

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННОЙ СРЕДЫ В ЗОНЕ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА¹

В. И. Ляшенко –

ГП Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии, г. Желтые Воды, Днепропетровская область

А. М. Сатцаев –

Северокавказский горно-металлургический университет, г. Владикавказ (Российская Федерация)

С. А. Федорова –

Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

Розглянуто результати досвіду відпрацювання та вилучення металів із шламосховищ і зменшення забруднення навколишнього природного середовища у зоні впливу гірничо-металургійного виробництва з застосуванням схеми управління його станом шляхом утилізації відходів. Запропонована математична модель з урахуванням устаткування комплексів, режимів переробки хвостів і обмеження у формі екологічних вимог до продуктів переробки. Розроблені та реалізовані у практиці Садонського свинцево-цинкового комбінату (Російська Федерація) технології активації у пристроях, що дозволяють радикально зменшити шкідливий вплив на навколишнє середовище й витрати на підтримання сховищ хвостів гірничо-металургійного виробництва.

The results of experience of extraction of metals are considered from depository refuse ore and diminishing of contamination of natural environment taking into account the chart of management the state of environment utilization of offcuts. A mathematical model is offered taking into account the equipment of complexes, modes of processing of tails and limitation in form ecological requirements of products of processing. It is Designed and marketed in practice Sadonskogo leaden-zinc combine (Federation Of russia) to technologies to activations in device, allowing radically reduce damage surrounding ambience and expenseses on contents vault tail rock-metallurgy production

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

Технология добычи и переработки металлосодержащих минералов характеризуется нанесением многопланового ущерба окружающей среде. Хвосты добычи и переработки минералов не могут быть утилизированы без извлечения из них металлов и сернистых соединений, что затрудняется недостаточной эффективностью технологий вторичной переработки. В хвостах протекают синергетические процессы, продукты которых поражают экосистемы окружающей среды. Известные технологии кучного выщелачивания отличаются продолжительностью процесса. Ускорить извлечение металлов и сократить время миграции вредных элементов в экосистемы позволяет активация хвостов. Поэтому повышение качества природно-техногенной среды в зоне влияния горно-металлургического производства утилизацией хвостов переработки руд на основе технологии активации процессов извлечения целевых ингредиентов, обеспечивающих сокращение объемов складированных отходов и вовлечение их в производство, – вот те важные научные и

практические задачи, требующие безотлагательного решения [1, 2], которые наиболее полно освещались на страницах журнала “Екологія довкілля та безпека життєдіяльності” [3–9]. Ниже приведены дополнительные сведения о результатах создания и внедрения природоохранных технологий переработки металлосодержащих хвостов. На основе большого объема теоретических исследований, лабораторных и опытно-промышленных экспериментов, технико-экономических расчетов и обоснований разработаны и реализованы в практике Садонского свинцево-цинкового комбината (Российская Федерация) технологии активации в аппаратах, позволяющие радикально снизить ущерб окружающей среде и затраты на содержание хранилищ хвостов. Авторами установлены также закономерности и разработаны технологии, которые излагаются при изучении дисциплин “Проектирование рудников”, “Горное дело и окружающая среда”, “Специальные способы разработки месторождений полезных ископаемых”, “Металлургические процессы” и “Обогащение полезных ископаемых”.

¹ Работа выполнена под научным руководством А.Т. Киргуева при участии В.И. Голика, А.Ф. Еналдиева, В.К. Царикова, Р.А. Толбоева и др.

Цель работы – повышение качества природно-техногенной среды в зоне горно-металлургического производства на основе разработки и внедрения природоохранных технологий переработки металлосодержащих хвостов.

Задачи исследования:

1. Обоснование экологической целесообразности использования природоохранных технологий переработки металлосодержащих хвостов.
2. Разработка математической модели с учетом оборудования комплексов, режимов переработки хвостов и ограничения в форме экологических требований продуктов переработки.
3. Определение количественных характеристик эффекта природо- и ресурсосбережения за счет переработки металлосодержащих хвостов по критерию минимума расходов на переработку и максимума снижения ущерба окружающей среды.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Потребность внедрения природоохранных мероприятий в сфере человек – природа – ресурсы обострилась, поэтому формирование системы управления состоянием окружающей среды является приоритетным направлением (табл. 1).

В Северной Осетии – Алании (Российская Федерация) накоплено довольно большое количество хвостов переработки руд, в которых содержатся свинец, мышьяк, цинк, селен, медь, ртуть, радиоактивные отходы тория. Степень поражения окружающей среды зависит от транспортабельности и характера распределения опасных ингредиентов. По результатам радиоэкологического районирования территории России, в РСО-Алания находятся

аномальные участки с показателями радиоактивности: Верхний Згид – до 75 мкР/ч, Ход – до 60 мкР/ч, Н. Нар – до 100 мкР/ч, а также в черте г. Владикавказ – отвальные поля заводов “Электроцинк” и “Победит” (от 100 до 400 мкР/ч). В районе улиц Пожарского, Чкалова и пл. Революции радиационный фон достигает 60 мкР/ч.

Хвостохранилища горно-металлургических предприятий активно участвуют в загрязнении окружающей среды жидкими химическими ингредиентами при объеме сброса рудничных стоков до 3 млн м³/год. Утилизация минеральных отходов является единственным средством радикальной защиты окружающей среды от деградации. При утилизации отходов их свойства изменяют с помощью электрохимических, ультразвуковых, радиационно-термических, механохимических, гидрохимических и других методов. Изменения реакционной способности минералов по мере подвода энергии авторами разделены на три стадии (табл. 2).

В процессе утилизации ежегодно перерабатывается около 1 % старых, лежалых и до 40 % текущих отходов. Общая площадь выведенных из сельскохозяйственного оборота земель составляет 9 тыс. га. Возможность управления состоянием окружающей среды путем утилизации отходов горно-металлургического производства показывает схема, приведенная на рис. 1.

В рамках определения возможности утилизации хвостов в качестве строительного сырья исследовался феномен ослабления несущих свойств изделий вследствие природного выщелачивания металлов. В исследованных хвостах обогащения установлено соотношение компонентов: крупнозернистые граниты – 40 %; порфириты – 30 %;

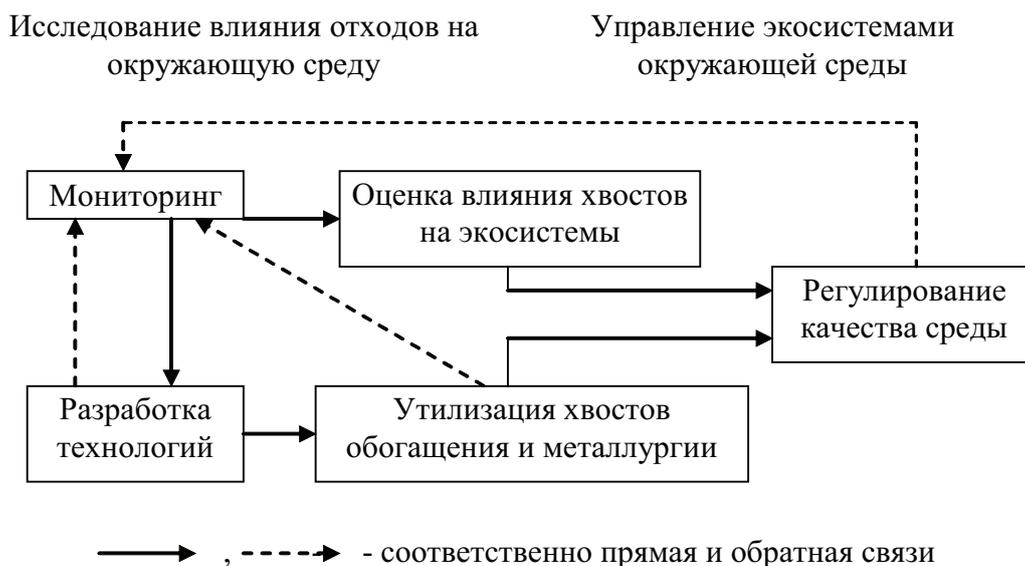


Рис. 1. Схема управления состоянием окружающей среды путем утилизации отходов

Направления использования отходов

Отходы по отраслям	Продукция из отходов для отраслей							
	Топливо	Черные металлы	Цветные металлы	Удобрения, химикаты	Стройматериалы	Атомная энергия	Другие отрасли	
Угольная промышленность	Угольные отходы и газы	Fe из пирита	Al, Al ₂ O ₃ , Al-Si сплавы	Известь и серная кислота	Аглопорит, щебень, кирпич	Выработанные про-странства	Закладка, строитель-ство	
Теплоэнергетика	Зола и тепло установок	Fe-Si сплавы из золы	Al-Si сплавы из золы: Ge, Ga, Mo	Кислота, удобрения	Щебень, гравий, кирпич, аглопорит	U, Th	Дорожное строитель-ство	
Черная металлургия	Тепло металлургических печей	Fe из окисленных кварцитов	V, Co, Cu, Ni, Ti, Zr, Zn, Mg, Ba, Na, Nb и др.	Фосфорные удобрения	Шлакобетон, цемент, огнеупоры, песок, известь	Выработанные про-странства	Строительство; заклад-ка выработанных про-странств; ирригация	
Цветная металлургия	Сжигание сульфидов: тепло печей	Fe пирита, пирро-тина, магнетита	Металлы отвалов, шлаков, стоков	Серная кислота, удо-брения	То же	U, Th, Li, Be	Закладка выработанных про-странств	
Горная химия	-	Титано-магнетит, перовскит	Редкие земли; Al, Ni, Mg	Фосфор, сода; удобрения	То же	U, Li, Th	То же	
Нерудные стройматериалы	-	Магнетит и железо из песков	Редкие земли от переработки пес-ков; Ti	Известкователи; адсорбенты влаги	То же	-	Закладка выработанных про-странств; строитель-ство; ирригация	
Атомная энергетика	Тепло установок	Fe, Mn	Au, Cu, Zn, Pb	Удобрения; серная кислота	То же	U, Th	Закладка выработанных про-странств	

песчаники – 20 %; жильный материал – 8 %; рудные минералы – 2 %, пирит – 1,4 %; сфалерит – 0,6 %; галенит – 0,06 %; халькопирит – 0,05 %.

Эксперимент проводился при температуре 18–20 °С и давлении 760 мм ртутного столба. От измельченных проб отбиралось по 10 кг, которые были помещены в 5 полиэтиленовых колонн диаметром 100 мм, высотой 1,2 м. Скорость фильтрации растворов поддерживалась на уровне 1,5 – 2 дм³/ч. Растворы отстаивались в течение 3 часов и опробовались. Твердый осадок промывали до pH=7,0, высушивали, взвешивали, определяли содержание металлов и извлечение по твердым остаткам. Для определения содержания свинца использован фотометрический метод. Установлено, что природные сточные воды содержат 5–6-кратное количество природных окислителей, необходимых для перевода металлов в раствор. Процесс выщелачивания металлов из хвостов, в том числе утилизированных в виде строительных материалов, протекает

объективно и неуправляемо с нанесением ущерба окружающей среде.

При этом извлечение металлов многократно увеличивается и ускоряется при выщелачивании промышленными реагентами: кислотой и анолитом электрохимического разложения. Кроме того, если за полный цикл выщелачивания при пропускании через колонну 150 дм³ извлечено 62 % цинка и 38 % свинца, то после отстоя и пропускания еще 100 дм³ извлечено 75 % цинка и 52 % свинца. Обработка высушенного остатка показала уменьшение массы на 15 % при уменьшении выхода классов -26 +15 мм на 27 %, что говорит о разрушении минералов под влиянием физико-химических процессов. Извлечение из хвостов обогащения активнее, чем из хвостов металлургии, что объясняется спеканием поверхности последних при термообработке. Для строительных целей хвосты непригодны, потому что процесс природного выщелачивания продолжается в течение длительного времени.

Таблица 2

Стадии механической активизации минералов

Стадии	Поверхность, м ² /г	Дефекты, изменения и аморфизация, %	Процессы с эффектом активации	Руды и расход энергии, кВт.ч/т
1	1-2	Электронные и атомные дефекты, дислокации всех видов	Флотация, магнитная сепарация, методы, основанные на поверхностных свойствах	Кварцполевошпатовые. Касситеритовые, фосфатные, сподуменовые, шеелитовые, магнетитовые N<10
2	10-15	Уменьшение размеров б.к.р. и наведение микроискажений	Химическое и термохимическое обогащение, бактериальное и автоклавное выщелачивание	Сульфаты, сульфиды, бокситы, каолиновые, шеелитовые, вольфрамитовые, хромитовые, титаномагнетитовые, фосфаты, редкоземельные руды N<500
3	Переменная величина	Распространение микроискажений. Переход в рентгеноаморфное состояние	Вскрытие и фазовые превращения перед гидromеталлургическими процессами	Сподуменовые, лепидолитовые, пирохлоровые, касситеритовые концентраты и др. N>1000

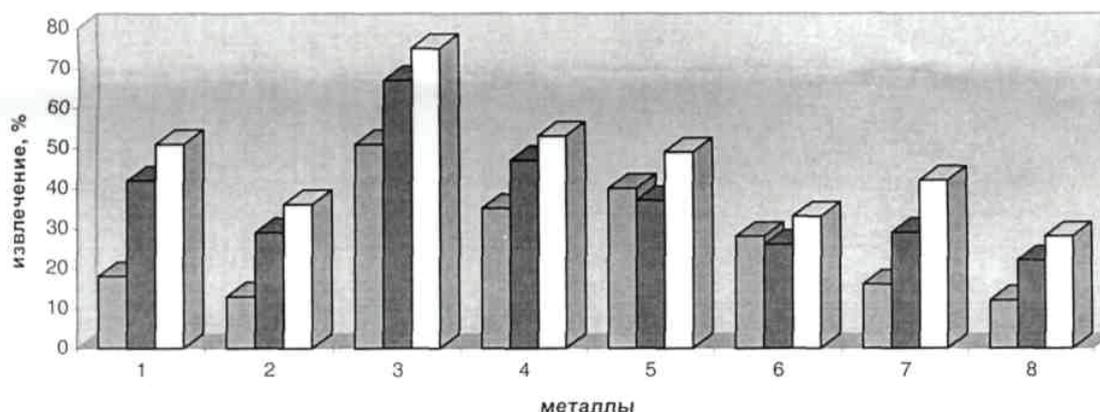


Рис. 2. Диаграмма металлов:

1 – свинец из хвостов РОФ; 2 – свинец из хвостов МЗ; 3 – цинк из хвостов РОВ; 4 – цинк из хвостов МЗ; 5 – медь из хвостов РОВ; 6 – медь из хвостов МЗ; 7 – железо из хвостов РОВ; 8 – железо из хвостов МЗ.

Первый столбец – орошение соляной кислотой; второй столбец – анолитом; третий – анолит в корзине дезинтегратора (МЗ – металлургический завод)

Эффективность электрохимической активации сточков оценивается коэффициентом 1,4–1,6, что повышает их химический потенциал до уровня промышленных химических реагентов. При активации хвостов в аппаратах реагент подается в рабочий орган дезинтегратора одновременно с хвостами. Извлечение металлов в раствор происходит одновременно с разрушением кристаллов, причем выщелачивающий раствор запрессовывается в трещины частиц. Выщелачивание в дезинтеграторе увеличивает извлечение металлов почти в два раза, причем анолит электрохимического разложения при механической активации носит ярко выраженный кислотный характер (рис. 2).

В сочетании с сорбцией и экстракционным извлечением металлов технологии выщелачивания делают утилизацию металлосодержащих хвостов экономически выгодной, что составляет основу реализации концепции управления минеральными отходами. Задачей управления является выбор такого способа подготовки, при котором обеспечивается максимальное раскрытие по контактам сростания минералов и минимум потерь ценных компонентов во вторичных хвостах. Степень раскрытия руд в процессе подготовки изменяется от 54 до 8 % (табл. 3).

Математическое моделирование. При разработке математической модели учитывался ряд факторов, основным из которых является миграция металлов отвальными водами в окружающую среду. Кинетическая составляющая процесса для описания концентрационного поля представлена выражением:

$$P \frac{\partial a}{\partial t} + V \frac{\partial a}{\partial x} = -ks(a_n - a), \quad (1)$$

где $a(x, t)$ – концентрация металлов в водах; V – скорость фильтрации вод сквозь отвал; P – эффективная пористость хвостового материала; x – продольная координата; t – время; k – коэффициент массопередачи; s – поверхность, где происходит растворение в единице объема пород; a_n – концентрация насыщения.

Основным фактором поражения экосистем окружающей среды хвостами обогащения и металлургии является природное выщелачивание металлов. Количество металлов, поступающее в экосистемы среды:

$$M_n = \frac{V\gamma(C_1 - C_2)K_n K_p}{K_k K_o K_z}, \quad (2)$$

где V – объем хвостов, м³; γ – плотность хвостов, т/м³; C_1 – начальная концентрация металлов, %; C_2 – конечная концентрация металлов, %; K_p, K_n, K_k, K_o, K_z – соответственно коэффициенты фильтрации раствора сквозь массив хвостов, пиритизации хвостов, кольтации межкускового пространства, наличия кальцита и крупности частиц хвостов.

Управляемое извлечение металлов из хвостов в кучах и перколяторах уменьшает минерализацию окружающей среды на величину:

$$M_y = \frac{V\gamma(C_1 - C_2)K_p K_\phi K_u}{K_k K_z}, \quad (3)$$

где V – объем хвостов, м³; γ – плотность хвостов, т/м³; C_1 – начальная концентрация металлов, %; C_2 – конечная концентрация металлов, %; $K_p, K_\phi, K_u, K_k, K_z$ – соответственно коэффициенты качества растворителя, фильтрации раствора, интенсивности процесса, кольтации межкускового пространства, крупности частиц хвостов.

В ходе выщелачивания из отходов извлекается металл:

$$M_g = \frac{V\gamma(C_1 - C_2)K_a \eta K_z}{K_p K_z K_u}, \quad (4)$$

где V – объем хвостов, м³; γ – плотность хвостов, т/м³; C_1 – начальная концентрация металлов, %; C_2 – конечная концентрация металлов, %; K_a, K_z, η, K_p, K_u – соответственно коэффициенты активации материала при активации, расхода энергии, полезного действия установки, окислительно-восстановительной способности реагента, износа роторов дезинтегратора.

Таблица 3

Технологические возможности раскрытия хвостов

Способы измельчения	Крупность, мм	Выход класса, %	Раскрытие, %	Эффективность, ед.
Шаровое	1–0	11,4	77,5	0,48
Стержневое	1–0	10,1	54,5	0,38
Каскадное	5–0	17,5	71,0	0,59
Динамическое самоизмельчение	4–0	8,4	80,2	0,87
Самоизмельчение	5–0	12,0	70,1	0,12
Полусамоизмельчение	5–0	10,8	71,5	0,13
Центробежное	2–0	21,2	74,3	0,14
Инерционное	8–0	6,8	65,2	0,11
Электроимпульсное	8–0	11,9	79,5	1,51

Интенсивность загрязнения окружающей среды металлами определяется количеством извлекаемых металлических ингредиентов и временем протекания физико-химических процессов:

$$I_m = f(M)dt = [M_n T_n - (M_r T_r + M_g T_g)], \text{ т/ед.вр.}, \quad (5)$$

где T_n – время природного выщелачивания; T_y – время управляемого выщелачивания; T_d – время выщелачивания в дезинтеграторах.

Предлагаемая интегральная аналитическая модель описывает совокупность физико-химических процессов при выщелачивании металлов из хвостов обогащения и металлургии:

$$\begin{cases} P \frac{da}{dt} + V \frac{da}{dx} = -KS(a_n - a) \\ \sum_i M = Q\Delta t \sum_i \sum_0^t c(a) \\ A_{n+1} = A_n + K_a A_n t a \\ I_m = M_n T_n - (M_y T_y + M_d T_d), \end{cases} \quad (6)$$

где $a_n(x, t)$ – концентрация металлов в водах г/дм³; V – скорость фильтрации вод сквозь отвал; P – эффективная пористость хвостового материала; x – продольная координата; t – время; K – коэффициент массопередачи; S – поверхность растворения в единице объема пород; a_n – концентрация насыщения, г/дм³; Q – количество растворителей; $c(a)$ – зависимость процесса от концентрации металлов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Авторами определены технологические параметры извлечения металлов из хвостов обогащения в активаторе-дезинтеграторе. В качестве независимых переменных выбраны: плотность тока, концентрация цинка и свинца в растворе и кислотный показатель реагента. В качестве параметров оптимизации приняты удельный расход электроэнергии (кВт·ч/т цинка) и удельные расходы материалов и реагентов (кг/т цинка). Константы приняты по данным практики завода “Электроцинк”. Разработана матрица планирования многофакторного эксперимента, уровни и факторы которого представлены в табл. 4.

Получена нелинейная регрессионная модель удельного расхода электроэнергии на активацию с независимыми переменными в безразмерном масштабе:

$$W = 3067,43 + 79,57X_1 - 70,60X_2 + 75,39X_3 - 12,32X_4 - 13,81X_1X_2 + 2,15X_1X_3 - 2,23X_1X_4 - 1,67X_2X_3 - 1,84X_2X_4 - 0,35X_3X_4, \quad (7)$$

где W – расход энергии, кВт/т; X_1 – плотность потока; X_2 – концентрация цинка в продуктивном растворе; X_3 – концентрация свинца в продуктивном растворе; X_4 – кислотность анолита в дезинтеграторе.

Доля удельного расхода электроэнергии в структуре себестоимости составляет 65 %, что позволяет использовать его в качестве критерия оптимизации. Наибольшее влияние на удельный расход электроэнергии при электролизе оказывают плотность тока, концентрация металлов в растворе. Результаты математического моделирования утилизации хвостов для условий РСО-Алания и значения независимых переменных, обеспечивающих минимальный расход электроэнергии, составили в нормированном виде – $X_1 = -1$, $X_2 = +1$, $X_3 = -1$, $X_4 = +1$, что в переводе в натуральный масштаб составляет: $i = 400$ А/м², $CZn = 145$ г/дм³, $CMn = 2$ г/дм³, $T = 40$ °С. Как следует из модели (7), рекомендуется продолжить исследование в направлении поиска факторов, влияющих на значение вышеуказанной целевой функции.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ

Критерий эколого-экономической оценки минерально-сырьевого потенциала оценивается величиной прироста совокупного регионального дохода, определяемой по величине экономии совокупных эколого-экономических затрат:

$$\mathcal{D} = \left\{ \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^L \sum_{t=0}^T K_E (C_{jikt} + R_{ikt} - I_{ikt}) x_{jikt} \right\} \rightarrow \max, \quad (8)$$

где C_{jikt} – традиционная стоимость продукции без учета рентного дохода; R_{ikt} – суммарная горно-экологическая рента у поставщиков и потребителей; I_{ikt} – поток затрат; x_{jikt} – объем выпускаемой и потребляемой продукции; K_E – коэффициент приведения разновременных инвестиций; $j = 1 \dots n$ – соответственно номер и количество предприятий-производителей; $i = 1 \dots m$ – соответственно номер и количество предприятий-потребителей; $k = 1 \dots L$ – соответственно вид и количество товара из минерального сырья; $t = 0 \dots T$ – соответственно год и длительность периода.

Ущерб от хвостов основной деятельности сравним с объемом производства. Например, Садонский

Таблица 4

Уровни и факторы экспериментального исследования

Переменные	Факторы	Нижний уровень	Начальный уровень	Верхний уровень	Интервал варьирования
i , А/м ²	(X_1)	400	500	600	100
CZn , г/дм ³	(X_2)	105	125	145	20
CPb , г/дм ³	(X_3)	2	5	8	3
T , °С	(X_4)	30	35	40	5

свинцово-цинковый комбинат в последние годы производит продукции на сумму около 40 млн руб., а штраф за нанесенный им окружающей среде ущерб, большая доля которого связана с содержанием хвостохранилища Мизурской обогатительной фабрики, составляет 1 млн руб. (цены Российской Федерации).

На основании комплексных исследований решена научно-практическая задача по разработке природоохранных технологий глубокого извлечения металлов из хвостов переработки руд, включающая выявление зависимости между экологическими и технологическими факторами утилизации металлосодержащих хвостов, создание технологий активации хвостов и методики оценки влияния хвостов на состояние окружающей среды в зоне влияния горно-металлургического производства.

Выводы

1. Обоснована возможность повышения экологической безопасности промышленных регионов за счет вовлечения объемов складированных хвостов переработки в производство, а также эколого-экономическая эффективность комбинированного выщелачивания металлов из хвостов горного, обогатительного и металлургического переделов руд.

2. Доказано, что технологии выщелачивания хвостов после активации в дезинтеграторах позволяют извлекать из них до 90 % металлов, что сопровождается получением экологического и экономического эффекта.

3. Предложена интегральная аналитическая модель, описывающая совокупность физико-химических процессов при выщелачивании металлов из хвостов обогащения и металлургии, учитывающая тип оборудования перерабатывающих комплексов, режим переработки хвостов с ограничениями, которые накладываются экологическими требованиями к продуктам переработки.

4. Получены количественные характеристики эффекта природо- и ресурсосбережения за счет переработки металлосодержащих хвостов по критерию минимума расходов на переработку и максимума снижения ущерба окружающей среде в зоне влияния горно-металлургического производства.

5. Раскрыты взаимосвязи, определяющие экологическую эффективность природоохранных тех-

нологий переработки металлосодержащих хвостов путем выщелачивания в быстрходных аппаратах, позволяющие радикально снизить ущерб окружающей среде и затраты на содержание хранилищ хвостов.

6. Результаты исследований использованы при проектировании технологий разработки месторождений и излагаются при изучении дисциплин в учебных заведениях Украины и Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сатцаев А.М. Комбинированное выщелачивание металлов при утилизации хвостов // Цветная металлургия. – 2002. – №7. – С. 40–43.
2. Природоохранные и техногенные проблемы экологии Осетии / В.И. Голик, С.М. Гуреев, Т.С. Цидаев и др. Вестник МАНЭБ. – С.-Пб – Владикавказ: “Терек”, 2002. – №10. – С. 162–165.
3. Ляшенко В.И. Научные основы повышения безопасности жизнедеятельности в уранодобывающих регионах // Экологія довкілля та безпека життєдіяльності. – 2004. – №3. – С. 56–70.
4. Ляшенко В.И. Охрана окружающей природной среды и защита населения в уранодобывающих регионах // Экологія довкілля та безпека життєдіяльності. – 2005. – №4. – С. 82–92.
5. Кошик Ю.И. Ляшенко В.И. Научное сопровождение уранового производства в Украине // Экологія довкілля та безпека життєдіяльності. – 2006. – №6. – С. 5–17.
6. Ляшенко В.И., Голик В.И. Природоохранные и ресурсосберегающие технологии подземной разработки урановых месторождений // Экологія довкілля та безпека життєдіяльності. – 2007. – №1. – С. 53–67.
7. Ляшенко В.И., Назаренко В.М., Назаренко М.В. Охране недр – надежное инженерное и системное обеспечение // Экологія довкілля та безпека життєдіяльності. – 2007. – №4. – С. 5–21.
8. Ляшенко В.И., Назаренко В.М., Назаренко М.В. Рациональному использованию недр урановых месторождений – надежное геолого-маркшейдерское и приборное обеспечение // Экологія довкілля та безпека життєдіяльності. – 2007. – №6. – С. 5–19.
9. Ляшенко В.И., Дудченко А.Х., Ткаченко А.А. Сейсмобезопасная технология подземной разработки урановых месторождений Украины под жилой застройкой и охраняемыми объектами // Экологія довкілля та безпека життєдіяльності. – 2008. – №1. – С. 50–60.