

**А.А. ПЕРВУНИНА**

(Украина, Днепропетровск, Государственное ВУЗ "Национальный горный университет")

**ВЗАИМОСВЯЗЬ СЕПАРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПРОЦЕССОВ ОБОГАЩЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ  
С СОСТАВОМ ИСХОДНОГО ПРОДУКТА**

*Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.* Вольногорский горно-металлургический комбинат (ВГМК) добывает и перерабатывает титаноциркониевые пески Восточного участка Малышевского месторождения. Однако переход на новый, Матроновский, участок при разработке данного месторождения Вольногорским ГМК, руды которого отличаются по вещественному и гранулометрическому составу от обогащаемых песков, установлено изменение показателей гравитационного обогащения. Этот факт вызывает предположение о влиянии состава добываемых песков на сепарационные характеристики процессов обогащения россыпных руд.

*Анализ исследований и публикаций.* Сепарационные характеристики неизменны в некоторых пределах при изменении состава и свойств сепарируемого материала [1-4]. Однако промышленные данные работы Вольногорского ГМК показывают различные извлечения тяжелой фракции, что свидетельствует о вероятном изменении сепарационной характеристики.

*Постановка задачи.* Цель данной работы – установление взаимосвязи сепарационных характеристик с составом исходного материала путем математического моделирования процесса разделения полезных ископаемых.

*Изложение материала и результаты.* На Вольногорском ГМК для гравитационного обогащения титаноциркониевых песков применяют конусные сепараторы [7]. Рабочая зона данных сепараторов представляет собой клиновидный желоб, установленный с наклоном к горизонту под углом 15-20° в направлении течения пульпы, имеющий плоское днище и сходящиеся вертикальные стенки. В результате спокойного течения плотной пульпы по желобу зернистый материал различной плотности расслаивается. Распределение частиц приводит к их сегрегации. Таким образом, в нижних частях потока сосредотачиваются преимущественно частицы большей плотности, а в верхних – меньшей плотности. По мере продвижения по желобу, в результате уменьшения его сечения, высота слоя пульпы постепенно увеличивается, что способствует концентрации минералов и более четкому разделению потока на фракции с различной плотностью минералов.

Для моделирования процесса сепарации титаноциркониевых песков и определения степени влияния состава исходного материала на сепарационные характеристики, представляющие собой зависимости вероятности извлечения частиц в какой-либо продукт сепарации от разделительного признака [1], достаточно рассмотреть сектор конусного сепаратора, представляющий собой сужаю-

## Загальні питання технології збагачення

щійся желоб. Результаты теоретического моделирования были сопоставлены с результатами, достигнутыми в промышленных и лабораторных условиях.

Аналитическое исследование сепарации минеральной смеси на сужающемся желобе производится при условии, что его боковые стенки не влияют на движение материала по конусной поверхности. При этом приняты следующие допущения:

1) скорости минеральных частиц в верхнем и нижнем слоях потока пульпы  $\bar{U}_{x1}$  и  $\bar{U}_{x2}$  соответственно приняты как средние;

2) высота потока пульпы  $z_2$  изменяется пропорционально изменению содержания тяжелой фракции в исходном продукте;

3) положение отсекателя  $z_1$  рассматривается как постоянная величина.

Движение минеральной смеси по поверхности конусного сепаратора представляет собой горизонтальный поток суспензии, который течет в турбулентном режиме. Его движение характеризуется средними скоростями в верхнем ("легкие" отходы) и нижнем ("тяжелый" концентрат) слоях потока ( $\bar{U}_{x1}$  и  $\bar{U}_{x2}$  соответственно). Извлечения минералов различной плотности в концентрат зависят от начальной концентрации материала  $c_0$ , плотности  $\delta$ , плотности суспензии  $\Delta_c$  и высоты самого потока –  $z$ .

Модель движения минеральных частиц по высоте потока пульпы представлена на рис. 1.

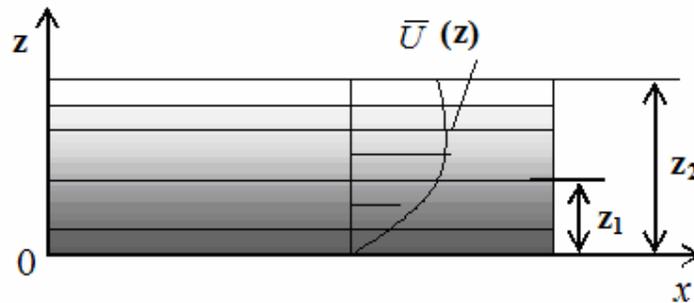


Рис. 1. К определению распределения частиц в горизонтальном турбулентном потоке

Распределение частиц, имеющих определенную скорость в слоях пульпы, можно определить из соотношения их потоков. Поток частиц в нижнем слое:

$$Q_2 = \int_0^{z_1} c(z) \bar{U}_{x2}(z) dz . \text{ А в верхнем слое: } Q_1 = \int_{z_1}^{z_2} c(z) \bar{U}_{x1}(z) dz . \text{ Доля частиц ока-}$$

завшихся в нижнем слое (в концентрате) составит:  $E = Q_2 / (Q_1 + Q_2)$ .

В общем случае данная зависимость описывается уравнением вида:

$$E = \frac{U_2 c_0 e^{-k(\delta - \Delta_c) z_1}}{U_2 c_0 e^{-k(\delta - \Delta_c) z_1} + U_1 c_0 e^{-k(\delta - \Delta_c) z_2}}, \quad (1)$$

где  $c(z) = c_0 e^{-k(\delta - \Delta_c) z_1, z_2}$  – решение уравнения турбулентного массопереноса при граничных условиях:  $z = 0$  и  $c = c_0$  [5].

С учетом упрощений, уравнение (1) будет иметь вид:

$$E = \frac{1}{1 + \frac{U_1}{U_2} e^{-k(\delta - \Delta_c)(z_2 - z_1)}}. \quad (2)$$

Здесь  $U_1$  – средняя скорость горизонтального перемещения пульпы в верхнем слое, м/с;  $U_2$  – средняя скорость горизонтального перемещения пульпы в нижнем слое, м/с;  $k$  – коэффициент, учитывающий размер зерен минералов;  $k = \frac{1}{D}$ ,  $D$  – коэффициент турбулентного переноса жидкости [5].  $\delta$  – плотность минерала, кг/м<sup>3</sup>;  $z_2, z_1$  – координаты высоты потока пульпы верхнего и нижнего слоя соответственно, м;  $\Delta_c$  – плотность суспензии, которая зависит от плотности твердой фазы и ее объемной концентрации, кг/м<sup>3</sup>:

$$\Delta_c = \Delta + (\bar{\delta} + \Delta) c_v.$$

Здесь  $\Delta$  – плотность воды (1000 кг/м<sup>3</sup>);  $\bar{\delta}$  – средняя плотность минералов, входящих в состав исходного продукта, кг/м<sup>3</sup>;  $c_v$  – концентрация твердого в пульпе.

Расчет средней плотности  $\bar{\delta}$  производится по формуле:

$$\bar{\delta} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \delta_i.$$

Концентрация твердого  $c_v$  определяется по формуле:

$$c_v = \frac{1}{1 + R \frac{\bar{\delta}}{\Delta}},$$

где  $R = \frac{1-p}{p}$ ,  $p$  – массовая доля твердых частиц в воде, дол. ед.

При гравитационном обогащении титаноциркониевых песков на конусном сепараторе массовая доля частиц в пульпе должна составлять не менее 50-60%

## **Загальні питання технології збагачення**

для оптимального протекания процесса разделения минеральных частиц по плотности [7]. Так как увеличение объемной концентрации твердого в пульпе  $c_v$  до 0,3 и выше нежелательно, потому что верхний слой не успевает разгрузиться [8].

Средние продольные скорости  $\bar{U}_{x1}$  и  $\bar{U}_{x2}$  [6] турбулентного потока изменяются по логарифмическому закону. Таким образом, средняя скорость частиц в потоке пульпы будет иметь вид:

$$\bar{U}_x = \bar{U}_{nl} + \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \frac{1}{X} \ln \frac{z}{\delta}, \quad (3)$$

где  $\bar{U}_{nl}$  – скорость на границе ламинарного слоя "пленки", м/с;  $\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$  – динамическая скорость (по М.А. Великанову), м/с;  $\kappa$  – постоянная Кармана ( $\kappa=0,36$ );  $z$  – координата высоты потока пульпы, м;  $\delta$  – координата ламинарного слоя "пленки" ( $\delta = 0,003$ ), м.

Уравнение (3) может быть приведено к следующему виду:

$$\bar{U}_x(z) = 11,6X + \ln z - \ln \delta. \quad (4)$$

Интегрирование уравнения (4) дает:

– средняя скорость потока верхнего слоя:

$$\bar{U}_{x1} = \int_{z_1}^{z_2} \bar{U}_x(z) dz = (z_2 - z_1)(11,6X - \ln \delta - 1) + z_2 \ln(z_2) - z_1 \ln(z_1).$$

– средняя скорость потока нижнего слоя:

$$\bar{U}_{x2} = \int_0^{z_1} \bar{U}_x(z) dz = (z_1 - 0)(11,6X - \ln \delta - 1) + z_1 \ln(z_1).$$

Важным параметром при изучении сепарационных характеристик является среднее вероятное отклонение  $E_{pm}$ . С целью выяснения вопроса о зависимости  $E_{pm}$  от содержания тяжелой фракции в исходном продукте путем сравнительного анализа результатов расчетов получены значения, представленные в табл. 1. Плотность разделения взята  $3000 \text{ кг/м}^3$ .

Из табл. 1 следует, что с ростом содержания тяжелой фракции в исходном продукте с 5 до 40% наблюдается постепенное уменьшение среднего вероятного отклонения  $E_{pm}$ . Это явление можно объяснить изменением отношения средней скорости верхнего к нижнему слою потока пульпы  $\frac{U_1}{U_2}$ . С увеличением со-

## **Загальні питання технології збагачення**

держания тяжелых минералов с 5 до 40% отношения скоростей  $\frac{U_1}{U_2}$  увеличива-

ются, что говорит об улучшении процесса сепарации. Увеличение количества тяжелой фракции в пульпе ведет к оптимизации условий перераспределения твердых и легких частиц в слоях движущейся минеральной взвеси.

Рис. 1 иллюстрирует зависимость среднего вероятного отклонения  $E_{pm}$ , характеризующего точность сепарации, от содержания полезных минералов в исходном продукте.

*Таблица 1*

Содержания тяжелой фракции в исходном, %	Среднее вероятное отклонение, кг/м <sup>3</sup>	Отношение скорости верхнего и нижнего слоя потока пульпы, дол. ед.
5	0,876	6,41
10	0,856	6,83
15	0,838	7,25
20	0,823	7,67
25	0,808	8,10
26	0,805	8,18
27	0,803	8,27
28	0,801	8,35
29	0,799	8,44
30	0,796	8,52
31	0,793	8,61
32	0,791	8,70
33	0,788	8,78
34	0,787	8,87
35	0,784	8,95
36	0,782	9,04
37	0,780	9,13
38	0,778	9,21
39	0,776	9,30
40	0,774	9,39

Из табл. 1 и рис. 2 следует, что с увеличением содержания тяжелой фракции с 5 до 40% в исходном продукте наблюдается рост эффективности разделения (уменьшается среднее вероятное отклонение  $E_{pm}$  с 0,88 до 0,77). Влияние состава исходного продукта на сепарационные характеристики значительно ( $R^2=0,9867$ ).

Табл. 2 и рис. 3 иллюстрируют сравнение показателей среднего вероятного отклонения  $E_{pm}$ , полученных в промышленных условиях, в лабораторных условиях и в результате математического моделирования процесса гравитационного обогащения титаноциркониевых песков на сужающемся желобе.

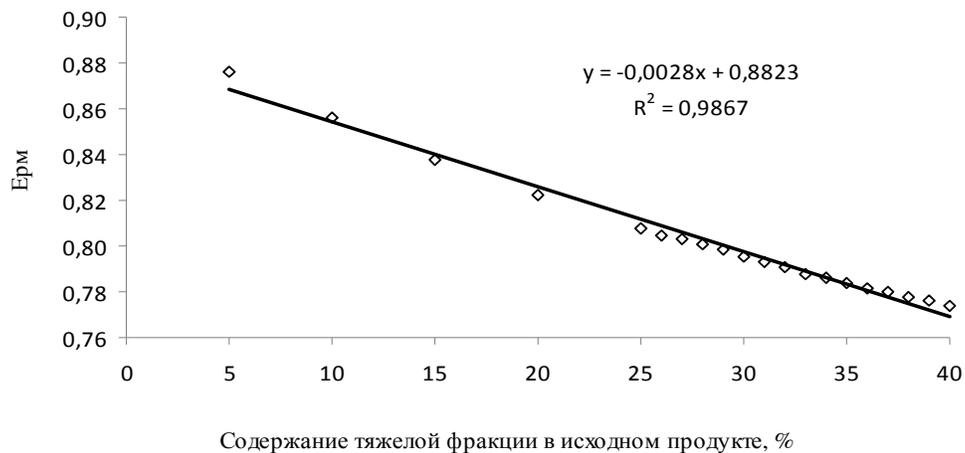


Рис. 2. Залежність середнього вероятного відхилення від вмісту важкої фракції в вихідному продукті

Таблиця 2

Вміст важкої фракції в вихідному, %		Середнє вероятне відхилення, кг/м³		
Достигнуті в промислових умовах	По даним лабораторних і аналітичних досліджень	Достигнуті в промислових умовах	По даним лабораторних досліджень	По даним аналітичних досліджень
5,02	5	0,78	1,33	0,876
6,07	10	0,75	0,40	0,856
11,17	15	1,02	0,99	0,838
36,65	20	0,7	0,93	0,823
38,48	25	0,56	0,70	0,808
-	35	-	0,92	0,784
-	40	-	0,54	0,774

На рис. 3 позначено: 1 – промислові дані; 2 – результати лабораторних досліджень; 3 – результати математичного моделювання.

Аналіз кривих на рис. 3 показує близькість результатів визначення середнього вероятного відхилення  $E_{pm}$  в промислових, лабораторних умовах і з допомогою теоретичного моделювання. Точки кривих залежностей середнього вероятного відхилення від вмісту важкої фракції в вихідному продукті знаходяться в одному кореляційному полі.

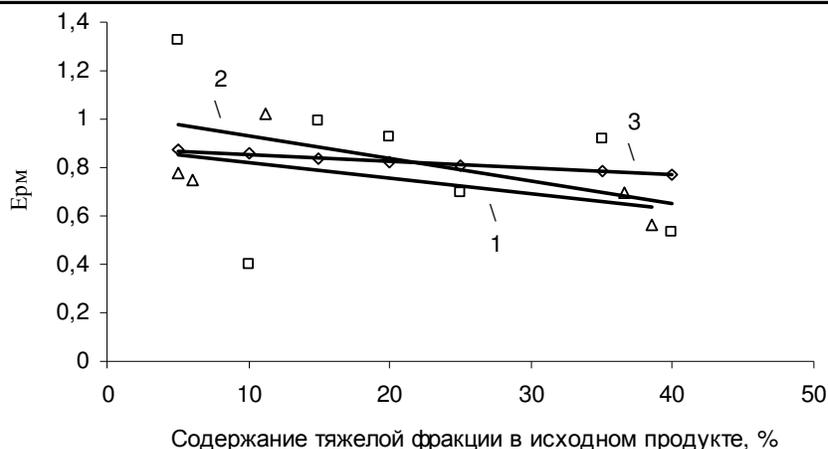


Рис. 3. Зависимость среднего вероятного отклонения от содержания тяжелой фракции в исходном продукте

*Выводы и направления дальнейших исследований.* Факт изменения среднего вероятного отклонения при обогащении рудных песков различного состава свидетельствует о том, что при гравитационном обогащении с использованием конусных сепараторов на сепарационные характеристики влияет состав обогащаемого материала.

Это явление необходимо учитывать при проектировании технологий гравитационного обогащения титан ильменитовых россыпей.

### Список литературы

1. Младецкий І.К., Пілов П.І. Технологічні розрахунки показників збагачення корисних копалин: навч. посібник. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2004. – 156 с.
2. Тихонов О.Н. Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых. – М.: Недра, 1984. – 207 с.
3. Тихонов О. Н. Теоретические основы сепарационных процессов обогащения полезных ископаемых: Учеб. пособие. – Л.: ЛГИ. 1978. – 97 с., ил.; 20 см.
4. Младецкий І.К. Синтез технологій збагачення корисних копалин: Монографія. – Д.: Національний гірничий університет, 2006. – 153 с.
5. Пілов П.І. Гравитационная сепарация полезных ископаемых: Уч. пособие. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2003. – 123 с.
6. Киселев П.Г. Гидравлика. Основы механики жидкости. – М-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1963. – 365 с.
7. Белогай П.Д., Задорожный В.Г. Конусные сепараторы для обогащения россыпей и руд. – М.: Недра, 1968. – С. 1-119.
8. Сокіл О.М. Фізико-технічні основи технологій переробки титан-цирконових розсіпів: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Дніпропетровськ: Ін-т геотехн. механіки, 2002. – 32 с.

© Первунина А.А., 2013

*Надійшла до редколегії 18.12.2013 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. І.К. Младецьким*