



С.И. Евдокимов



В.С. Евдокимов

## Разработка технологии переработки лежалых хвостов Мизурской фабрики с целью утилизации

С.И. Евдокимов\*, В.С. Евдокимов\*\*

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 затраты на рудоподготовку хвостов уже произведены (их доля в цеховой себестоимости переработки руды составляет 40–60 % [4]), что позволяет организовать экономически рентабельную переработку хвостов с небольшой извлекаемой ценностью. 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 (PCO-A).

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 3 360 по сети 50 x 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.

Пески Унальского хвостохранилища имеют извлекаемую (по сульфидам и золоту) и потребительскую (по нерудной части) ценность.

Сульфидные минералы обладают повышенной плотностью относительно нерудных и это

\* Евдокимов С.И. – к. т. н., доцент кафедры «Обогащение полезных ископаемых» Северо-Кавказского горно-металлургического института (государственного технологического университета).

\*\* Евдокимов В.С. – ООО «НПП ГЕОС», кафедра «Обогащение полезных ископаемых» Северо-Кавказского горно-металлургического института (государственного технологического университета).

Таблица 1

Статистические характеристики содержаний металлов в пробах хвостов

| Наименование металла | Характеристика распределения |           |                        |                         |                              |                               |  |
|----------------------|------------------------------|-----------|------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------------|--|
|                      | среднее значение (% г/т)     | дисперсия | стандартное отклонение | коэффициент вариации, % | минимальное значение (% г/т) | максимальное значение (% г/т) | доверительный интервал среднего значения (% г/т) |
| Свинец               | 0,21                         | 0,0141    | 0,1183                 | 57,14                   | 0,08                         | 0,57                          | 0,14-0,28  |
| Цинк                 | 0,50                         | 0,2063    | 0,4542                 | 72,58                   | 0,14                         | 0,93                          | 0,35-0,88  |
| Медь                 | 0,04                         | 0,00038   | 0,0195                 | 48,75                   | 0,01                         | 0,07                          | 0,03-0,05  |
| Железо               | 7,49                         | 10,9742   | 3,3127                 | 40,42                   | 4,18                         | 10,78                         | 6,19-10,19                                       |
| Золото               | 0,17                         | 0,0028    | 0,0533                 | 31,29                   | 0,08                         | 0,27                          | 0,14-0,20  |

предопределяет возможность использования разницы в этом физическом свойстве для сепарации материала хвостов.

В качестве аппарата для гравитационного обогащения хвостов принят 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 пира-

мидки (обращенные основанием у верхней стенки канала) сужают сечение выше зоны разгрузки тяжелой фракции. Трубы устанавливают под углом наклона  $\sim 60^\circ$  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).

Частицы с большой гидравлической крупно-

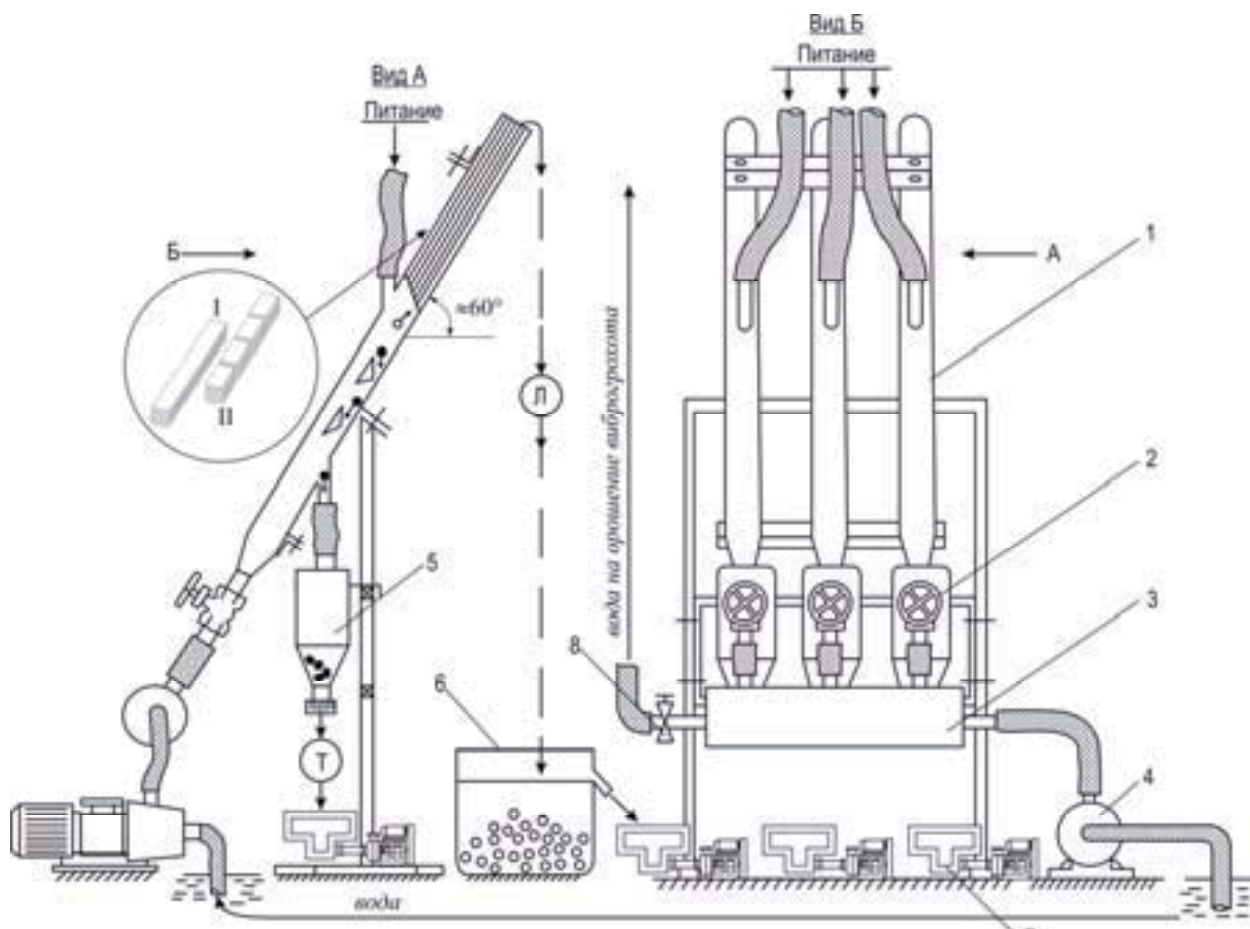


Рис. 1. Схема канального гидросепаратора

стью, скорость которых меньше скорости входящего 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 равна 0,3–0,5 т/час·м<sup>2</sup>

В работе конструкция рабочей зоны гидро-сепаратора 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 момент времени  $t$ . В выбранной системе координат выражения для составляющих кинетической энергии  $E$  жидкости запишем в виде [17]:

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

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

где  $\rho_1$  – 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  $\rho_2$  – 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  $u_p, x_i$  – 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

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

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

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

(где  $\mu$  – 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:

$$\vec{F} = \frac{4}{3} \pi \rho_1 R^3 (\delta - 1) \vec{g} + 6 \pi \rho_1 R \nu (\vec{u} - \vec{v}) + 6 \pi \rho_1 R^3 \sqrt{\frac{\nu}{\pi}} \int_0^t \frac{d\vec{\tau}}{\sqrt{t-\tau}} (\vec{u} - \vec{v}) d\tau \quad (8)$$

где  $\vec{g}$  – ускорение силы тяжести.

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

$$\left( 1 + b \frac{1}{16} \frac{R^3}{y^3} \right) \frac{du_x}{dt} = b \frac{dv_x}{dt} \left( 1 + \frac{1}{16} \frac{R^3}{y^3} \right) + (v_x - u_x) + \frac{c}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \left[ \frac{d}{d\tau} (v_x - u_x) / \sqrt{t-\tau} \right] d\tau + b \frac{3}{16} \frac{R^3}{y^3} (v_x - u_x)(v_y - u_y) \quad (9)$$

$$\left(1 + b \frac{1}{8} \frac{R^3}{y^3}\right) \frac{d u_y}{d t} = b \frac{d v_y}{d t} \left(1 + \frac{1}{8} \frac{R^3}{y^3}\right) +$$

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

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

где введены обозначения:

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

Как следует из полученного решения, движение частицы в канале отличается от движения в неограниченной жидкости на величину поправки к гидродинамической силе, имеющей порядок  $R^3/\beta^3$ : 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 величины поправки  $R^3/\beta^3$ ; в случае тяжелой частицы (при  $\delta \rightarrow \infty$ ) влияние стенки на интенсивность движения частицы практически отсутствует при любом значении поправки  $R^3/\beta^3$ .

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 (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 выраженной является кривая обогатимости золота). 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 перечисляли на концентрационном столе типа СКО-15.

Сопоставимые результаты получены в ООО

«НВП ЦЕНТР-ЭСТАгео» [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 x 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 ZnSO<sub>4</sub>, 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 Na<sub>2</sub>S. 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.

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 черного 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 (табл. 3) и шихты по схеме струйной флотации (рис. 2) следует, что во втором случае извлечение металлов в одно-



Таблица 2

## Результаты гравитационного обогащения песков Унальского хвостохранилища

| Наименование продукта                           | 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   |

именные концентраты выше (свинца – на 3,39 % и цинка – на 3,18 %) за счет снижения их потерь с отвальными хвостами.

С целью 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).

Из результатов исследования флотуемости сульфидной части лежалых хвостов следует, 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 может быть отнесен 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, %: SiO<sub>2</sub> – 73,7, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 9,13, TiO<sub>2</sub> – 0,15, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 3,08, CaO – 2,78, MgO – 1,50, K<sub>2</sub>O – 2,14, Na<sub>2</sub>O – 0,75, S<sub>общ</sub> – 0,41, CO<sub>2</sub> – 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. 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 стекло-волокна, каменного литья, мрамора, 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/м<sup>3</sup>, 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, предъяв-

Таблица 3

## Результаты флотации руд месторождения Джимидон по фабричной схеме и режиму в опыте, проведенном по принципу непрерывного процесса

| Наименование продукта | 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 |

ляемым 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 –  $98,22 \cdot 10^{-7} \text{град}^{-1}$ , 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 (стекловолокно, в данном случае штапельное, 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 (кг) для производства 100 кг марблита (утолщенного

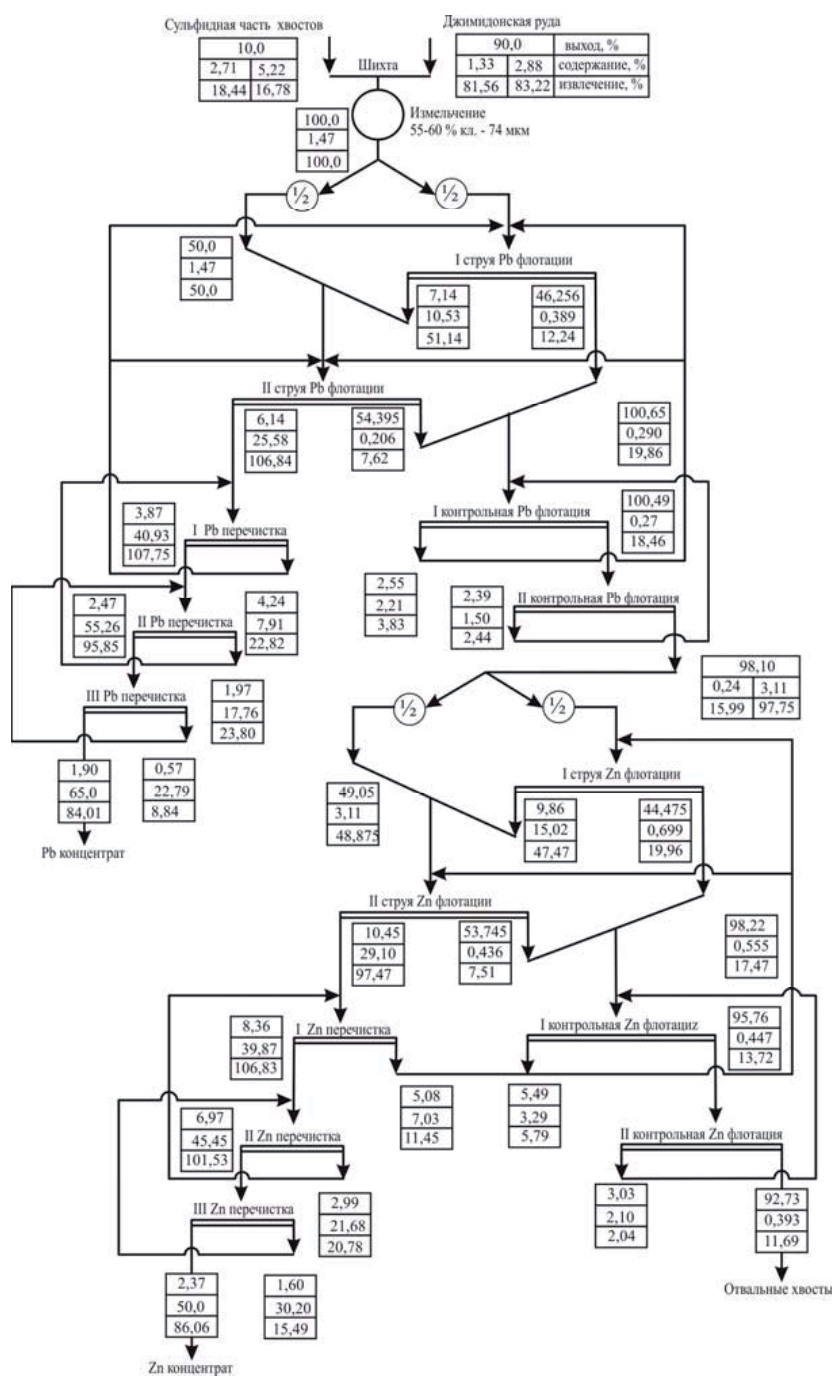


Рис. 2. Качественно-количественная схема флотации шихты в опытах по принципу непрерывного процесса

Таблица 4

Результаты селективной флотации сульфидного продукта в опыте, моделирующем замкнутый цикл

| Наименование продукта       | 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 |

плоского стекла черного цвета, выпускаемого способом периодического и непрерывного проката): 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-обогатительной промышленности, входит в состав задач, решаемых в рамках ФЦП «Ликвидация накопленного экологического ущерба на 2014–2025 годы», утвержденной Президентом РФ.

### Выводы

1. 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.

2. 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 пло-

скопараллельных пластин, в том числе с вертикальным разрывом) и концентрационного стола в тяжелую фракцию извлечено 56,57 % Pb, 60,30 % Zn, 28,15 % Au.

3. 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, в том числе 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).

4. 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.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ульянов И.Г. Повышение эффективности системы управления промышленным производством. – Автореферат дисс. ... канд. эконом. наук. – М., Всероссийский заочный финансово-экономический институт, 2007. – 24 с.
2. Черный С.А. Эколого-экономическая эффективность переработки металлургических отходов (на примере редкометалльного производства ОАО «Соликамский магниевый завод»). Автореферат дисс. ... канд. экономич. наук. – Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, 2009. 24 с.
3. Чантурия В.А. Перспективы устойчивого развития горноперерабатывающей индустрии России // Горный журнал. – 2007. № 2. С. 2–7.
4. Барский Л.А., Козин В.З. Системный анализ в обогащении полезных ископаемых. – М.: Недра, 1978. 486 с.
5. Квитка В.В., Кушакова Л.Б., Яковлева Е.П. Переработка лежалых хвостов обогатительных фабрик Восточного Казахстана // Горный журнал. 2001. № 9. С. 57–61.
6. Демидов В.И., Ложкина Т.В. Повторная переработка хвостов флотации – путь снижения потерь металлов // Цветные металлы. 1980. № 2. С. 90–94.
7. Руднев Б.П. Обоснование и разработка эффективных методов обогащения текущих и лежалых хвостов обогащения руд цветных, благородных и редких металлов. – Автореферат дисс. ... докт. техн. наук. – Москва, ФГУП «Научный центр «Гинцветмет», 2004. 51 с.
8. Корюкин Б.М., Контлев А.Ф., Жабалан А.В., Сидоров И.И. Технология переработки лежалых хвостов обогатительной фабрики Среднеуральского медеплавильного завода // Цветная металлургия. 1991. № 5. С. 18–23.
9. Ларичкин Ф.Д., Иванов В.А., Третьякова В.П. О возможности повторной переработки лежалых хвостов свинцово-цинковых обогатительных фабрик // Цветная металлургия. 1970. № 24. С. 20–22.
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 // Инженерная экология. 2004. № 5. С. 3–11.
11. Демидов В.И. К проблеме извлечения металлов из лежалых хвостов обогатительных фабрик // Цветные металлы. 1973. № 2. С. 78–80.
12. Шадрюнова И.В. Теоретическое и экспериментальное обоснование интенсивных низкотемпературных процессов выщелачивания некондиционных медьсодержащих георесурсов. – Автореферат дисс. ... докт. техн. наук, Москва, ИПКОН РАН, 2003. – 31 с.
13. Кудрявский Ю.П., Черный С.А. Эколого-экономический критерий эффективности технологии переработки производственных отходов в цветной металлургии // Цветные металлы. 2008. № 4. С. 8–11.
14. Штойк Г.Г. Доизвлечение цинка, меди и свинца из отвальных продуктов Зырянской обогатительной фабрики // Обогащение руд. 1975. № 5. С. 9–10.
15. Журавлев В.Ф. Теоретические основы и практика применения гравитационного поликаскадно-противоточного разделения минерального сырья. – Автореферат дисс. ... канд. техн. наук. М., МИСиС, 1992. 30 с.
16. Паньшин А.М., Евдокимов С.И., Солоденко А.А. Минералургия. В 2-х т. Т. 1. / Паньшин А.М., Евдокимов С.И., Солоденко А.А. Золото: теория и промысел. – Владикавказ: ООО НПКП «МВР». 2010. 980 с.
17. Протодяконов И.О., Люблинская И.Е., Рыжков А.Е. Гидродинамика и массообмен в дисперсных системах жидкость-твердое тело. – Л.: Химия, 1987. 336 с.
18. Иванов В.Д., Прокопьев С.А. Винтовые аппараты для обогащения руд и песков в России. – М.: ДАКСИ, 2000. 239 с.
19. Паньшин А.М., Евдокимов С.И. Струйная флотация в условиях специально формируемого высокого содержания металлов в исходной руде // Обогащение руд. 2009. № 5. С. 6–10.
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. С. 8–12.
21. Лебедев Б.Н., Авдюков В.И., Кабиев К.Г. Возможные направления в организации использования хвостов обогатительных фабрик Казахстана // Цветная металлургия. 1969. № 4. С. 15–17.
22. Орлова И.Б., Румянцев Ю.В., Шокол А.Ф. Об использовании отходов горно-обогатительных предприятий для строительных целей // Цветные металлы. 1978. № 5. С. 85–86.
23. Авдюков В.И., Лебедев Б.Н., Кабиев К.Т., Новиков В.И. Микрообработка из хвостов обогатительных фабрик Казахстана // Цветная металлургия. 1969. № 21. С. 24–25.