

ПЕРСПЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБОГАЩЕНИЯ РУД И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Р.М. АЛХАСОВ, Ю.Х. ХАМУКОВ

По мере истощения богатых месторождений полезных ископаемых возрастают объемы отработанных бедных руд. Переход на добычу бедных руд способствует росту массы отходов, оказывающих существенное влияние на экологическое состояние отдельных регионов. В то же время эти отходы могут быть использованы в будущем, как комплексные техногенные месторождения, дополнительный источник получения отдельных видов дефицитных полезных ископаемых. Техногенные месторождения обладают разнообразным минеральным составом и содержат значительный потенциал черных, цветных, благородных и редких металлов, а также уникальные ресурсы нерудных полезных ископаемых.

Хвосты обогащения руд по содержанию, запасам полезных компонентов и технологичности являются более перспективными, чем отвалы горнодобывающих предприятий, состоящие из более грубо раздробленной смеси пустых и слабонерализованных вмещающих пород, содержащих убогие руды. По сравнению с природными месторождениями полезных ископаемых техногенные месторождения имеют более сложную внутреннюю структуру распределения полезных компонентов и нередко подвержены заметному вторичному окислению.

Часто запасы полезных компонентов в длительно разрабатываемых месторождениях значительно уступают их потенциальным ресурсам, накопленным в отвалах и хвостохранилищах. Весьма важно и то обстоятельство, что суммарное количество полезных компонентов в хвостах, накопленных за последние 20-30 лет, сопоставимо, а иногда и превышает их концентрацию в рудах,

добываемых в настоящее время. В частности, хвостохранилища уральских горнодобывающих пред-

приятий по потенциалу минеральных ресурсов существенно превосходят известные месторождения. Например, впечатляет содержимое шламоохранилища Качканарского ГОКа, в котором скопилось 900 млн. т. отходов переработки титаномагнетитовых руд, включающих, среди прочих ценных

компонентов, 60% мировых запасов скандия. Заметным содержанием полезных ископаемых отличаются и хвостохранилища на горных и металлургических предприятиях Кавказа («Электрощиню», Садонский, Тырныаузский, Урухский и др. комбинаты).

В целом вовлечение техногенных месторождений в разработку облегчается тем, что: 1) не нужны вскрышные и буровзрывные работы; 2) хранилища расположены в промышленно развитых районах; 3) они находятся на поверхности: материал в них преимущественно измельчен, а иногда фракционирован и полностью подготовлен к извлечению из него полезных компонентов современными методами (гидрометаллургические, бактериальные и др. методы выщелачивания). В отличие от частиц измельченных руд зерна техногенного сырья обычно покрыты пленками пассивированного материала и для восстановления их поверхностной активности нуждаются в пропаривании и других видах предварительной обработки.

В целом, необходимость разработки новых эффективных технологий обогащения является важнейшим фактором, сдерживающим масштабы освоения техногенных месторождений.

Перспективные биогидрометаллургические способы переработки сложных руд включают ста-



К. ф-м. н. Алхасов Р.М.

К. ф-м. н. Хамуков.Ю.Х.

дию обогащения руды и получения концентрата с последующим применением метода бактериально-химического выщелачивания. Достижимая при этом высокая степень окисления минералов обеспечивает вскрытие содержащегося в них тонкодисперсного металла и позволяет извлекать до 98 % золота и более 90 % серебра. Это значительно превышает показатели извлечения этих металлов прямым цианированием или пирометаллургическим обжигом и позволяет избежать образования и выделения летучих форм ядовитых соединений.

Для промежуточного обогащения после рудо-подготовки в мире и в России все больше применяются установки, так или иначе использующие эффекты разделения водной пульпы в искусственно созданных гравитационных полях типа концентраторов «Кнелсон» и «Фалкон» (Канада); «Орокон» и «Голдфилд» (США); ВНИИ-1, «Итомак», НПФ «Механика», ТулНИГП и др.

Новые задачи перед технологами ставят добытчики благородных металлов и алмазов. В частности, исследования показали, что извлекаемые запасы мелкого, тонкого и дисперсного золота в природных и техногенных месторождениях часто весьма низкие из-за отсутствия дешевых и эффективных технологий предварительного обогащения или сортировки сырья. В половине обследованных месторождений от 30% до 90% золота содержится в виде частиц мельче 250 мкм, а до 45% – мельче 100 мкм. Потери золота в этих классах крупности достигают 60%, из которых около 50% потерь приходится на интервалы размерности 50 – 100 мкм.

Для обеспечения высокого извлечения золота в таких интервалах необходимо применение эффективных методов предварительного обогащения значительных объемов отходов, содержащих тонкое и дисперсное золото.

В общем плане развития техники обогащения благородных металлов из тонкозернистых россыпных месторождений и техногенных накопленных россыпей важно создание модульного оборудования, обладающего низкой металлоёмкостью, быстрой окупаемостью и низкой себестоимостью производимой продукции (концентраты, промпродукты). Технично-эксплуатационные характеристики такого оборудования предполагают возможность организации на входе технологического цикла простой и эффективной установки предварительного обогащения.

Отечественные разработки направлены на снижение расхода воды, улавливание тонких частиц

благородных металлов, повышение их извлечения из фракции крупностью менее 0,044 мм, повышение степени концентрации металла за одну стадию.

Определёнными резервами повышения эффективности предварительного обогащения обладают способы разделения сухих смесей измельченной руды и отходов. Эти способы исключают стадии сгущения и сушки, не используют воду, дополнительные химические реагенты и депрессоры, экологически безопасны. В то же время они требуют многократно меньшее количество единиц оборудования.

Разделение частиц сыпучей смеси по фактору размер-плотность используется в установке, разработанной в Кабардино-Балкарском государственном университете (Патент РФ №2136397). Собственно, само пространственное разделение частиц происходит в результате проявления эффекта, названного авторами эффектом фокусировки потоков витающих частиц в поле переменных скоростей среды. Полезный эффект от разделения возникает вследствие зависимости фактора размер-плотность от химического состава минерализованной частицы.

Сущность способа заключается в следующем.

Рассмотрим идеальный случай свободного выпадения частиц в движущейся газовой среде: 1) частицы смеси не сталкиваются; 2) скорость потока газа и скорости витания частиц постоянны; 3) выпадение частиц происходит в горизонтальном потоке. Пусть имеются частицы двух сортов, одинаковые по размеру, но разные по плотности. Пусть частицы первого сорта падают со скоростью v_{e1} , а второго – v_{e2} . Частицы переносятся со скоростью v_{nom} вдоль оси потока χ .

Тогда имеем:

пространственное разделение частиц

$$\Delta x = x_2 - x_1 = v_{nom} \left(\frac{2r}{v_{e2}} - \frac{2r}{v_{e1}} \right) = \frac{2r(v_{e1} - v_{e2})}{v_{e1} \cdot v_{e2}} \cdot v_{nom} = \frac{2r(v_{e1} - v_{e2})}{v_{e1} \cdot v_{e2}} v_{nom} \quad (1)$$

Из (1) видно, что для увеличения пространственного разделения частиц необходимо увеличить или разность скоростей витания Δv_v , или v_{nom} , или $2r$ -высоту падения частиц, или уменьшить скорости витания частиц.

Скорость витания частиц по формуле (1) зависит от плотности частиц $\rho_{част}$, размеров частиц d , формы частиц C_x и плотности $\rho_{возд}$, или вязкости газа μ . Для увеличения пространственного разделения можно изменить динамическую вязкость

воздуха, добавляя в него какие-то компоненты или меняя температуру. Высота падения частиц имеет конструктивное ограничение, а скорость потока воздуха ограничивается турбулентизацией потока и хаотизацией частиц.

Увеличить пространственное разделение частиц можно, если заставить частицы падать снова и снова. Тогда Δx будет расти пропорционально числу падений:

$$\Delta x = \frac{2r \cdot \Delta v_g}{v_{g1} \cdot v_{g2}} \cdot v_{nom} \cdot n, \quad (2)$$

где n – число оборотов трубы.

Направим ось OX по горизонтали, а ось $O'X'$ – вдоль оси потока. Пусть ось потока среды наклонена под углом α к горизонту. Тогда время падения частицы составляет:

$$t = \frac{2r}{\cos \alpha} \cdot \frac{1}{v_g}. \quad (3)$$

За это время поток уносит частицу вдоль оси трубы на расстояние

$$\begin{aligned} x' &= (v_{nom} - v_g \cdot \sin \alpha) \cdot t = \\ &= (v_{nom} - v_g \cdot \sin \alpha) \cdot \frac{2r}{v_g \cdot \cos \alpha} = \\ &= \frac{2r \cdot v_{nom}}{v_g \cdot \cos \alpha} - 2r \cdot \operatorname{tg} \alpha. \end{aligned} \quad (4)$$

Пространственное разделение двух частиц разного сорта составляет (вдоль оси $O'X'$):

$$\begin{aligned} \Delta x' &= \frac{2r \cdot v_{nom}}{v_{g2} \cdot \cos \alpha} - 2r \cdot \operatorname{tg} \alpha - \frac{2r \cdot v_{nom}}{v_{g1} \cdot \cos \alpha} + 2r \cdot \operatorname{tg} \alpha = \\ &= \frac{2r \cdot v_{nom}}{v_{g1} v_{g2} \cdot \cos \alpha} \cdot \Delta v_g. \end{aligned} \quad (5)$$

В проекции на ось OX имеем:

$$\Delta x = \Delta x' \cdot \cos \alpha = \frac{2r \cdot v_{nom}}{v_{g1} v_{g2}} \Delta v_g,$$

следовательно, пространственное разделение улучшается вдоль наклонной оси (оси трубы) $O'X'$, а вдоль горизонтальной оси OX остается неизменным.

Для выпадения в расходящемся потоке газа, считая, что воздух несжимаем и, следовательно, скорость потока воздуха различна в разных сечениях потока, найдем зависимость v_{nom} от X' :

$$v_{nom} = \frac{v_{nom.0} \cdot r_0^2}{(r_0 - x' \operatorname{tg} \beta)^2},$$

где $v_{nom.0}$ – скорость потока в сечении $X'=0$, $2r_0$ – высота первого цикла падения, β – угол «конусности» расходящегося потока.

Тогда для смещения частицы перпендикулярно сечению потока получаем:

$$dy' = - \frac{v_g \cos \alpha}{v_g \cdot \sin \alpha - \frac{v_{nom.0} \cdot r_0^2}{(r_0 - x' \operatorname{tg} \beta)^2}} \cdot dx',$$

или

$$dy' = - \frac{v_g \cos \alpha (r_0 - x' \operatorname{tg} \beta)^2}{v_g \cdot \sin \alpha \cdot (r_0 - x' \operatorname{tg} \beta)^2 - v_{nom.0} \cdot r_0^2} \cdot dx'. \quad (6)$$

Обозначим через $v_{nom.0}$ скорость потока воздуха, когда частицы одного сорта не смещаются вдоль оси трубы. Тогда имеем:

$$\frac{2r \cdot v_{nom.0}}{v_g \cdot \cos \alpha} - 4r \cdot \operatorname{tg} \alpha = 0.$$

Откуда получаем:

$$\frac{v_{nom.0}}{v_g \cdot \cos \alpha} = 2 \operatorname{tg} \alpha \quad \text{или} \quad v_{nom.0} = 2 \sin \alpha \cdot v_g. \quad (7)$$

При $v_{nom} > v_{nom.0}$ частицы данного сорта смещаются вверх по трубе, а при $v_{nom} < v_{nom.0}$ – вниз. Таким образом, подбирая угол наклона α и скорость потока воздуха v_{nom} , можно добиться того, что частицы с различными v_g будут перемещаться вдоль оси трубы в противоположных направлениях.

Для очень малых частиц из формулы получаем условие равнопадения, когда не удается получить пространственного разделения частиц:

$$\frac{1}{18} \frac{gd_1^2 \rho_1}{\mu} = \frac{1}{18} \frac{gd_2^2 \rho_2}{\mu}, \quad \text{или} \quad d_1^2 \rho_1 = d_2^2 \rho_2. \quad (8)$$

Окончательно для координат точки выпадения частицы в расходящемся потоке с наклонной осью получаем систему уравнений:

$$\begin{aligned} y' &= r_0 + \frac{r_0}{2 \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta} \sqrt{\frac{v_{nom.0}}{v_g \cdot \sin \alpha}} \cdot \ln \frac{r_0 - x' \operatorname{tg} \beta - \sqrt{\frac{v_{nom.0}}{v_g \cdot \sin \alpha}} \cdot r_0}{r_0 - x' \operatorname{tg} \beta + \sqrt{\frac{v_{nom.0}}{v_g \cdot \sin \alpha}} \cdot r_0} - \ln \frac{1 - \sqrt{\frac{v_{nom.0}}{v_g \cdot \sin \alpha}}}{1 + \sqrt{\frac{v_{nom.0}}{v_g \cdot \sin \alpha}}} \end{aligned} \quad (9)$$

и

$$y' = -r_0 + x' \operatorname{tg} \beta. \quad (10)$$

Эта система трансцендентна, и решается она численно.

Из приведенной схемы разделения, которую условно назовем «провеиванием», следует, что малые частицы уносятся потоком воздуха, а более крупные движутся к начальному сечению расходящегося потока. Поскольку скорости среды в разных сечениях потока различны, то на каком-то расстоянии от начального сечения какая-то определенная фракция частиц не будет менять своего положения. В этом случае проекция скорости частицы на ось Ox равна нулю. В этом случае:

$$\frac{dx'}{dt} = v_e \cdot \sin \alpha - v_{nom} = 0 \quad (11)$$

Учитывая, что $v_{nom} = \frac{v_{nom.0} \cdot r_0^2}{(r_0 - x' \operatorname{tg} \beta)^2}$, получим:

$$v_e \cdot \sin \alpha - \frac{v_{nom.0} \cdot r_0^2}{(r_0 - x' \operatorname{tg} \beta)^2} = 0. \text{ Откуда находим:}$$

$$x' = \frac{r_0}{\operatorname{tg} \beta} \left(1 - \sqrt{\frac{v_{nom.0}}{v_e \cdot \sin \alpha}} \right). \quad (12)$$

Это положение устойчиво, так как знак $\frac{dx'}{dt}$

противоположен изменению v_{nom} . В самом деле, при увеличении x' увеличивается v_{nom} , а разность $v_e \sin \alpha - v_{nom}$ отрицательна, и, наоборот, при уменьшении x' уменьшается v_{nom} , а знак $v_e \sin \alpha - v_{nom}$ положителен, что приводит к росту x' . Другими словами, в этом случае имеем своеобразную отрицательную обратную связь. Таким образом, подбирая $v_{nom.0}$, α и β , можно добиться того, что разные фракции частиц будут останавливаться в разных точках пространства. Многократное повторение данного процесса (во вращающемся разделительном барабане) позволит повышать степень разделения смеси, или, иными словами, степень концентрации частиц определенной фракции в ограниченной области пространства.

На рис. 1. представлен схематический вид аэрогравитационного разделителя. На схеме изображены конусообразный разделительный барабан с загрузочным бункером, вытяжной вентилятор, подающий воздух из барабана в циклон, выход которого соединен воздуховодными трубами с входным сечением барабана. Воздушный контур замкнут, в окружающую среду не выбрасывается ничего. Конические горки в нижней части схемы отображают соотношения объемов разделенных фракций исходной смеси.

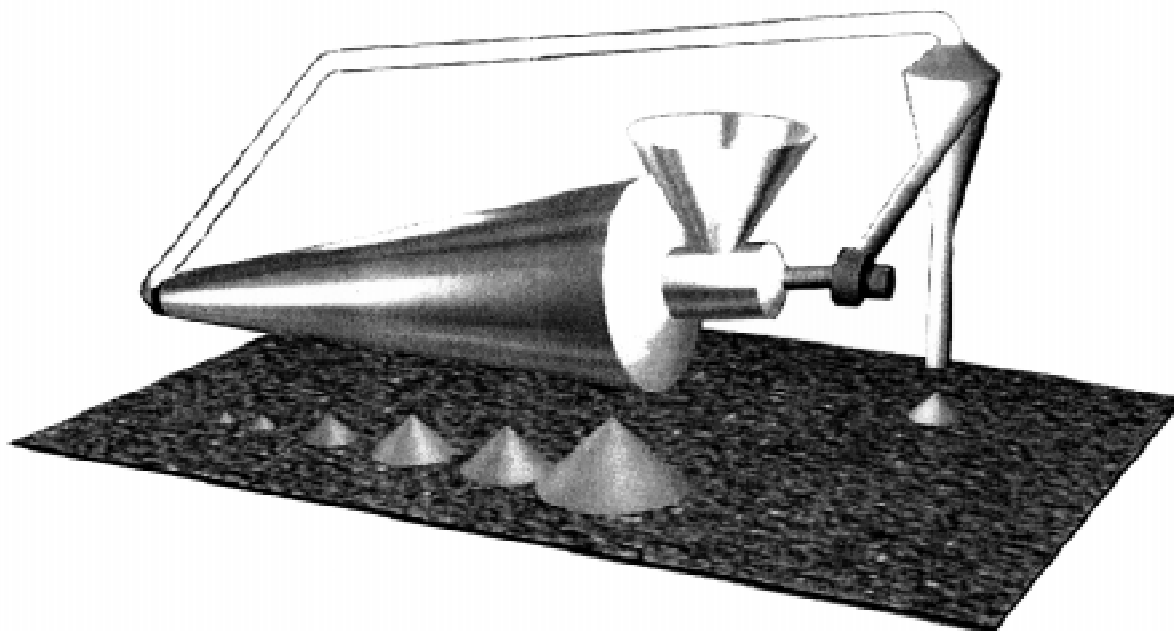


Рис. 1

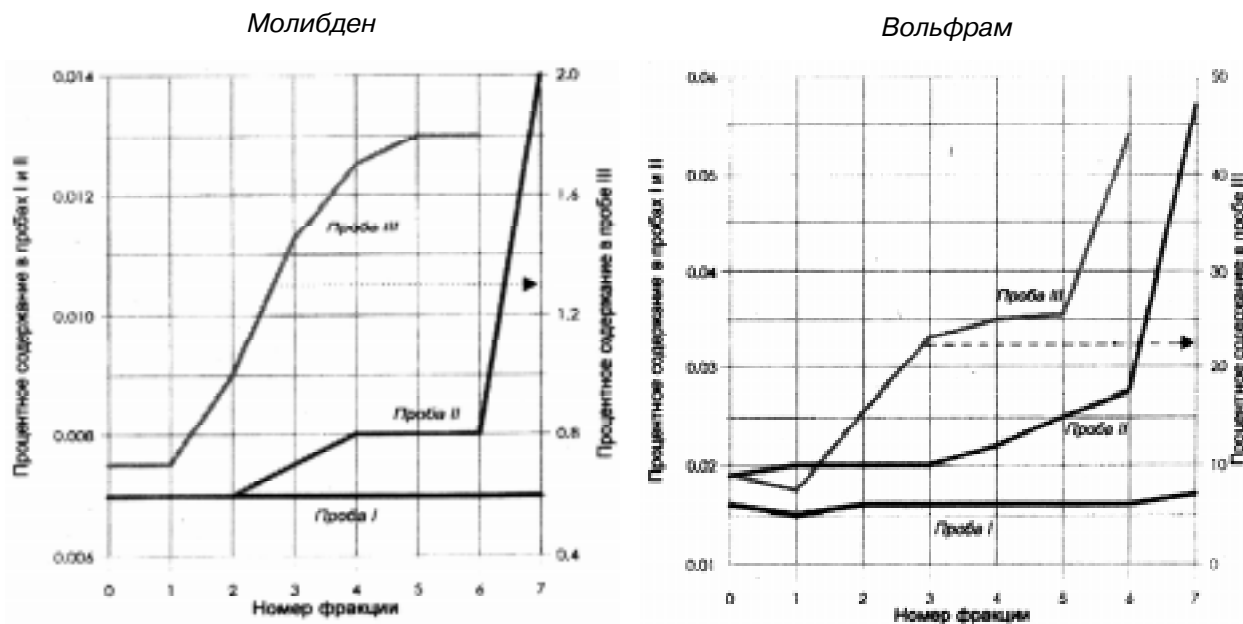


Рис. 2

На рис. 2 представлены виды зависимости содержания Мо и W в соседних участках разделительного барабана опытной лабораторной установки для аэрогравитационного разделения сыпучих смесей. Исходным сырьем были пробы из шламохранилища гидрометаллургического комбината. Эти результаты получены при первой («вслепую») попытке развейивания смеси в расходящемся потоке среды. В дальнейших экспери-

ментах получены результаты, подтверждающие высокую эффективность предварительного обогащения руд предложенным способом, вторичного обогащения отходов и выделения высокодисперсных драгметаллов.

В настоящее время разработан технический проект полупромышленной установки. Опытный образец находится в стадии изготовления. Патентуется схема установки непрерывного действия.

Литература

1. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. М., 1999.
2. *Тезисы докладов международной научно-технической конференции «Основные направления развития обогащения сульфидных руд в 21 веке»*. Норильск., 2000 г.
3. *Справочник по обогащению руд. Специальные и вспомогательные процессы, испытания обогатимости, контроль и автоматика* /Под ред. О.С. Богданова., В.И. Ревнивцева, 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1983. - с.376.

КБГУ, Нальчик, 2002г.

