

УДК 622.7

**Н.И. Коннова, С.В. Килин, П.В. Елизарьев**

## **ПОСТРОЕНИЕ СЕПАРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ТЯЖЕЛОСРЕДНОГО ОБОГАЩЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ТРАССЕРНОГО КОНТРОЛЯ**

*Представлен лабораторный тяжелосредный сепаратор, относящийся к гравитационному типу обогатительных аппаратов, где в рабочей зоне частицы разделяются по плотности. Признаком разделения  $\xi$  в данном случае будет являться плотность разделяемых частиц  $\rho$ . Выполнен анализ и рассмотрена теоретическая сепарационная характеристика для того, чтобы выполнить ее сравнение с экспериментальными сепарационными характеристиками. Получена формула теоретической сепарационной характеристики, позволяющая сравнивать результаты с другими сепарационными характеристиками посредством сопоставления крутизны кривых, то есть сравнения средне вероятных отклонений. По результатам проведенных опытов была составлена зависимость средневероятного отклонения от плотности разделения.*

*Ключевые слова: тяжелосредный сепаратор, метод трассерного контроля, обогащение.*

**П**рогнозирование результатов обогащения различными методами является перспективным направлением при проектировании обогатительных фабрик или при проведении исследований на обогатимость руд и неметаллических полезных ископаемых [1].

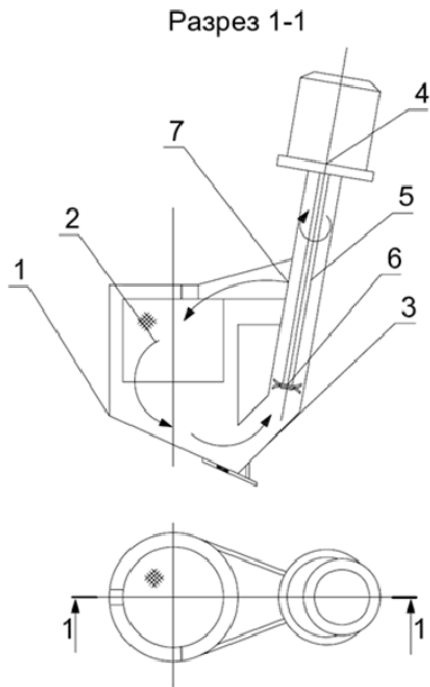
Для сепарации может использоваться лишь один метод обогащения, либо комбинация нескольких. Именно поэтому возникает задача теоретического анализа сепарационных процессов – прогнозирующий расчет технологических показателей по заданным сепарационным характеристикам технологической схемы и фракционным характеристикам перерабатываемого сырья.

Моделирование сепарационных процессов позволяет решить проблему прогнозирования и уменьшить различия между теоретическими расче-

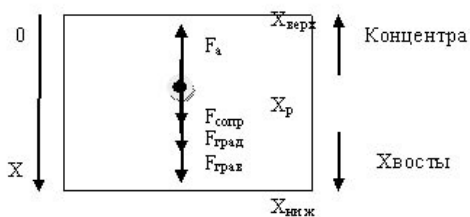
тами и реальными результатами обогащения.

Построение сепарационных характеристик обогатительных аппаратов является одним из методов моделирования схем обогащения, ведь обогатительная операция предусматривает применение того или иного обогатительного аппарата. Имея сепарационные характеристики различных обогатительных аппаратов, возможно оперативное сравнение методов обогащения с выбором наиболее подходящего обогатительного аппарата и, следовательно, метода обогащения.

Сепарационная характеристика  $\xi(\xi)$  – это отношение количества фиксированной фракции в обогащенном продукте к количеству ее в питании аппарата [11]. Из определения следует то, что вероятность перехода фиксированной фракции в обо-



**Рис. 1. Схема лабораторного тяжелосреднего сепаратора:** 1 – цилиндрический чан; 2 – емкость для улавливания утонувшей фракции; 3 – труба для циркуляции суспензии; 4 – электродвигатель; 5 – вал; 6 – импеллер; 7 – распределитель потоков суспензии



**Рис. 2. Действие сил на минеральную частицу в рабочей зоне тяжелосреднего сепаратора**

гашенный продукт  $P(\xi)$  можно отождествлять с количественными отношениями:

$$s(\xi) = P(\xi) = \frac{Q_{кон}(\xi) \gamma_{кон}(\xi)}{Q_{исх}(\xi) \gamma_{исх}(\xi)}, \quad (1)$$

где  $Q_{кон}$  и  $Q_{исх}$  – количество обогащенного продукта и исходного материала, соответственно;  $\gamma_{кон}$  и  $\gamma_{исх}$  – выходы соответствующих продуктов;  $\xi$  – признак разделения, то есть физическое свойство минеральных частиц и сростков, используемых для сепарации в обогащении (крупность, плотность, магнитная восприимчивость и пр.).

В общем виде сепарационная характеристика операции представляет собой непрерывную функцию  $\epsilon(\xi)$ , показывающую зависимость извлеченной элементарных фракций  $[\xi_i, \xi_{i+1}]$  в концентрат от физического свойства  $\xi$  элементарных фракций и характеризующие степень совершенства аппаратов. Другие возможные термины  $\epsilon_k(\xi)$  – разделительная функция, главная технологическая характеристика сепаратора, кривая извлечения фракций в концентрат и т.д. [2].

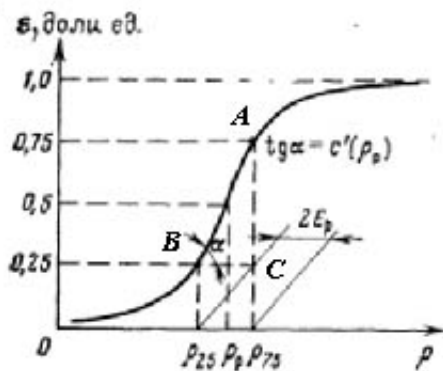
Аппараты гравитационного обогащения, разделяющие частицы по плотности, можно классифицировать по следующим параметрам: производительности, крупности питания и т.д.

Лабораторный тяжелосредний сепаратор (рис. 1) относится к гравитационному типу обогатительных аппаратов, где в рабочей зоне частицы разделяются по плотности. Признаком разделения  $\xi$  в данном случае будет являться плотность разделяемых частиц  $\rho$  [2, 3].

Нахождение теоретической сепарационной характеристики сводится к решению системы уравнений [2]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \gamma}{\partial t} = -\text{div}(\gamma v) + W; \\ \Sigma F_i = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $W = W(\xi, x, y, z, t)$  – подводимый (отводимый) поток фракций в зоне;  $F_i$



**Рис. 3. Крутизна и вероятное отклонение сепарационной характеристики тяжелосреднего сепаратора**

– силы, действующие в рабочей зоне обогатительного аппарата.

Сепарационная характеристика  $s(\rho)$  зависит от суммы сил  $\Sigma F_i$ , действующих на частицы в зоне сепарации.

Лабораторный тяжелосредний сепаратор относится к типу аппаратов с искусственной разделяющей средой постоянной плотности [4] с силами  $F_{\text{грав}}$ ,  $F_a$ ,  $F_{\text{сопр}}$ ,  $F_{\text{град}}$  (рис. 2).

После решения системы уравнения (1) для условий разделения в рабочей зоне тяжелосреднего сепаратора получим закон гиперболического тангенса:

$$s(\rho) = 0,5 - 0,5th(k(\rho - \rho_{cp})), \quad (2)$$

где  $s(\rho)$  – сепарационная характеристика;  $k$  – коэффициент, отражающий влияние действия сил в рабочей

зоне сепаратора;  $\rho$  – плотность материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_{cp}$  – плотность среды (граница разделения),  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Таким образом, уравнение (2) является теоретическим описанием поведения частиц в рабочей зоне обогатительного аппарата.

Продолжим дальнейшее рассмотрение теоретической сепарационной характеристики для того, чтобы возможно было ее сравнение с экспериментальными сепарационными характеристиками. Для этого рассмотрим границу разделения  $\rho_{cp}$  и вероятное отклонение  $E_p$ . Возьмем типовую сепарационную характеристику (рис. 3). На рисунке 3 виден прямоугольный треугольник ABC, гипотенуза которого является практически прямолинейным участком сепарационной кривой, то есть тангенс угла  $tg\alpha$  наклона будет характеризовать крутизну восхождения кривой. Тангенс угла наклона будет равен:

$$tg\alpha = \frac{AC}{BC} = \frac{0,75 - 0,25}{2E_p}. \quad (3)$$

С другой стороны, крутизна восхождения кривой определяется коэффициентом  $k$  [3], следовательно, получим:

$$\begin{aligned} \varepsilon(\rho) &= 0,5 - 0,5th\left(\frac{2(0,75 - 0,25)}{2E_p}(\rho - \rho_{cp})\right) = \\ &= 0,5 - 0,5th\left(\frac{1}{2E_p}(\rho - \rho_{cp})\right) \end{aligned} \quad (4)$$

Полученная формула теоретической сепарационной характеристики позволяет сравнивать результаты с другими сепарационными характеристиками посредством сопоставления крутизны кривых, то есть сравнения средне вероятных отклонений.

Для получения экспериментальных сепарационных характеристик использовался метод трассерного контроля [5, 6] с определением границы разделения  $\rho_p$  и средневероятного отклонения для различных плотностей суспензии.

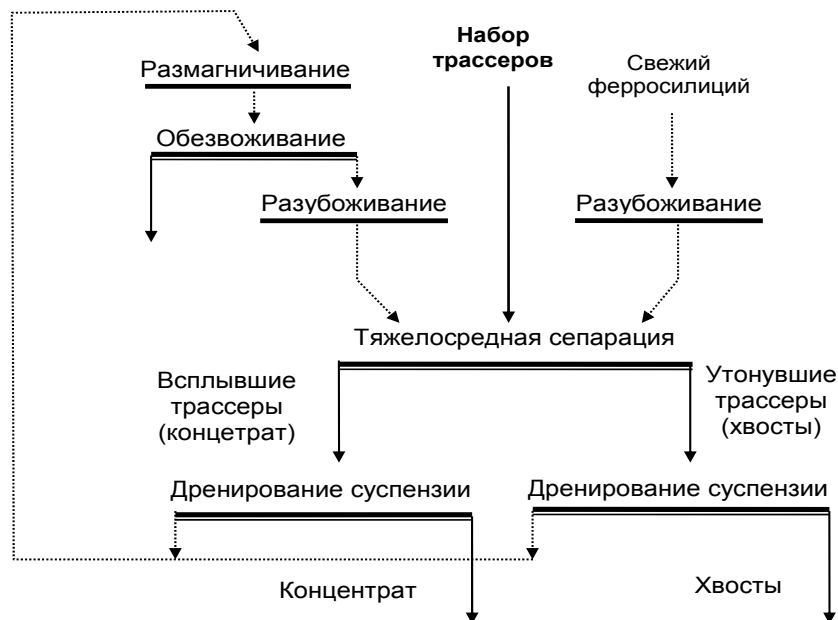


Рис. 4. Схема проведения опытов по построению сепарационных характеристик

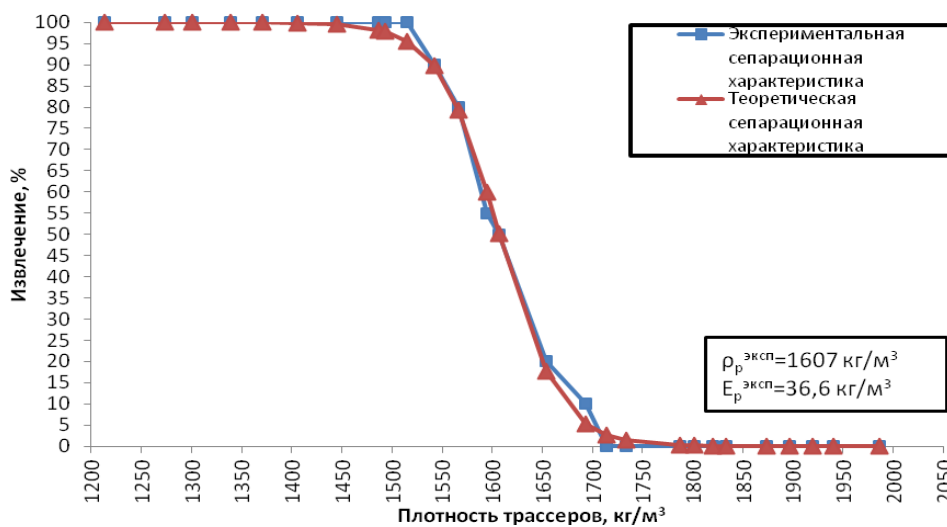
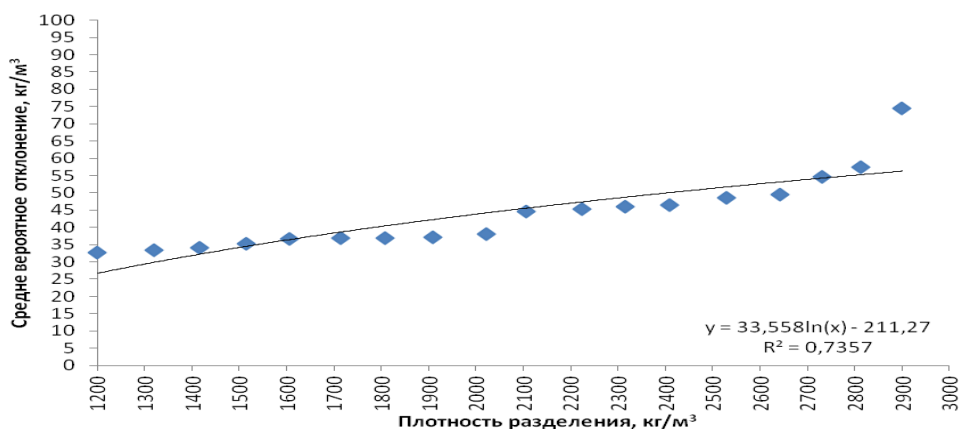


Рис. 5. Сепарационная характеристика с создаваемой плотностью  $\rho_{ср} = 1600$  кг/м³ в рабочей зоне сепаратора

В основу снятия сепарационных характеристик было положено изготовление набора трассеров различной плотности сферической формы с

интервалом плотностей от 1050 до 3500 кг/м³ с шагом от 30 до 50 кг/м³, которые могли бы смоделировать поведение различных минераль-



**Рис. 6. Зависимость средневероятного отклонения от плотности разделения**

ных частиц в рабочей зоне лабораторного тяжелосреднего сепаратора при различной плотности создаваемой суспензии в интервале 1200-2900 кг/м<sup>3</sup> с шагом 100 кг/м<sup>3</sup>.

Топология схемы проведения опытов является классической (рис. 4) [7], за исключением операции магнитной сепарации, так как в ней нет необходимости, потому что не происходит засорения суспензии.

Для каждой плотности суспензии (плотности разделения  $\rho_{ср}$ ) строилась сепарационная кривая, также строилась теоретическая сепарационная характеристика, находились плотность разделения  $\rho_p$ ; средне вероятное отклонение  $E_p$ ; реальные результаты разделения сравнивались с теоретическими. Пример представления результатов построения представлен на рис. 5.

По результатам проведенных опытов была составлена зависимость средневероятного отклонения от плотности разделения, которая представлена на рис. 6, также на рисунке показана линия тренда, уравнение

кривой, и величина достоверности аппроксимации.

Полученную зависимость средне вероятного отклонения подставим в уравнение теоретической сепарационной характеристики (4), в результате получаем уравнение сепарационной характеристики:

$$s(\rho) = 0,5 - 0,5 \operatorname{th} \left( \frac{\rho - \rho_{ср}}{57,116 \ln(\rho_{ср}) - 422,54} \right) \quad (5)$$

где  $\rho$  - плотность обогащаемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{ср}$  - плотность создаваемой среды, кг/м<sup>3</sup>.

Получение эмпирической зависимости средневероятного отклонения от плотности разделения дает возможность дополнить теоретическое уравнение сепарационной характеристики для того, чтобы входными данными были лишь плотность разделения и плотность обогащаемого материала, что намного упрощает прогнозирование результатов тяжелосреднего обогащения для различных видов минерального сырья в лабораторных условиях.

---

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кармазин В.И. Расчеты технологических показателей обогащения полезных ископаемых / Кармазин В.И., Младешкий И.К., Пилов П.И. // Москва: Горная книга, 2009. – С. 221.
2. Тихонов О.Н. Закономерности эффективного разделения минералов / О.Н. Тихонов. // М.: Недра, 1984. - С. 207.
3. Цыпин Е.Ф. Моделирование обогатительных процессов и схем / Е.Ф. Цыпин, Ю.Л. Морозов, В.З. Козин. // Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 1996. - С. 367.
4. Тихонов О.Н. Теория и практика комплексной переработки полезных ископаемых в странах Азии, Африки и Латинской Америки / О.Н. Тихонов, Ю. П. Назаров // М.: Недра, 1989.- С. 300.
5. Баранова Т.В. Обогащение руд процессом тяжелосредной сепарации / Т.В.Баранова, Л.С.Соловьева // Золотодобыча, №118, 2008. – С. 5-7.
6. Murariu V. The modelling of the separation process in a ferrohydrostatic separator / V. Murariu, J. Svoboda, P. Sergeant // Minerals Engineering №18, 2005, Pages 449–457.
7. Тагарт А.Ф. Справочник по обогащению полезных ископаемых. В 4 т. Т. 3 Процессы обогащения и обезвоживания / Тагарт А.Ф. // М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1952. – С. 990. **ГИАБ**

---

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Коннова Наталья Ивановна – кандидат технических наук, доцент кафедры обогащения полезных ископаемых Сибирского федерального университета. т.с. 89029927242  
Килин Сергей Владимирович – ведущий инженер технического отдела ЗАО «Полюс», т.с.89135022686  
Елизарьев Павел Владимирович – специалист отдела инвестиций ЗАО «Полюс», т.с. 89135746054



---

## ГОРНАЯ КНИГА



### Физико-технический контроль и мониторинг при освоении подземного пространства городов: Учебник для вузов.

А.З. Вартанов  
2013  
548 с.  
УДК 53.08.088:622  
ISBN 978-5-98672-243-6

Приведены основные цели и задачи, решаемые физико-техническими методами контроля и мониторинга при строительстве и эксплуатации подземных сооружений в условиях крупных городов и мегаполисов. Рассмотрены основные геофизические методы для изучения структуры, свойств и состояния геологической среды в зоне строительства, описаны методы и средства контроля и мониторинга соответствующих

технологических процессов, а также эксплуатационный контроль подземных сооружений. Изложены базовые сведения о методах и средствах экологического контроля при освоении подземного пространства городов.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Физические процессы горного или нефтегазового производства» направления подготовки «Физические процессы горного или нефтегазового производства». Может быть полезно также студентам, аспирантам, научным и инженерно-техническим работникам, сфера деятельности которых связана с освоением подземного городского пространства.