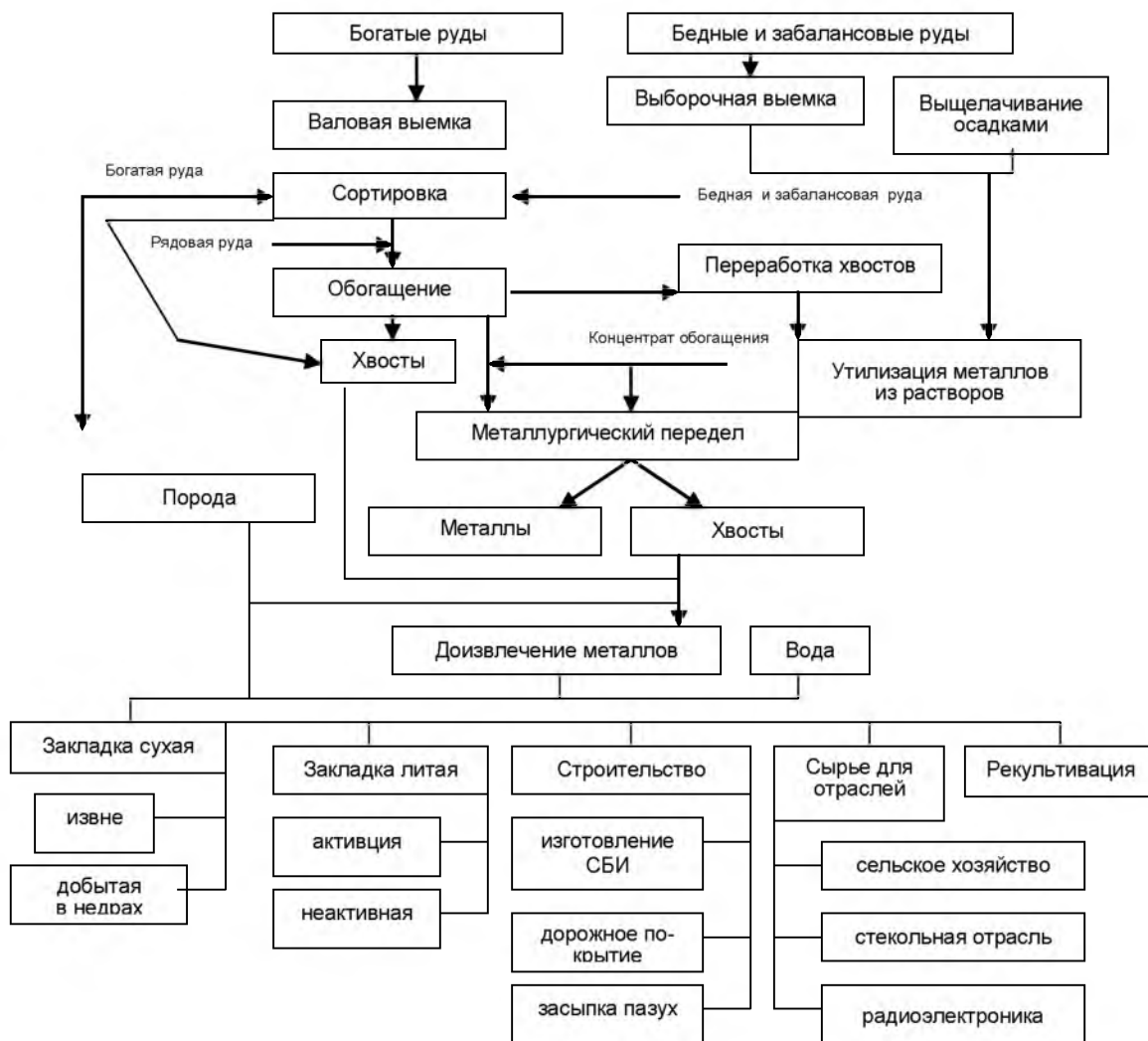


Рис. 2. Схема утилизации хвостов обогащения
 Fig. 2. Scheme of tailings utilization

Применяемый метод исследования основан на том, что некондиционные минеральные ресурсы в результате использования инновационных методов отработки, в данном случае выщелачивание металлов из хвостов обогащения, становятся товаром [Голик и др., 2012].

Экономический эффект определяется как превышение стоимостной оценки результатов над стоимостной оценкой совокупных затрат:

$$\Theta = \sum_{t=1}^T P_t - \sum_{t=1}^T Z_t$$

где Θ – суммарный экономический эффект за расчетный период; P_t – стоимостная оценка результатов работы предприятия в t-м году; Z_t – стоимостная оценка совокупных затрат по предприятию в t-м году; T – время расчетного периода.

Получение экономического эффекта возможно в случае оптимизации параметров системы «добыча–переработка» на основе модели В.А. Шестакова [2004]:

$$\sum_{t=1}^{t_p} \Pi_{pM} = \sum_{t=1}^{t_{c1}} A_{c1} (C_{Дот} - C_{Дот}) \frac{1}{(1+E)^{t-1}} - \sum_{t=1}^{t_{cr}} K_r \frac{(1+E_K)^{t_{cr}}}{(1+E)^{t_{cr}-1}} + \frac{1}{(1+E)^{t_{cr}}} \sum_{t=1}^{t_p-t_1} A_{rt} (C_{Дрт} - C_{Дрт}) \cdot \frac{1}{(1+E)^{t_p-t_c-1}} + \sum_{t=1}^{t_p-t_{c1}} V_t \frac{1}{(1+E)^{t_p-t_{c1}-1}}$$

где A_{rt} – производственная мощность участка по переработке хвостов в t-й год, т/год; t_{cr} – срок подготовки хвостов и строительства цеха переработки хвостов, лет; K_r – затраты на подготовку хвостов и строительство цеха в t-й год, руб./год; $C_{Дрт}$ и $C_{Дрт}$ – извлекаемая ценность и эксплуа-



традиционные затраты в t -м году, руб./т; E_K – коэффициент, учитывающий величину процентной ставки за кредит; Y_t – ущерб окружающей среде от хранения хвостов в t -м году.

Метод оценки включает в себя этапы:

- анализ сырьевой базы для использования технологии;
- оценка возможностей рынка продукции;
- анализ качества основной и попутной продукции;
- анализ материальных и денежных потоков в процессе производства;
- анализ цен минерального сырья и продуктов его переработки.

При оценке эффективности использования инвестиций в действующие предприятия используется метод СВОТ-анализа: преимущества, недостатки, возможности и угрозы. Особенностью реализации метода является необходимость мониторинга цен на металлы, которые на мировом рынке подвержены существенным колебаниям [Ракишев, 2013].

Для оценки эффективности переработки хвостов обогащения инновационным способом выполняют исследования:

- анализ состояния предприятия как части сырьевой базы;
- возможность увеличения объемов производства предприятия;
- оценка риска внедрения технологии;
- оценка эффективности технологии отработки хвостов.

Сложность экономического обоснования состоит в необходимости учета повышенного уровня риска вследствие увеличения глубины горных работ, отрицательного воздействия объекта исследования на окружающую среду, затрат на компенсацию нанесенного ущерба, значительным сроком существования объектов и т. д. Оценка вариантов осуществляется во взаимосвязи процессов, начиная от разведки и кончая реализацией конечной продукции, на основе единого критерия и подхода.

Результаты и их обсуждение

Экономическая эффективность вовлечения хвостов обогащения в производство металлов и строительного сырья определяется путем сравнения традиционной технологии с извлечением металлов на фабрике и технологии с выщелачиванием металлов из хвостов обогащения переработкой в дезинтеграторе [Хинт, 1980].

Фактор экономической эффективности новой технологии состоит в том, что при сравнимых затратах из уже извлеченного из недр сырья извлекается большее количество металла за счет освоения запасов хвостов обогащения. Технично-экономическая оценка использования хвостов обогащения включает элементы:

- прогнозирование роста эффективности производства;
- перевод забалансовых запасов в категорию балансовых;
- координацию деятельности по регулированию технологических процессов;
- оценку, контроль и анализ результатов переработки.

Для исследования возможности привлечения в переработку хвостов за счет маневрирования содержанием полезного компонента в исходных рудах, в условиях непостоянной ценности рудной массы используется экономико-математическая модель, позволяющая гибко реагировать на изменение информации о контролируемых показателях системы, критерием которой является получение прибыли:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{E}_z = C_{\delta\delta} + E_n \frac{\Phi}{A_\delta} - \left[C_{\delta\delta} + E_n \frac{\Phi + \Delta K}{A_\delta(1+q)} \right] \frac{C_{\delta\delta}(1+q)}{C_{\delta\delta} + qC_{\delta\delta}}; \\ \mathcal{E}_{umt} = \sum_{t=0}^{T_z} (R_t - Z_t) \eta_t - K = B - K; \\ M = 0,01 \sum_{i=1}^n \alpha_{i\delta} (1-R)(1-\Pi) \varepsilon_{\delta} \varepsilon_{M} A_\delta (1+q); \\ MCM = W_{M_{i+1}} (1 + e_{wT}); \\ e_w = \frac{dW_M}{dM} \cdot \frac{M_i}{W_{M_{i+1}}} \rightarrow \max; \\ \alpha_\delta \rightarrow \min. \end{array} \right.$$

где \mathcal{E}_z – экономический эффект по варианту отработки месторождения, р./т; E_n – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, доли ед.; Φ – стоимость основных фондов, р.; A – годовая производственная мощность рудника по балансовым запасам, т; q – прирост объемов добычи за счет переработки забалансовых запасов, т; $C_{\delta\delta}$, $C_{\delta\delta}$ – ценность руды при выемке балансовых запасов и хвостов обогащения, р./т.; $C_{\delta\delta}$ – себестоимость добычи балансовых запасов, р./т; C_{δ} – себестоимость добычи балансовых запасов и хвостов обогащения, р./т.;



η_i – коэффициент дисконтирования финансовых средств; t – срок действия проекта, лет; K – капитальные затраты по инвестиционному проекту, р.; P и Z – результаты и затраты по проекту, р.; M – годовой выпуск металла, т; α_i – содержание металла в хвостах обогащения, доли ед.; ε_o , ε_m – извлечение при обогащении и металлургическом переделе, доли ед.; MC_m – предельные затраты по условному металлу, р.; W_m – удельная себестоимость металла по предлагаемому варианту, р./т; e_w – коэффициент эластичности изменения удельной себестоимости металла, доли ед.; R – показатели разубоживания, доли ед.; Π – потери при добыче, доли ед.

Финансовые результаты – прибыль по итогам деятельности участка переработки:

$$\Pi(Y) = \sum_{m=1}^M \alpha_m - C_{ТП} - C_o - C_{mp} - C_m,$$

где $C_{ТП}$ – себестоимость товарной продукции, р.; C_o – себестоимость обогащения, р.; C_{mp} и C_m – затраты на транспортирование до завода и на металлургический передел.

Модель эколого-экономической оценки технологии с механохимической активацией:

$$\Pi = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^R \left\{ 0,01\alpha_m(1-P_k)\varepsilon_n C_m + 0,01\alpha_{3m}(1-P_k)\varepsilon_{3m} C_m - \left[\frac{1-P_k}{1-\Pi_k} (A_{1k} + A_{2k} + A_{3k}) + A_4 + A_5 + \gamma_1 A_6 + \gamma_2 A_7 \right] \times \left(1 - \frac{\varphi}{1+q}\right) \right\} \times A_6(1+q)r\eta_t + \sum_{f=1}^F \sum_{u=1}^U (Z_{yb} - Z_{yz})\varepsilon_n^{om} \rightarrow \max$$

где Π – прибыль при освоении технологий, ден. ед./год; N – товарная продукция по переделам, физ. ед.; M – извлекаемые металлы, физ. ед.; K – схемы добычи; T – время, лет; R – риск освоения технологий, доли ед.; A_6 – объем добычи и переработки при базовой технологии, физ. ед.; q – доля прироста объемов хвостов, доли ед.; α_m, α_{3m} – содержание m -го металла в балансовых запасах и хвостах, доли ед.; P_k, Π_k – разубоживание и потери при k -той схеме добычи, доли ед.; ε_n – извлечение металлов по n переделам, доли ед.; C_m – цены m -го вида металла, ден. ед./физ. ед.; A_{1k}, A_{2k}, A_{3k} – затраты на погашение, ден. ед./физ. ед.; A_4 – затраты на последующие процессы добычи, ден. ед./физ. ед.; A_5, A_6, A_7 – затраты на транспорт рудной массы до обогатительной фабрики, до потребителя концентрата, на усреднение рудной массы на рудничном складе, ден. ед./физ. ед.; γ_1, γ_2 – удельный выход с 1 т руды концентратов при обогащении и металлов, физ. ед.; φ – доля условно-постоянных затрат, доли ед.; η_t – коэффициент дисконтирования финансовых потоков, доли ед.; Z_{yb}, Z_{yz} – затраты на складирование хвостов, плата за размещение хвостохранилищ, плата за превышение предельных норм концентрации вредных примесей, ден. ед.; ε_n^{om} – снижение выхода отходов, физ. ед.

Оценка эффективности обращения с хвостами обогащения производится путем сравнения базового и нового вариантов:

$$NPV = \left[\sum_{j=1}^{n_2} (C_{dbj} - C_{dbj} + H_j) A_j \frac{1}{(1+r)^{j+n_1}} - \sum_{t=1}^{n_1} \frac{K_t}{(1+r)^t} \right] - \left[\sum_{i=1}^{n_2} (C_{dbi} - C_{dbi} + H_i) A_i \frac{1}{(1+r)^{i+n_1}} - \sum_{t=1}^{n_1} \frac{K_{ti}}{(1+r)^t} \right],$$

где C_{db} и C_d – соответственно ценность добытой руды в базовом и новом вариантах, р./т; C_{db} и C_d – себестоимость добычи по базовому и новому варианту, р./т; A_6 и A – годовой объем добычи, т; H_6 и H – амортизационные отчисления по вариантам, р./т; K_6 и K – капитальные вложения по вариантам, р./т; t – период инвестиционных расходов, $t = 1, 2 \dots n_1$; n_1 – продолжительность периодов инвестиций, лет; i – период отдачи инвестиций, $i = 1, 2 \dots n_2$; n_2 – продолжительность периода отдачи от инвестиций, лет.

Схема формирования экономической эффективности использования хвостов обогащения представлена на рисунке 3.

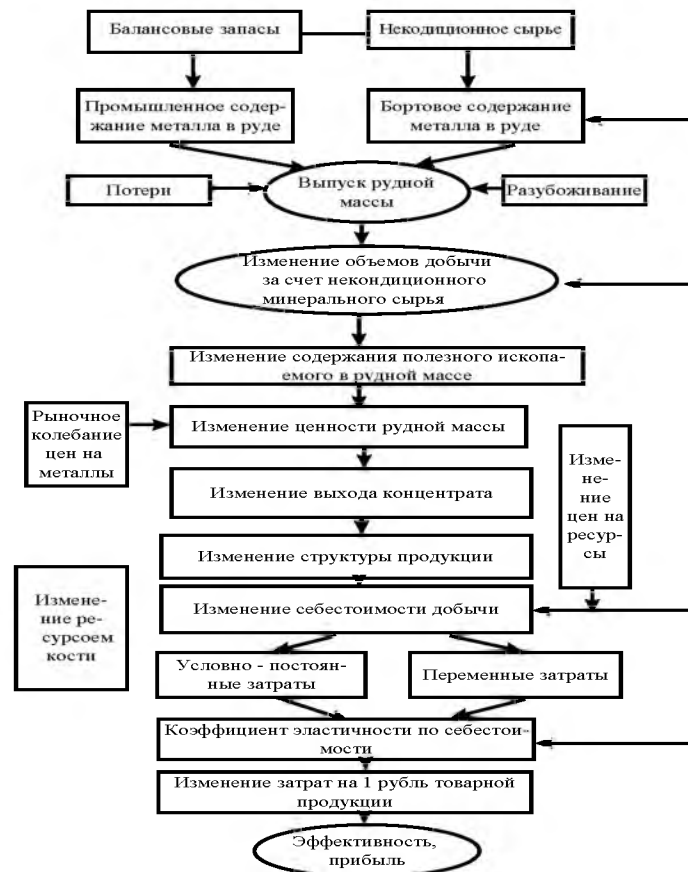


Рис. 3. Схема определения прибыли от использования хвостов обогатения
 Fig. 3. Scheme for determining profits from the use of tailings

Эффективность использования хвостов обогатения руд описывается моделью:

$$\Pi = \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^O \sum_{\pi=1}^{\Pi} \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{n=1}^N \{ (M_{ey} \cdot \Pi_{my} + Q_y \cdot \Pi_{qy}) \} - \sum_{z=1}^Z [K(1 + E_{ny}) + E_q + E_x] - [(M_e \cdot \Pi_m + Q \cdot \Pi_q) + Q_r \cdot \Pi_r] K_c K_y K_t K_\delta K_r K_{vp} K_\chi \rightarrow \max,$$

где P – продукты утилизации хвостов; O – виды хвостов; Π – процессы переработки хвостов; T – время переработки; F – фазы существования хранилищ; N – стадии использования хвостов; M_{ey} – количество металлов из отходов; Π_{my} – цена металлов; Q_y – количество восстановленных эффектов; Π_{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 экологию; M_e – количество потерянных металлов; Π_m – цена потерянных металлов; Q – количество потерянных эффектов; Π_q – цена потерянных полезных веществ; Q_r – количество эффектов поражения среды; Π_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_t – коэффициент дальности утечки растворов; K_δ – коэффициент влияния на биосферу; K_r – коэффициент влияния загрязнения на соседние регионы; K_{vp} – коэффициент реализации опасности со временем; K_r – коэффициент риска поражения окружающей среды от неучтенных факторов.

В условиях предприятий Курской магнитной аномалии управление ресурсами хвостохранилища может быть прибыльным даже без производства продукции из утилизируемых хвостов, если при этом радикально уменьшается опасность для окружающей природной среды [Golik et al., 2013a]:

$$\mathcal{E} = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^n C'_i - \sum_{i=1}^n C_0 \right) \cdot Q,$$

где C₀ и C_i – базовые и новые затраты, связанные с хранением отходов на поверхности; Q – объем утилизируемой части хвостохранилища; n – виды отходов.



В качестве примера приводится расчет экономической эффективности получения металлов хвостов обогащения методами механохимической активации при извлечении в раствор 0.70–0.95 и извлечении из раствора 0.65–0.95 (табл.).

Таблица
Table

Экономическая эффективность переработки хвостов обогащения
The economic efficiency of processing tailings

Металлы	Всего	Извлечение в раствор	Извлечение из раствора	Товарный металл, т	Цена 1 т металла, \$	Стоимость металлов, \$
Железо	971 240	0.72	0.75	524 469	372	19 510 246
Свинец	28860	0.70	0.75	15152	2455	37198160
Цинк	44980	0.95	0.95	40594	2563	10404242
Медь	41020	0.90	0.93	34334	10030	34436741
Титан	46200	0.80	0.75	27720	583	16160760
Марганец	13486	0.63	0.65	5522	3340	18443480
Серебро	3151	0.75	0.80	1891	1428	2700348

Учитывая, что участки по извлечению металлов из хвостов выщелачивания создаются в рамках имеющейся инфраструктуры предприятий, реальная прибыль будет больше расчетной.

В настоящее время перспективным направлением извлечения металлов из хвостов обогащения является механохимическая активация их в аппаратах, где выщелачивающий раствор запрессовывается в образующиеся трещины, и извлечение металлов происходит одновременно с разрушением кристаллов. Технология обеспечивает извлечение металлов в интервале от 50 до 80% от исходного содержания в хвостах со снижением остаточного содержания до норм ПДК.

После извлечения металлов и солей хвосты обогащения могут быть использованы в составе смеси не только в качестве инертных заполнителей, но и вяжущих, обеспечивая необходимую прочность смеси

Инструментом получения прибыли при полной утилизации хвостов обогащения может быть разрабатываемая в БелГУ механохимическая технология переработки (рис. 4).

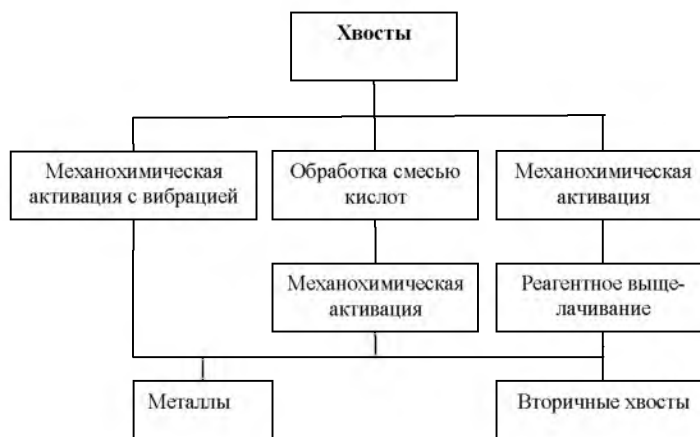


Рис.4. Схема извлечения металлов из хвостов обогащения
Fig. 4. Scheme of extraction of metals from tailings

При утилизации хвостов обогащения в составе закладочных смесей экономический эффект создается за счет экономии цемента при использовании фракций крупностью до 0.076 мм, объем которых достигает 85%.

После извлечения металлов до уровня санитарных требований отходы обогащения металлических руд месторождений КМА пригодны для изготовления твердеющей смеси и иной товарной продукции без ограничений.

Механическая активация хвостов в дезинтеграторе увеличивает прочность смеси с 1.30 до 1.52 МПа или на величину коэффициента 1.17. Механохимическая активация с неоднократным циклом обработки увеличивает прочность смеси с 1.01 до 1.22 или на величину коэффициента 1.22 и более.

Смеси на основе активированных в дезинтеграторе хвостов в большинстве случаев могут быть использованы для заполнения техногенных пустот даже без добавления цемента. Из-



влечение металлов из хвостов в товарные продукты методами механохимии увеличивается в интервале от 60 до 90%, что в разы превышает извлечение при переработке таких отходов традиционными технологиями [Golik et al., 2013b].

Заключение

Экономическая эффективность полной утилизации хвостов обогащения складывается из стоимости полученных металлов, сырья для строительной индустрии и снижения величины ущерба окружающей среде от хранения хвостов в пределах лито-, гидро- и атмосферы.

Механохимическая активация хвостов в дезинтеграторе является шагом по пути решения проблемы обеспечения сырьем для изготовления твердеющих смесей при переходе предприятий КМА на подземный способ разработки месторождений.

Использование хвостов обогащения приносит прибыль, величина которой определяется отношением суммы приведенной разности результата и затрат к величине капитальных вложений.

Уменьшение опасности хранения хвостов обогащения для окружающей природной среды может быть прибыльным даже без производства продукции из утилизируемых хвостов.

Благодарности

Авторы выражают признательность докт. техн. наук, проф. Ю.И. Кондратьеву, проф. Северо-Кавказского государственного технологического университета, оказавшему содействие в проведении исследований в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» «Инновационные технологии утилизации техногенных отходов горно-обогатительного и металлургического производств для получения новых товарных продуктов» по теме: «Исследования и разработка высокоэффективной инновационной технологии утилизации отходов горно-обогатительной переработки руд КМА с получением металлов, вязких и инертных компонентов для приготовления твердеющих смесей».

Список литературы

References

1. Голик В.И., Комашенко В.И., Страданченко С.Г., Масленников С.А. 2012. Повышение полноты использования недр путем глубокой утилизации отходов обогащения угля. Горный журнал, (10): 47–53
Golik V.I., Komashenko V.I., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A. 2012. Increase completeness of the subsoil by deep waste coal preparation. Gornyj zhurnal, (10): 47–53.
2. Петин А.Н. 2006. Минерально-сырьевые ресурсы Курской Магнитной аномалии и экологические проблемы их промышленного освоения. Вестник РУДН, 12: 112–118.
Petin A.N. 2006. Mineral resources of the Kursk Magnetic Anomaly and environmental problems of their industrial development. Vestnik RUDN, 12: 112–118.
3. Ракишев Б.Р. 2013. Комплексное использование руды на предприятиях цветной металлургии Казахстана. Горный журнал, (7): 89–95.
Rakishev B.R. 2013. Complex use of ore in non-ferrous metallurgy in Kazakhstan. Gornyj zhurnal, (7): 89–95.
4. Трубецкой К.Н., Корнилов С.В., Яковлев В.Л. 2012. О новых подходах к обеспечению устойчивого развития горного производства. Горный журнал, (1): 45–51.
Troubetzkoy K.N., Kornilov S.V., Yakovlev V.L. 2012. New approaches to sustainable development of mining production. Gornyj zhurnal, (1): 45–51.
5. Хинт И.А. 1980. О четвертом компоненте технологии. Научно-информационный сборник СКТБ «Дезинтегратор». Таллин, Валгус, 36.
Hint I.A. 1980. On the fourth component technology. Scientific Information collection SKTB «Disintegrator». Tallinn, Valgus, 36.
6. Шестаков В.А. 1990. Рациональное использование недр. М.: Недра, 322.
Shestakov V.A. 1990. Rational use of mineral resources. Moscow, Nedra, 322.
7. Шестаков В.А. 2004. Теория проектирования разработки угольных пластов с учетом стадий переработки и направлений использования углей. Новочеркасск, 267.
Shestakov V.A. 2004. Teoriya design development of coal seams with the processing steps and uses of coal. Novocherkassk, 267.
8. Golik V.I., Komachshenko V.I., Drebenstedt K. 2013a. Mechanochemical Activation of the Ore and Coal Tailings in the Desintegrators. DOI: 10.1007/978-3-319-02678-7_101, Springer International Publishing Switzerland.
9. Golik V.I., Komachshenko V.I., Rasorenov Y.I. 2013b. Activation of Technogenic Resources in Desintegrators. DOI: 10.1007/978-3-319-02678-7_107, Springer International Publishing Switzerland.