

УДК 622.755+669.054.8:693.542.4

**ИЗВЛЕЧЕНИЕ МЕТАЛЛОВ ИЗ ЛЕЖАЛЫХ ХВОСТОВ
С ЦЕЛЬЮ УТИЛИЗАЦИИ**

С. И. Евдокимов¹, В. С. Евдокимов^{1,2}

¹*Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(Государственный технологический университет), E-mail: eva-ser@mail.ru,
ул. Николаева, 44, 362021, г. Владикавказ, РСО-Алания*

²*ООО “Научно-производственное предприятие ГЕОС”, E-mail: 19-Vadik-93@mail.ru*

Приведены результаты исследования возможности утилизации песков хвостохранилища, образованного вследствие производственной деятельности флотационной свинцово-цинковой обогатительной фабрики. Утилизацию сульфидов в товарные селективные концентраты ведут в два приема: из хвостов извлекают сульфидный продукт, который перерабатывают по технологии действующего производства совместно с рудой или самостоятельно по схеме струйной флотации. Извлечение сульфидов из хвостов осуществлено с использованием канального гидросепаратора. Отличительная особенность построения схемы флотации — струйное противоточное движение исходного питания (в обоих циклах флотации) и чернового концентрата. Разработаны условия и рецептура изготовления из нерудной части хвостов качественной продукции: силикатного кирпича, стеклянной тары, стекловолокна, марблита.

Лежалые хвосты, гидросепарация, тонкослойная зона, флотация, струйная схема, извлечение, свинец, цинк, нерудная фракция, утилизация

Доля горно-металлургической индустрии в ВВП России составляет 5 %, в промышленном производстве — 17.3 %, а в экспорте — 14.2 %, что обеспечивает ей четвертое место в мире [1, 2]. Однако в результате добычи и переработки только руд цветных металлов в стране ежегодно образуется более 60 млн т отходов [3], обращение с которыми представляет потенциальную опасность для среды обитания людей и биосферы. В то же время отсутствие дорогостоящих операций рудоподготовки в технологической схеме обогащения хвостов (в структуре цеховой себестоимости затраты на дробление и измельчение руды составляют 40–60 % [4]) позволяет вовлекать их в хозяйственный оборот с получением положительного финансового результата. Поэтому в условиях нарастающего дефицита минеральных ресурсов утилизация техногенных отходов является актуальной задачей.

Установлено [5–9], что при непродолжительном хранении хвостов из них можно извлечь флотацией в коллективные продукты от 35 до 70 % цветных металлов, но при длительном хранении (> 30 лет), в связи с ухудшением фазового состава хвостов, флотационное обогащение становится неэффективным, его заменяют металлургическими методами [10–12], что повышает затраты на переработку.

Из результатов расчетов следует [13], что извлеченное из отходов техногенное сырье экономически эффективно перерабатывать непосредственно на предприятии, производящем отходы, и по технологии, вписываемой в схему основного производства [6, 14]. В настоящей статье

приводятся результаты исследований основанной на этом принципе технологии вовлечения в хозяйственный оборот лежалых песков Унальского хвостохранилища: 1) из песков хвостохранилища с использованием недорогих гравитационных методов обогащения извлекают продукт, который по содержанию полиметаллов аналогичен свинцово-цинковой руде Джимидонского месторождения, перерабатываемой на Мизурской обогатительной фабрике (МОФ); 2) полученное техногенное сырье и текущую руду совместно перерабатывают по схеме действующего производства.

Унальское хвостохранилище образовано в результате обогащения на МОФ по схеме прямой селективной флотации Pb-Zn руд Садоно-Згидской группы месторождений; хвостохранилище (проектная мощность — 4 млн т, площадь землеотвода — 20 га) находится на террасе левого берега р. Ардон в 7 км от МОФ. В настоящее время рудной базой МОФ служат руды Джимидонского месторождения (РСО-Алания).

Для исследований пробы хвостов отобраны из 98 скважин с внутренним диаметром 32 мм и глубиной до 8,5 м, пробуренных комплексом типа “Эмпайр” в сухой части хвостохранилища шириной от 45 до 60 м на протяжении 750 м в 14 профилях в азимуте 336° по сети 50×50 м. По данным минералогического анализа, хвосты на 80–85 % представлены кварцем (до 65 %), полевыми шпатами, хлоритом, слюдами; большая часть нерудных минералов находится в свободном состоянии и имеет размер 70–80 мкм, но встречаются зерна крупностью до 0.4 мм. На долю пирита приходится до 10 %, остальных сульфидов (галенит, сфалерит, пирротин, халькопирит) — от 5 до 10 %. Сульфиды представлены свободными минералами, сростками между собой и в меньшей степени с нерудными минералами. Возможные колебания качества песков Унальского хвостохранилища отражают данные табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Статистическая характеристика содержания металлов в пробах хвостов

Металл	Содержание, %		Дисперсия	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации, %
	минимальное	максимальное			
Свинец	0.08	0.57	0.0141	0.1183	57.14
Цинк	0.14	0.93	0.2063	0.4542	72.58
Медь	0.01	0.07	0.00038	0.0195	48.75
Железо	4.18	10.78	10.9742	3.3127	40.42
Золото, г/т	0.08	0.27	0.0028	0.0533	31.29

Пески Унальского хвостохранилища имеют извлекаемую (по сульфидам и золоту) и потребительскую (по нерудной части) ценность. Сульфидные минералы обладают повышенной плотностью относительно нерудных, что предопределяет возможность использования разницы в этом физическом свойстве для сепарации материала хвостов.

Для гравитационного обогащения хвостов взят гидросепаратор (рис. 1) в виде закрытых наклонных каналов с восходящими потоками среды разделения со специально формируемым полем скоростей [15, 16].

Аппарат представляет собой три трубы 1 круглого сечения, в которых треугольные пирамидки (обращенные основанием к верхней стенке канала) сужают сечение выше зоны разгрузки тяжелой фракции. Трубы устанавливаются под углом наклона ~60° к горизонтальной плоскости. Скорость восходящего потока воды регулируют гидравлической системой из вентиля 2, водяного коллектора 3 и насоса 4. Для разгрузки тяжелой и легкой фракций служат емкости 5 и 6; для гидротранспорта фракции имеются песковые насосы 7.

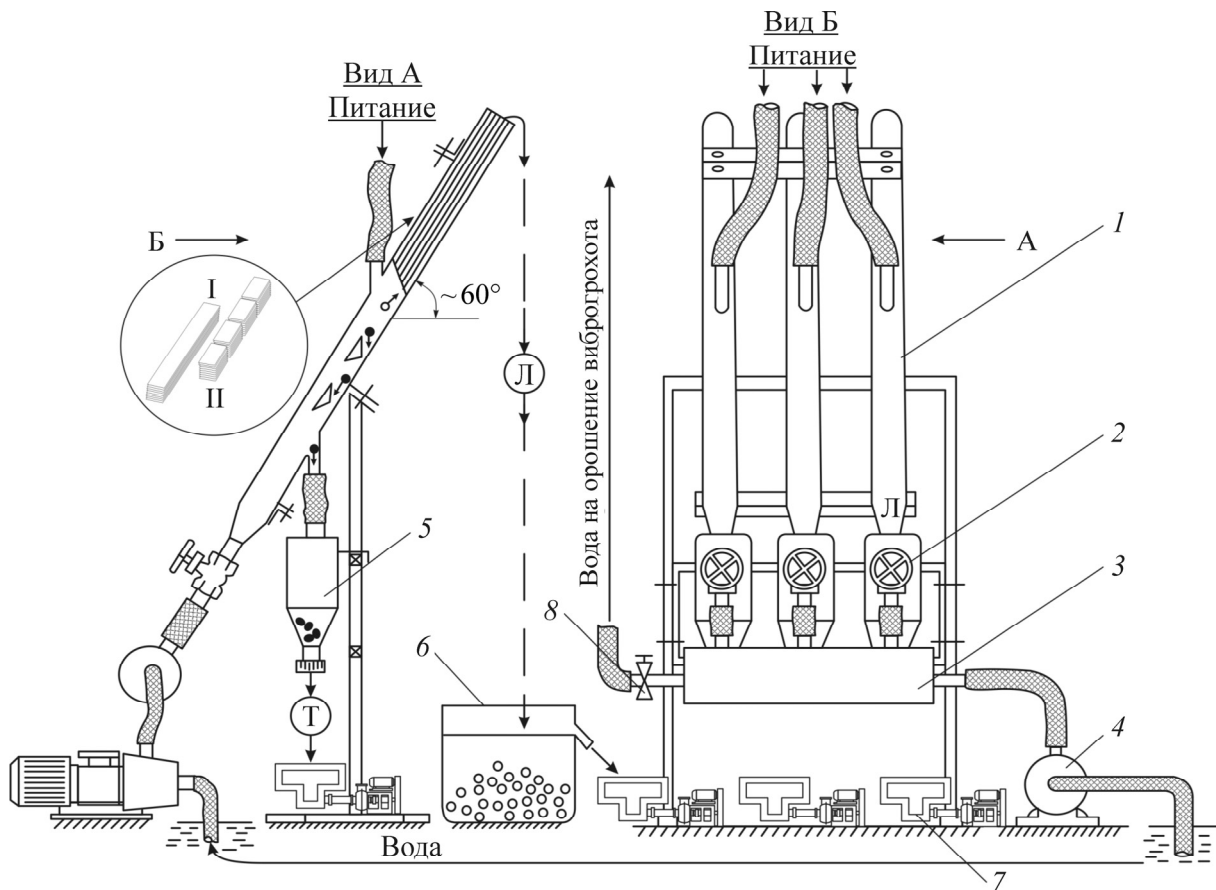


Рис. 1. Схема канального гидросепаратора

Частицы с большой гидравлической крупностью, скорость которых меньше скорости восходящего потока воды, перемещаются вниз канала. В зоне сужения сечения канала (между вершиной пирамиды и стенкой канала) частицы попадают в область повышенных скоростей потока, движение их замедляется и прекращается: перед сужением образуется скопление частиц, в которое вовлекаются новые частицы. Циркуляционное движение скопившихся частиц заканчивается тем, что под действием силы тяжести частицы с большой плотностью выпадают из потока и по стенке канала разгружаются через патрубок 5. Остальные частицы в итоге будут вынесены потоком воды вверх и сформируют легкую фракцию в емкости 6. Удельная производительность отнесена к единице площади проекции трубы аппарата на горизонтальную плоскость и равна $0.3 - 0.5 \text{ т}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$.

В работе конструкция рабочей зоны гидросепаратора усовершенствована на основе решения задачи об оценке влияния стенки на поступательное движение частицы параллельно плоской стенке.

Для случая взаимодействия частицы с неподвижной стенкой, когда расстояния между частицами много больше их размера и размеры частицы R малы по сравнению с расстоянием l от частицы до поверхности стенки ($R/l \ll 1$), принято, что на взаимодействие частицы со стенкой влияет форма частицы, положение частицы относительно стенки, геометрия стенки. Движение частицы в направлении оси Ox (ее направление совпадает с поверхностью стенки) и оси Oy (направленной перпендикулярно стенке) определяет ее положение в момент времени t . В выбранной системе координат выражения для составляющих кинетической энергии E жидкости запишем в виде [17]:

$$2 E_x = \frac{2}{3} \pi \rho_1 R^3 \left(1 + \frac{3}{16} \frac{R^3}{y^3} \right) (u_x - v_x)^2, \quad (1)$$

$$2 E_y = \frac{2}{3} \pi \rho_1 R^3 \left(1 + \frac{3}{8} \frac{R^3}{y^3} \right) (u_y - v_y)^2, \quad (2)$$

где ρ_1 — плотность жидкости; u_x, u_y — компоненты скорости частицы $\vec{u}(t)$ в декартовой системе координат (x, y, z) ; v_x, v_y — компоненты скорости жидкости $\vec{v}(t)$; R — размер обтекаемой жидкостью частицы. Полная кинетическая энергия дисперсной системы твердое–жидкость будет равна

$$E = \frac{1}{2} \left\{ \frac{4}{3} \pi \rho_2 R^2 u_x^2 + \frac{2}{3} \pi \rho R^3 \left(1 + \frac{3}{16} \frac{R^3}{y^3} \right) (u_x - v_x)^2 + \frac{4}{3} \pi \rho_2 R^2 u_y^2 + \frac{2}{3} \pi \rho R^3 \left(1 + \frac{3}{8} \frac{R^3}{y^3} \right) (u_y - v_y)^2 \right\}, \quad (3)$$

где ρ_2 — плотность твердой частицы.

Подставив в (3) уравнение Лагранжа в виде

$$F_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E}{\partial u_i} \right) - \frac{\partial E}{\partial x_i}, \quad (4)$$

(здесь u_i, x_i — соответственно обобщенные скорость и координата частицы в момент времени t), получим компоненты так называемой обобщенной силы Бернулли, действующей на частицу со стороны жидкости:

$$F_x = \frac{4}{3} \pi \rho_1 R^3 \left(\delta + \frac{1}{2} + \frac{3}{32} \frac{R^3}{y^3} \right) \frac{du_x}{dt} - \frac{2}{3} \pi \rho_1 R^3 \left(1 + \frac{3}{16} \frac{R^3}{y^3} \right) \frac{dv_x}{dt} + \frac{1}{8} \pi \rho_1 \frac{R^3}{y^3} \frac{d(u_x - v_x)}{dt} - \frac{3}{8} \pi \rho_1 (u_x - v_x)(u_y - v_y), \quad (5)$$

$$F_y = \frac{4}{3} \pi \rho_1 R^3 \left(\delta + \frac{1}{2} + \frac{3}{32} \frac{R^3}{y^3} \right) \frac{du_y}{dt} - \frac{2}{3} \pi \rho_1 R^3 \left(1 + \frac{3}{16} \frac{R^3}{y^3} \right) \frac{dv_y}{dt} + \frac{1}{4} \pi \rho_1 \frac{R^3}{y^3} \frac{d(u_y - v_y)}{dt} - \frac{3}{8} \pi \rho_1 \left[(u_y - v_y)^2 - \frac{1}{2} (u_x - v_x)^2 \right]. \quad (6)$$

где $\delta = \rho_2 / \rho_1$; $dx/dt = u_x - v_x$; $dy/dt = u_y - v_y$.

С другой стороны, в рассматриваемой задаче на тело со стороны жидкости действуют силы сопротивления (сила трения Стокса, сила, необходимая для ускорения присоединенной массы, и сила Бассэ, учитывающая нестационарность движения частицы), входящие в формулу Буссинеска:

$$\vec{F}(t) = -6\pi\mu R \left(\vec{u}(t) + \frac{1}{9} \frac{R^2}{\nu} \frac{d\vec{u}}{dt} + \frac{R}{\sqrt{\pi\nu}} \int_0^t \frac{d\vec{u}}{\sqrt{t-\tau}} d\tau \right), \quad (7)$$

(где μ — динамическая вязкость жидкости; $\nu = \mu/\rho_1$ — кинематическая вязкость жидкости), которую для случая движения твердой частицы в турбулентном потоке жидкости вдоль стенки канала преобразуем к виду

$$\vec{F} = \frac{4}{3} \pi \rho_1 R^3 (\delta - 1) \vec{g} + 6\pi \rho_1 R \nu (\vec{u} - \vec{v}) +$$

$$+ 6\pi \rho_1 R^3 \sqrt{\frac{\nu}{\pi}} \int_0^t \frac{d}{d\tau} (\vec{u} - \vec{v}) \frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}},$$
(8)

\vec{g} — ускорение силы тяжести.

Из условия равенства силы Бернулли (6) силам сопротивления (8) получим уравнение движения частицы в выбранной системе координат:

$$\left(1 + b \frac{1}{16} \frac{R^3}{y^3}\right) \frac{du_x}{dt} = b \frac{dv_x}{dt} \left(1 + \frac{1}{16} \frac{R^3}{y^3}\right) + (v_x - u_x) +$$

$$+ \frac{c}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \left[\frac{d}{d\tau} (v_x - u_x) / \sqrt{t-\tau} \right] d\tau + b \frac{3}{16} \frac{R^3}{y^4} (v_x - u_x)(v_y - u_y),$$
(9)

$$\left(1 + b \frac{1}{8} \frac{R^3}{y^3}\right) \frac{du_y}{dt} = b \frac{dv_y}{dt} \left(1 + \frac{1}{8} \frac{R^3}{y^3}\right) +$$

$$+ a(v_y - u_y) + \frac{c}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{d}{d\tau} (v_y - u_y) \frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}} dt +$$
(10)

$$+ b \frac{3}{16} \frac{R^3}{y^4} \left[(v_y - u_y)^2 - \frac{1}{2} (v_x - u_x)^2 \right] - g \frac{\delta - 1}{\delta + 1/2},$$

где $a = \frac{9\nu}{2R^2(\delta + 1/2)}$; $b = \frac{3}{2(\delta + 1/2)}$; $c = \frac{9\sqrt{\pi}}{2R(\delta + 1/2)}$.

Как следует из полученного решения, движение частицы в канале отличается от движения в неограниченной жидкости на величину поправки к гидродинамической силе, имеющей порядок R^3/l^3 : наличие стенки быстро приближает движение частицы к установившемуся режиму. Выражения (9), (10) можно использовать для оценки скорости приближения течения жидкости к установившемуся режиму при данной геометрии рабочей зоны. При $\delta > 1$ интенсивность движения частицы возрастает по мере приближения к стенке, т. е. с ростом поправки R^3/l^3 ; в случае тяжелой частицы (при $\delta \rightarrow \infty$) влияние стенки на интенсивность движения частицы практически отсутствует при любом значении поправки R^3/l^3 .

Из теоретического анализа движения частиц в каналах следует вывод об эффективности сепарации частиц в тонких слоях жидкости. С целью получения тонкослойных рабочих зазоров в разгрузочную часть канала (см. рис. 1) помещен пакет пластин (I), в том числе это может быть поликаскадный (например, четырехкаскадный) пакет (II).

По результатам обогащения 14 проб хвостов на гидросепараторе построены кривые обогатимости (в координатах “извлечение металла – выход тяжелой фракции”) сульфидов и золота. Из анализа кривых следует, что для всех металлов наблюдается закономерное увеличение извлечения с ростом выхода тяжелой фракции (наименее выраженная кривая обогатимости золо-

та). Извлечение сульфидов железа, свинца и меди монотонно увеличивается во всем диапазоне значений выхода тяжелой фракции. Но извлечение золота является предельным уже при выходе тяжелой фракции 20–25 %, а прироста извлечения цинка не наблюдается при увеличении выхода тяжелой фракции свыше 30 %. С точки зрения извлекаемой ценности металлов выход тяжелой фракции рационально поддерживать на этом уровне.

В табл. 2 приведены результаты обогащения песков Унальского хвостохранилища с использованием гидросепаратора в условиях Мизурской ОФ; тяжелую фракцию гидросепарации перечищали на концентрационном столе типа СКО-15.

ТАБЛИЦА 2. Результаты гравитационного обогащения песков Унальского хвостохранилища, %

Продукт	Выход	Содержание					Извлечение				
		Au, г/т	Zn	Pb	Cu	Fe	Au, г/т	Zn	Pb	Cu	Fe
Гидросепарация исходных песков											
Тяжелая фракция	31.36	0.23	1.06	0.55	0.076	16.99	42.43	87.48	82.13	79.45	73.69
Хвосты-1	68.64	0.14	0.069	0.055	0.009	2.77	57.57	12.52	17.87	20.55	26.31
Доводка тяжелой фракции гидросепарации на столе											
Сульфидный продукт	4.39	1.09	5.22	2.71	0.36	38.38	28.15	60.30	56.57	52.68	23.30
Хвосты-2	26.97	0.09	0.38	0.20	0.03	13.51	14.28	27.18	25.56	26.77	50.39
Исходные пески	100	0.17	0.38	0.21	0.03	7.23	100	100	100	100	100

Сопоставимые результаты получены в ООО “НВП ЦЕНТР-ЭСТАgeo” [18] при обогащении песков Унальского хвостохранилища на винтовом шлюзе ШВ-750 с перечисткой тяжелой фракции шлюза на концентрационном столе.

В настоящее время рудной базой Мизурской ОФ является участок Бозанг месторождения Джимидон. На фабрике после измельчения руды (в присутствии соды 68 г/т) до крупности 55–60 % класса – 74 мкм (МШР-2.7×3.6 в замкнутом цикле с 2КСН-1500) и подавления флотации минералов цинка (в агитацию 50 г/т цианида натрия и 200 г/т цинкового купороса) из нее извлекают минералы свинца смесью бутилового ксантогената калия (9 г/т), бутилового аэрофлота (5 г/т) и Т-89 (20 г/т) по схеме, включающей операцию основной флотации, две контрольные и три перечистки черного Pb концентрата (в I перечистку подают 10 г/т NaCN, в I контрольную — 100 г/т ZnSO₄, 10 г/т NaCN, 4 г/т ксантогената и 10 г/т Т-80); промпродукты возвращают в предыдущие операции флотации. Для повышения извлечения окисленных форм минералов свинца подают 50 г/т Na₂S. Минералы цинка извлекают из хвостов свинцового цикла флотации бутиловым ксантогенатом калия (20 г/т в основную флотацию и 5 г/т — в I контрольную) и Т-80 (20 г/т) после активации медным купоросом (350 г/т) в известковой среде (2.5 кг/т CaO). Структура цинкового цикла флотации аналогична свинцовому. После операции II контрольной флотации хвосты считают отвальными. В лабораторных условиях по схеме и режиму МОФ проведены опыты по флотации руд (табл. 3).

Сульфидная часть лежалых хвостов и руда Джимидонского месторождения по минералогическому составу мало отличаются друг от друга и поэтому могут перерабатываться по единой технологии. Для опытов по флотации из сульфидного продукта и руды Джимидонского месторождения, взятых в соотношении 1:9, была составлена шихта. Установлено, что при таком соотношении продуктов технологические показатели флотации шихты практически не отличаются от показателей флотации руды.

ТАБЛИЦА 3. Результаты флотации руд месторождения Джимидон по фабричной схеме и режиму в опыте, проведенном по принципу непрерывного процесса, %

Продукт	Выход	Содержание		Извлечение	
		Pb	Zn	Pb	Zn
Pb концентрат	1.96	61.70	3.90	80.62	2.55
Zn концентрат	5.03	1.20	49.43	4.02	82.88
Отвальные хвосты	93.01	0.25	0.47	15.36	14.57
Исходная руда	100.0	1.50	3.00	100.0	100.0

С целью повышения технологических показателей переработки шихты в схему флотации внесли изменения: для увеличения содержания извлекаемых металлов в операции основной флотации использован принцип струйного движения исходного питания цикла и чернового концентрата [19, 20]. По результатам флотации шихты в опытах, моделирующих замкнутый цикл, составлена качественно-количественная схема (рис. 2).

Из сравнения результатов флотации руды по фабричной технологии (см. табл. 3) и шихты по схеме струйной флотации (рис. 2) следует, что во втором случае извлечение металлов в одноименные концентраты выше (свинца — на 3.39 % и цинка — на 3.18 %) за счет снижения их потерь с отвальными хвостами.

Для определения возможного уровня сквозного извлечения металлов из лежалых хвостов в селективные концентраты по схеме рис. 2 проведены опыты по флотации сульфидного продукта без подшихтовки к руде (табл. 4).

Результаты исследования флотиремости сульфидной части лежалых хвостов показали, что из нее могут быть выделены селективные концентраты с высокими технологическими показателями: в свинцовый концентрат марки КС2-А может быть извлечено (от исходных песков) 49.18 % Pb и 53.54 % Zn — в цинковый концентрат марки КЦ-2.

Таким образом, сульфидный продукт, выделенный из лежалых песков хвостохранилища, по своему вещественному составу и технологическим свойствам можно отнести к качественному свинцово-цинковому сырью, которое может быть переработано самостоятельно или в виде добавки к руде.

Для повышения инвестиционной привлекательности проекта вовлечения в хозяйственный оборот лежалых песков Унальского хвостохранилища необходимо решение вопроса утилизации их нерудной части — легкой фракции гидросепарации. В легкой фракции содержится, %: SiO₂ — 73.7, Al₂O₃ — 9.13, TiO₂ — 0.15, Fe₂O₃ — 3.08, CaO — 2.78, MgO — 1.50, K₂O — 2.14, Na₂O — 0.75, S_{общ} — 0.41, CO₂ — 2.28. Основную массу хвостов составляют кварц (66.5 %), карбонаты (7.31 %), полевые шпаты (15.0 %), серицит (8.0 %) слюды (0.42 %), гидроокислы железа (0.39 %), амфиболы (0.78 %) и др. минералы. Около 30 % массы легкой фракции гидросепарации проходит через ячейку Ø 0.1 мм.

ТАБЛИЦА 4. Результаты селективной флотации сульфидного продукта в опыте, моделирующем замкнутый цикл, %

Продукт	Выход	Содержание		Извлечение	
		Pb	Zn	Pb	Zn
Pb концентрат	3.48	67.70	2.83	86.94	1.89
Zn концентрат	8.62	2.00	53.77	6.36	88.79
Отвальные хвосты	87.90	0.21	0.55	6.70	9.32
Исходный сульфидный продукт	100.0	2.71	5.22	100.0	100.0

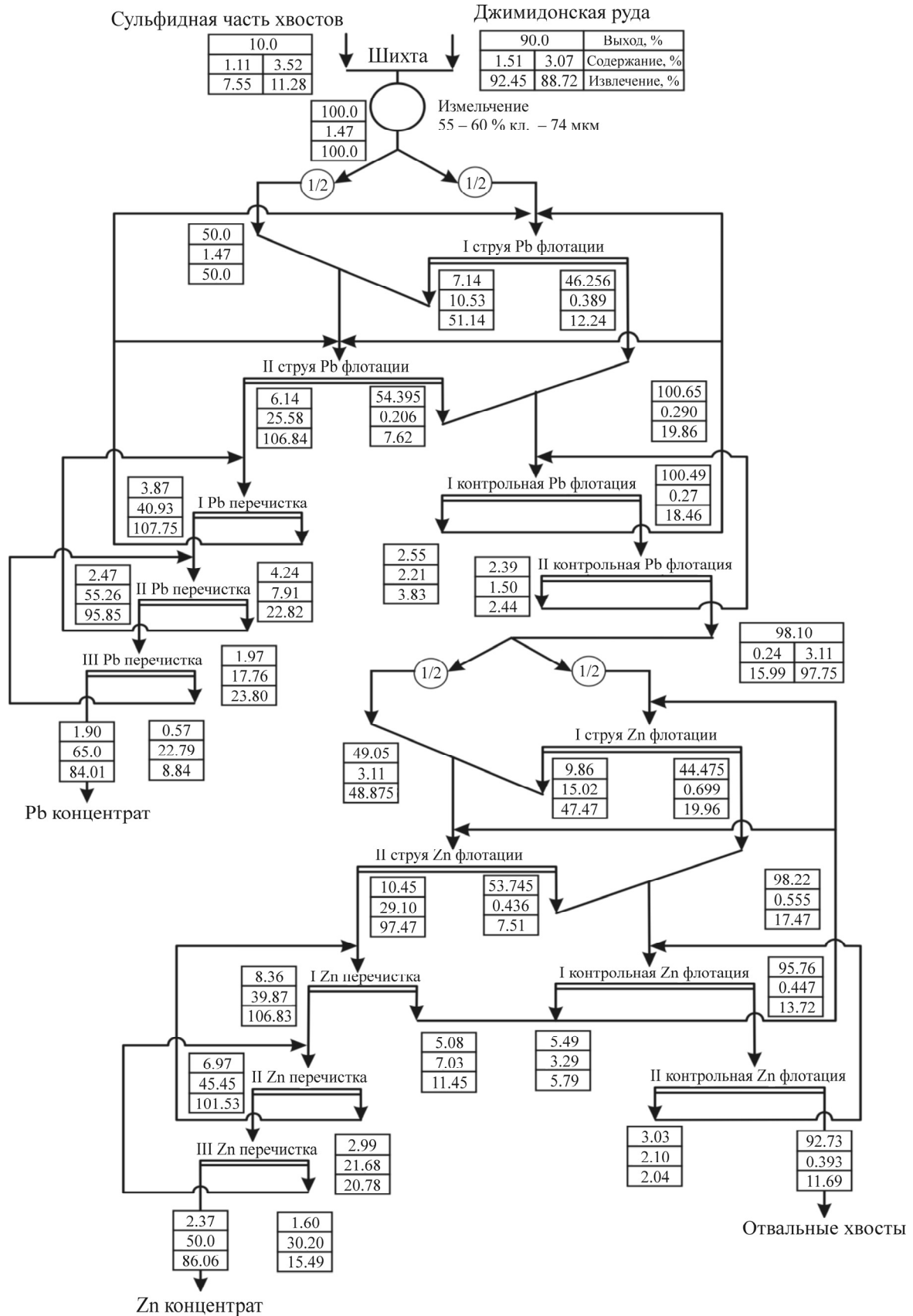


Рис. 2. Качественно-количественная схема флотации шихты в опытах по принципу непрерывного процесса

Предварительное изучение нерудной части хвостов показало, что этот материал может найти применение: в металлургической промышленности в качестве формовочных песков и при эксплуатации печей кипящего слоя; в строительном производстве как компонент вяжущего для тяжелого бетоноволокна и силикатного кирпича, для производства посыпки мягкой кровли, а также в качестве кремнеземистого компонента в автоклавных ячеистых бетонах; в стекольной промышленности для производства зеленой и коричневой тары, производстве теплоизоляционных матов из штапельного стекловолокна, каменного литья, марблита, жидкого стекла; в лакокрасочной промышленности в качестве наполнителя красок, а также с другими целями [9, 21–23].

Исходя из свойств нерудной части песков Унальского хвостохранилища, разработаны условия изготовления силикатного кирпича: активность сырьевой смеси 3 %, формовочная влажность 8.5 %, давление прессования 15 МПа, режим пропаривания (2+8+2) ч при 0.8 МПа. Силикатный кирпич, полученный в полупромышленных условиях, характеризуется показателями: объемная масса 1785 кг/м³, водопоглощение 17.4 %, предел прочности при сжатии 12.8 МПа, предел прочности при изгибе 2.8 МПа, морозостойкость 35 Мрз. Полученный кирпич удовлетворяет требованиям ГОСТ 379-79, предъявляемым к силикатному кирпичу марки “125”. Замена известкового вяжущего известково-песчаным (30 % извести и 70 % нерудной части хвостов) дает возможность повысить марочность кирпича до “150”.

Для производства стеклянной тары темно-зеленого цвета с использованием нерудной части хвостов разработана рецептура сырьевой шихты, масс. %: нерудная часть хвостов — 32.1, кварцевый песок — 46.6, кальцинированная сода — 13.1, сульфат натрия — 7.8, уголь — 0.5. Основные показатели стекла, полученного из шихты приведенного состава: вязкость расплава при 1400°С — 130 пуаз, пределы формования — 1400–1370°С, коэффициент термического расширения — $98.22 \cdot 10^{-7}$ град⁻¹, температура превращения (тд) — 525°С, температура размягчения (т) — 590°С, пределы кристаллизации — 740–980°С. По своим показателям стекло практически не отличается от тарного стекла Владикавказского стекольного завода.

Разработан расход компонентов шихты на 100 кг стекломассы для производства штапельного стекловолокна (его используют для производства теплоизоляционных материалов — плит, матов в рулонах, взамен металла для армирования стройизделий), кг: нерудная часть хвостов — 84.1, известняк (мел) — 23.4, доломит — 1.5, сода кальцинированная — 20.0.

Разработан расход компонентов для производства 100 кг марблита (утолщенного плоского стекла черного цвета, выпускаемого способом периодического и непрерывного проката), кг: нерудная часть хвостов — 64.1, кварцевый песок ВС-050-1 — 11.0, доломит — 22.2, известняк (мел) — 25.7, крокус — 1.2, оксид хрома — 1.6, оксид марганца — 1.5.

В заключение отметим, что экологическая реабилитация территорий, подверженных негативному воздействию объектов накопленного экологического ущерба в результате прошлой хозяйственной деятельности горно-обогачительной промышленности, входит в состав задач, решаемых в рамках Федеральной целевой программы “Ликвидация накопленного экологического ущерба на 2014–2025 годы”, утвержденной Президентом РФ.

ВЫВОДЫ

Из результатов исследования вещественного состава лежалых хвостов свинцово-цинковой обогатительной фабрики следует, что они имеют извлекаемую (по свинцу, цинку и золоту) и потребительскую (по нерудной части) ценность.

С использованием канального гидросепаратора (теоретическим анализом влияния стенки на движение частиц в пристенном слое жидкости доказана эффективность сепарации в тонких рабочих зазорах, получаемых, например, за счет размещения в канале вставки в виде пакета плоскопараллельных пластин, в том числе с вертикальным разрывом) и концентрационного стола в тяжелую фракцию извлечено 56.57 % Pb, 60.30 % Zn, 28.15 % Au.

При обогащении тяжелой фракции гравитации, выделенной из хвостов, совместно с рудой по технологии действующего производства Мизурской ОФ (по схеме прямой селективной флотации и режиму Шеридана–Гриссволда) получены товарные свинцовый (с содержанием 65 % Pb при извлечении 84.01 % Pb) и цинковый (с содержанием 50 % Zn при извлечении 86.06 % Zn) концентраты. Доказано, что применение в схеме струйного противоточного движения исходного питания и черного концентрата обеспечивает повышение извлечения металлов за счет снижения потерь с хвостами. Так, из тяжелой фракции гравитации был выделен свинцовый концентрат марки КС2-А (с извлечением от исходных песков 49.18 % Pb) и цинковый концентрат марки КЦ-2 (с извлечением от исходных песков 53.54 % Zn).

Разработаны условия, рецептура и изготовлены экспериментальные образцы качественной продукции — силикатного кирпича, стеклянной тары, стекловолокна, марблита — из нерудной части хвостов, что снижает затраты на утилизацию лежалых хвостов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ульянов И. Г.** Повышение эффективности системы управления промышленным производством: автореф. дис. ... канд. экон. наук. — М.: ВЗФЭИ, 2007.
2. **Черный С. А.** Эколого-экономическая эффективность переработки металлургических отходов (на примере редкометалльного производства ОАО “Соликамский магниевый завод”): автореф. дис. ... канд. экон. наук. — М.: Изд-во МГУ, 2009.
3. **Чантурия В. А.** Перспективы устойчивого развития горноперерабатывающей индустрии России // Горн. журн. — 2007. — № 2.
4. **Барский Л. А., Козин В. З.** Системный анализ в обогащении полезных ископаемых. — М.: Недра, 1978.
5. **Квитка В. В., Кушакова Л. Б., Яковлева Е. П.** Переработка лежалых хвостов обогатительных фабрик Восточного Казахстана // Горн. журн. — 2001. — № 9.
6. **Демидов В. И., Ложкина Т. В.** Повторная переработка хвостов флотации – путь снижения потерь металлов // Цв. металлы. — 1980. — № 2.
7. **Руднев Б. П.** Обоснование и разработка эффективных методов обогащения текущих и лежалых хвостов обогащения руд цветных, благородных и редких металлов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — М.: Науч. центр “Гинцветмет”, 2004.
8. **Корюкин Б. М., Контлев А. Ф., Жабалан А. В., Сидоров И. И.** Технология переработки лежалых хвостов обогатительной фабрики Среднеуральского медеплавильного завода // Цв. металлургия. — 1991. — № 5.
9. **Ларичкин Ф. Д., Иванов В. А., Третьякова В. П.** О возможностях повторной переработки лежалых хвостов свинцово-цинковых обогатительных фабрик // Цв. металлургия. — 1970. — № 24.
10. **Чантурия В. А., Вигдергауз В. Е., Шрадер Э. А. и др.** Прогрессивные (экологически значимые) технологии переработки медно-цинкового минерального сырья техногенных месторождений: проблемы и решения // Инж. экология. — 2004. — № 5.
11. **Демидов В. И.** К проблеме извлечения металлов из лежалых хвостов обогатительных фабрик // Цв. металлы. — 1973. — № 2.

12. **Шадрунова И. В.** Теоретическое и экспериментальное обоснование интенсивных низкотемпературных процессов выщелачивания некондиционных медьсодержащих георесурсов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — М.: ИПКОН РАН, 2003.
13. **Кудрявский Ю. П., Черный С. А.** Эколого-экономический критерий эффективности технологий переработки производственных отходов в цветной металлургии // Цв. металлы. — 2008. — № 4.
14. **Штойк Г. Г.** Доизвлечение цинка, меди и свинца из отвальных продуктов Зырянской обогатительной фабрики // Обогащение руд. — 1975. — № 5.
15. **Журавлев В. Ф.** Теоретические основы и практика применения гравитационного поликаскадно-противоточного разделения минерального сырья: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М.: МИСиС, 1992.
16. **Паньшин А. М., Евдокимов С. И., Солоденко А. А.** Минералургия: в 2-х т. Т. 1. Золото: теория и промысел. — Владикавказ: МАВР, 2010.
17. **Протодьяконов И. О., Люблинская И. Е., Рыжков А. Е.** Гидродинамика и массообмен в дисперсных системах жидкость–твердое тело. — Л.: Химия, 1987.
18. **Иванов В. Д., Прокопьев С. А.** Винтовые аппараты для обогащения руд и песков в России. — М.: ДАКСИ, 2000.
19. **Паньшин А. М., Евдокимов С. И.** Струйная флотация в условиях специально формируемого высокого содержания металлов в исходной руде // Обогащение руд. — 2009. — № 5.
20. **Паньшин А. М., Евдокимов С. И., Артемов С. В.** Результаты обогащения руд Олимпиадинского месторождения по схеме струйной флотации и аэрации пульпы аэрозолем // Обогащение руд. — 2011. — № 6.
21. **Лебедев Б. Н., Авдюков В. И., Кабиев К. Г.** Возможные направления в организации использования хвостов обогатительных фабрик Казахстана // Цв. металлургия. — 1969. — № 4.
22. **Орлова И. Б., Румянцев Ю. В., Шокол А. Ф.** Об использовании отходов горно-обогатительных предприятий для строительных целей // Цв. металлы. — 1978. — № 5.
23. **Авдюков В. И., Лебедев Б. Н., Кабиев К. Т., Новиков В. И.** Микроудобрения из хвостов обогатительных фабрик Казахстана // Цв. металлургия. — 1969. — № 21.

Поступила в редакцию 12/III 2014