

полезных ископаемых. – Луганск: Из-во СНУ им. В.Даля, 2006. – 144 с.

2. **Фоменко Т.Г., Бутовецкий В.С., Погарцева Е.М.** Технология обогащения углей. – М.: Недра. - 1976. - 303 с.

3. **Самылин Н.А.** Технология обогащения угля гидравлической отсадкой. – М.: Недра, 1967. – 208 с.

4. **Самылин Н.А., Починок В.В.** Влияние мелких классов угля на процесс отсадки. / В кн. Научные труды Укрнииуглеобогащения. – М.: Недра, 1963. – С. 70-84.

5. **Виноградов Н.Н.** Анализ движения материала в отсадочных машинах с повышенной частотой пульсаций и теоретическое обоснование выбора приводного механизма. – Дис. ... канд. техн. наук, М.: МГИ, 1952. – 172 с.

6. **Верховский И.М., Виноградов Н.Н., Арутюнов О.М., Кейтельгиссер И.Н.** Новые представления о сущности расслоения в процессе гидравлической отсадки. – В сб. Вопросы теории гравитационных методов обогащения полезных ископаемых. – М.: Госгортехиздат. – 1960. – С. 68–77.

7. **Бочковский Г.М.** Расслоение, как наиболее важный раздел теории и практики // Горный журнал, 1954, № 1. – С. 47–55.

8. Техника и технология обогащения углей: Справочное руководство / Под ред. **В.А.Чантурия.** – М.: Наука, 1995. – 622 с.

9. **Кизельватер Б.В.** Теоретические основы гравитационных процессов обогащения. - М.: Недра, 1979. – 295 с.

10. **Набоков К.Ф., Дубинский Ю.М.** Эксплуатация беспоршневых отсадочных машин. – М.:Недра. – 1966. – 156 с.

© Чмилев В.И., 2006

Надійшла до редакції 03.05.06 р.

Рекомендовано до публікації д.т.н. О.Д. Полуляхом

УДК 622.75

П.И. Пилов, д-р техн. наук,

В.А. Святошенко

(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет)

УТОЧНЕННАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ГРАВИТАЦИОННОЙ СЕПАРАЦИИ КАМЕННЫХ УГЛЕЙ

Результаты многочисленных экспериментальных исследований процессов гравитационного обогащения угля свидетельствуют о связи точности сепарации с крупностью обогащаемого материала. Учет этой зависимости позволяет обоснованно выбирать технологические схемы обогащения каменных углей, в частности, пределы крупности машинных классов и их количество.

Мерой точности сепарации при описании сепарационных характеристик гравитационных процессов интегралом вероятности Гаусса является среднее

вероятное отклонение плотности разделения E_{pm} , пропорциональное среднему квадратичному.

Для математического описания этой зависимости от крупности обогащаемого материала рассмотрим процесс гравитационной сепарации как стохастический, в котором вероятность извлечения частиц определяется их взаимодействием с сепарационной средой, характеризуемым скоростью их перемещения.

При сепарации в тяжелых средах в промышленных условиях используются суспензии, в которых качестве суспензоида (утяжелителя) применяется магнетит крупностью менее 0,1 мм. Эти суспензии отличаются слабой устойчивостью и повышенной вязкостью. Для поддержания равномерной концентрации утяжелителя при обогащении угля в колесных сепараторах суспензия непрерывно подается и выводится из зоны разделения, что сокращает время ее пребывания и создает восходящий поток, который предотвращает осаждение частиц утяжелителя.

Вязкость суспензии зависит от объемной концентрации твердой фазы и удельной поверхности межфазного контакта (твердая фаза-жидкая фаза) [3]. В реальном процессе тяжелосредного обогащения твердая фаза представлена утяжелителем и шламами, образовавшимися при истирании и размокании обогащаемого материала, поэтому величина коэффициента динамической вязкости определяется их суммарной концентрацией и средневзвешенным значением удельной поверхности межфазного контакта.

Вращение в вязкой суспензии элеваторного колеса, предназначенного для разгрузки потонувших тяжелых фракций, вызывает появление вихрей. Их пульсационная скорость пропорциональна линейной скорости перемещения поверхностей элеваторного колеса относительно суспензии, а масштаб и путь смещения - пропорциональны геометрическим размерам конструктивных элементов колеса (расстояние между перегородками, образующими ковши, ширина колеса и др.).

Наличие вихрей предопределяет массоперенос частиц сепарируемого материала в направлении обратном градиенту их концентрации и вызывает засорение продуктов обогащения посторонними фракциями. Указанный массоперенос обусловлен не только перемещением на расстояние пути смещения крупномасштабных элементов турбулентности с определенной пульсационной скоростью, но и массообменом этих элементов с окружающей средой в процессе их движения. Подробный механизм турбулентного массопереноса изложен в работе [2], из которой следует, что коэффициент переноса твердой фазы пропорционален коэффициенту турбулентного переноса жидкой среды (в данном случае – суспензии) D , а также зависит от скорости сепарируемых частиц относительно среды v :

$$D_s = D \frac{1 - \exp(-k_t v)}{k_t v}, \quad (1)$$

где k_t – коэффициент, характеризующий структуру турбулентного потока и равный отношению пути смешения к масштабу турбулентности и обратно пропорциональный пульсационной составляющей скорости суспензии.

Коэффициент турбулентного переноса жидкой среды пропорционален коэффициенту ее кинематической вязкости, т.е. для рассматриваемого случая он зависит от объемной концентрации и плотности твердой фазы, ее поверхностных свойств и удельной поверхности межфазного контакта [3].

Коэффициент турбулентного переноса определяет распределение твердой фазы жидкой среде [2]. При его увеличении концентрация частиц становится более равномерной, что приводит к снижению сепарационных эффектов и ухудшению сепарационной характеристики. Следовательно, исходя из роли турбулентного перемешивания в процессе сепарации твердой фазы в жидкой среде, среднее вероятное отклонение плотности разделения пропорционально коэффициенту турбулентного переноса рабочей средой (суспензией) обогащаемого материала, т.е. $E_{pm} \approx D_s$.

Анализ формулы (1) показывает, что при достаточно высоких скоростях перемещения сепарируемых частиц относительно суспензии ввиду их значительной крупности коэффициент турбулентного переноса, а значит и среднее вероятное отклонение обратно пропорциональны скорости движения частиц обогащаемого материала относительно суспензии. Поскольку для таких частиц коэффициент сопротивления движению в жидкой среде уже не связан с изменением толщины и формы пограничного слоя, то их скорость будет пропорциональна корню квадратному из эквивалентного диаметра (крупности) [1]. Таким образом:

$$E_{pm} \approx \frac{1}{\sqrt{x}}. \quad (2)$$

Аналогичные рассуждения относительно массопереноса можно провести и в отношении гидравлической отсадки. В этом процессе рабочей средой является вода. В промышленных условиях для этих целей используется так называемая обратная вода, т.е. вода, ранее использовавшаяся в процессе обогащения и прошедшая стадию регенерации, но имеющая остаточную концентрацию твердой фазы. Этот остаток, представленный твердой фазой и шламами (первичными и вторичными), образовавшимися от обогащаемого материала, образует суспензию. Ее реологические свойства также определяются уравнением "вязкость-концентрация" [3]. Поскольку такая суспензия является

слабо концентрированной и маловязкой по сравнению с тяжелыми средами, то ее свойства следует рассматривать как близкие к свойствам воды, но с соответствующей корректировкой в случае большого содержания твердой фазы.

Организованные пульсации рабочей среды при гидравлической отсадке приводят к стратификации (расслоению) обогащаемого материала, процесс которой является массовым и также связан с массообменом, определяемым наряду со свойствами и составом сепарируемого материала, амплитудой и частотой пульсаций. При этом механизм массообмена может быть представлен аналогично турбулентному массопереносу с массообменом при движении элементов турбулентности [2]. В этом случае среднее вероятное отклонение плотности разделения также может быть охарактеризовано предложенными формулами (1) и (2). Однако принципиальным отличием процесса гидравлической отсадки от сепарации в тяжелых средах является отсутствие прямой связи между плотностью разделения и плотностью рабочей среды.

Выявленная таким образом обратная пропорциональная зависимость среднего вероятного отклонения с квадратным корнем от крупности обогащаемого материала позволила предложить следующую полуэмпирическую формулу:

$$E_{pm} = \frac{\delta_p - a}{b\sqrt{x}}, \quad (3)$$

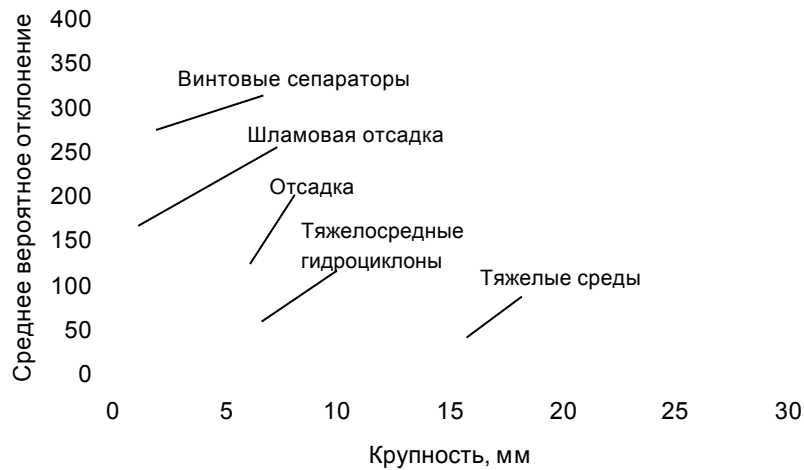
где δ_p – плотность разделения, кг/м³; a и b – эмпирические коэффициенты, специфичные для каждого обогатительного аппарата; x – эквивалентная крупность обогащаемого материала, мм.

Численные значения эмпирических коэффициентов, входящих в формулу (3), полученные в результате обработки экспериментальных данных, содержащихся в работе [4], представлены в таблице и на рисунке.

Таблица

Обогатительный аппарат	a	b
Тяжелосредный сепаратор	-1300	13
Тяжелосредный гидроциклон	857,3	16,53
Отсадочная машина	1000	2,4
Отсадочная машина шламовая	3828	-11,56
Винтовые сепараторы	1000	1,8

Сравнение способов гравитационной сепарации



Из формулы (3) следует, что погрешность разделения, используемая для оценки точности сепарации отсадочных машин, равна

$$I = \frac{E_{pm}}{\delta_p - \Delta} = \frac{\delta_p - a}{b\sqrt{x}(\delta_p - \Delta)} = \frac{1}{2,4\sqrt{x}} \quad (4)$$

и для определенного типа отсадочных машин зависит только от гранулометрического состава обогащаемого материала.

Полученная полуэмпирическая формула (3) относится к случаю сепарации узких классов крупности по плотности. В реальных же условиях обогащению подвергаются так называемые "машинные классы" углей, крупность которых меняется в довольно широких пределах. Причем ее минимальные и максимальные значения определяются технолого-экономическими условиями: чем меньше классов крупности, тем меньше точность разделения, ниже качество концентрата и больше потерь полезного компонента с отходами, но проще схема обогащения, ниже экономические затраты на реализацию такой технологии. Эти противоположности приводят к компромиссу, который и выражается в значениях пределов крупности "машинного класса". В практике углеобогащения приняты три основных машинных класса: 13–100 мм для обогащения в тяжелых средах, иногда в отсадочных машинах; 0,5–13 мм для обогащения отсадкой и менее 0,5 мм для обогащения флотацией. Отметим, что целесообразность выделения того или иного машинного класса зависит и от наличия соответствующего эффективного процесса сепарации и

высокопроизводительного оборудования для его реализации. Например, нижний предел обогащения каменных углей в отсадочных машинах принят 0,5 мм, однако многочисленные исследования свидетельствуют о низкой эффективности сепарации частиц крупностью уже менее 3 мм. Но более дорогостоящий процесс обогащения угля такой крупности в тяжелосредних гидrocиклонах и использование малопроизводительных концентрационных столов не нашли своего применения в практике углеобогащения. В результате упомянутого выше компромиссного подхода нижний предел крупности машинного класса для отсадки определен верхним пределом крупности последующего, широко применяемого для угольных шламов процесса флотации. Вместе с тем, адаптация к углеобогащению довольно простых аппаратов, таких как винтовые и конусные сепараторы открывают новые возможности, и уже реальным становится применение технологий углеобогащения с использованием четырех или даже пяти машинных классов.

В пределах одного машинного класса уголь может иметь различный гранулометрический состав. Поэтому технологические результаты, учитывая зависимость сепарационной характеристики применяемого процесса от крупности, будут определяться также компромиссом – выбор параметров сепарационной характеристик должен быть ориентирован на ту крупность частиц, которых в данном процессе большинство. Таким образом, возникает новая задача - определение интегральной сепарационной характеристики обогатительного процесса для всего машинного класса по частным сепарационным характеристикам узких классов, параметры которых могут задаваться формулой (3).

Если состав обогащаемого материала задан функцией распределения частиц по крупности и плотности $\varphi(x, \delta)$, а сепарационная характеристика применяемого обогатительного процесса $E(x, \delta)$, то выход продукта обогащения, например, концентрата составляет:

$$\gamma = \int_{\delta_{\min}}^{\delta_{\max}} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \varphi(x, \delta) E(x, \delta) dx d\delta \quad (5)$$

Можно допустить, что в пределах одного машинного класса распределение частиц по плотности не зависит от их крупности, т.е. фракционные составы узких классов крупности одинаковы. Тогда функцию распределения можно представить в виде произведения двух независимых функций: распределения по крупности и распределения по плотности. В таком случае выход концентрата составит:

$$\gamma = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \varphi(x) \int_{\delta_{\min}}^{\delta_{\max}} \varphi(\delta) E(x, \delta) d\delta dx. \quad (6)$$

Анализ уравнения (6) показывает то, что при интегрировании по плотности сепарационная характеристика как функция крупности и плотности может быть заменена усредненной по крупности характеристикой, являющейся функцией только плотности. Параметром точности этой характеристики может служить средневзвешенное значение среднего вероятного отклонения \bar{E}_{pm} . Его значение может быть определено с использованием уравнения (3) следующим образом:

$$\bar{E}_{pm} = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \varphi(x) E_{pm}(x) dx = \frac{\delta_p - a}{b} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \frac{\varphi(x) dx}{\sqrt{x}}. \quad (7)$$

А в случае, когда распределение частиц по крупности задано гранулометрическим составом:

$$\bar{E}_{pm} = \sum_{i=1}^n \gamma_i E_{pmi} = \frac{\delta_p - a}{b} \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_i}{\sqrt{x_i}}. \quad (8)$$

Средневзвешенное значение погрешности разделения для отсадочных машин с учетом формулы (4) может быть рассчитано аналогично:

$$\bar{I} = \frac{1}{2,4} \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_i}{\sqrt{x_i}}. \quad (9)$$

При опробовании гравитационных процессов обогащения угля получают фракционные составы исходного продукта и продуктов сепарации (концентрата и породы), с помощью которых возможно определить средневзвешенные значения среднего вероятного отклонения плотности разделения и погрешности разделения. Однако они не являются показателями, с помощью которых возможно объективно оценить сепарационные возможности данных процессов, поскольку получены для частного случая обогащения угля с определенным гранулометрическим составом и при его изменении показатели E_{pm} и I будут другими. Полученные формулы (8) и (9) позволяют решить эту

задачу: с помощью средневзвешенных значений E_{pm} и I могут быть определены коэффициенты a и b , являющиеся более универсальными константами.

Знание этих констант позволяет рассчитывать значения E_{pm} и I при изменениях гранулометрического состава машинных классов обогащаемого угля, что повышает эффективность управления процессами углеобогащения.

Список литературы

1. **Бедрань Н.Г., Денисенко А.И., Пилов П.И.** Расчет скорости свободного движения минеральных зерен в среде // Изв. вузов. Горн. журн. – 1976. – №9. – С. 141–144.
2. **Пилов П.И.** О механизме турбулентного переноса твердой фазы турбулентными потоками жидкости // Обогащение полезных ископаемых: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1987. – Вып.28. – С. 37–41.
3. **Пилов П.И.** Уравнение "вязкость-концентрация" для полидисперсных суспензий // Обогащение полезных ископаемых: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1991. – Вып. 41. – С. 79–87.
4. Справочник по обогащению углей. Под ред. **И.С.Благова, А.М.Коткина, Л.С.Зарубина.** 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 614 с.

© Пилов П.И., Святошенко В.А., 2006

*Надійшла до редакції 20.04.2006 р.
Рекомендовано до публікації*