

Е.В. ТЕРНОВАЯ

(Украина, Днепропетровск, Институт технической механики НАН Украины и ГКА Украины)

ОЦЕНКА СОВРЕМЕННЫХ СПОСОБОВ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ИЗМЕЛЬЧЕННОГО ПРОДУКТА

Введение. Порошкообразные материалы применяются во многих отраслях промышленности, например, химической, строительной, пищевой, горно-обогатительной, энергетической. Технологические свойства порошков в значительной степени зависят от их дисперсности. Дисперсный состав порошка показывает, какую долю по массе, объему или числу составляют частицы в любом диапазоне их размеров. Анализ гранулометрического состава является обязательным методом контроля в технологических процессах, связанных с изготовлением, переработкой и применением порошкообразных материалов. Задачи анализа остаются актуальными для различных технологий в области обработки полезных ископаемых.

Анализ последних достижений

Известные методы оценки гранулометрического состава можно разделить на следующие группы:

1) механическое разделение частиц путем ситового анализа (размер частиц 50-100 мкм);

2) седиментационный анализ путем пофракционного осаждения, отмучивания, накопления осадка, отбора весовых проб (1-60 мкм);

3) оптические методы с использованием оптических (0,01-1,0 мкм) и электронных (-0,0006 мкм) микроскопов, в частности метод лазерной дифракции;

4) специальные методы: электрический, спектральный, вибрационно-акустический, ультразвуковой, акустоэмиссионный (0,5-50 мкм).

Помимо анализа гранулометрического состава применяется расчетный метод удельной поверхности, в основе которого лежит определение гранулометрического состава.

$$S = k_s \sum_{i=1}^N \frac{\gamma_i}{\bar{d}_i}, \quad (1)$$

где k_s – коэффициент формы частиц, γ_i, \bar{d}_i – выход класса крупности материала, % и средний диаметр частиц этого класса, соответственно, N – число рассматриваемых классов согласно ситовому анализу.

Результаты расчетов можно проверить при вычислении удельной поверхности на аппаратах Товарова Т-3, Malvern и Multisizer.

Цель работы – обосновать перспективный способ оценки гранулометрического состава в широком диапазоне дисперсности измельченных материалов на

основе установления достоинств и недостатков известных методов гранулометрического анализа.

Изложение основного материала

1. Простейшим способом определения гранулометрического состава материала является ситовый анализ. Для проведения ситового анализа используют набор проволочных сит с квадратными отверстиями, которые соответствуют стандартной шкале. Материал крупнее 25 мм рассеивается на качающихся грохотах и ручных ситах, а мельче 25 мм – на лабораторных ситах.

Пробы сыпучего материала рассеивают сухим или мокрым способом в зависимости от крупности материала и необходимой точности ситового анализа. Если особая точность определения гранулометрического состава не требуется и материал не слипается, то применяют сухой способ.

Существенным недостатком этого метода является ограничение размера отверстия в сетках и составляет 40 мкм. Более тонкие порошки не поддаются ситовому анализу. Главные ошибки ситового анализа проистекают из разнообразия остроугольной формы фильтрующихся частиц мелкого размера (-0,08 мм) и нестабильности размеров квадратных ячеек различных ситотканей. Из-за формы частиц размером меньше 0,08 мм ошибка ситового анализа может достигать 60-70% [1].

2. Седиментационный анализ – совокупность методов дисперсионного (гранулометрического) анализа, в основе которых лежит зависимость между размером (массой) и скоростью движения тела в вязкой среде (газе или жидкости) под действием гравитационных или центробежных сил. Этот метод позволяет определять как усреднённые характеристики дисперсности, так и дисперсный (гранулометрический, зерновой, фракционный) состав анализируемой системы [2]. На рис. 1 изображен вариант прибора для проведения седиментационного анализа.

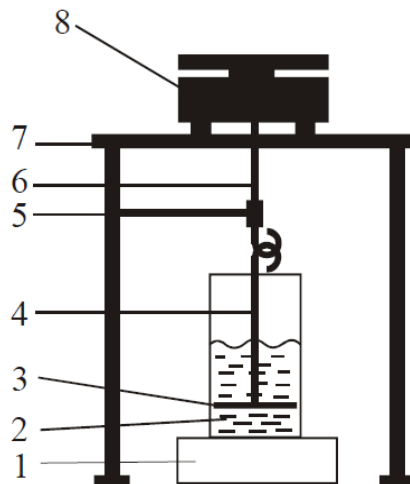


Рис. 1. Схема установки для проведения седиментационного анализа:
1 – магнитная мешалка; 2 – химический стакан с исследуемой суспензией;
3 – круглый диск для взвешивания осадка; 4 – штанга диска;
5 – удерживающее устройство; 6 – штанга весов; 7 – столик весов; 8 – весы

Підготовчі процеси збагачення

Седиментационный анализ основан на зависимости размеров частиц от скорости их оседания, выражающейся уравнением:

$$r = \sqrt{\frac{9\eta \cdot u}{2 \cdot (\rho_T - \rho_{Ж}) \cdot g}}, \quad (2)$$

где r – эквивалентный радиус частицы, см; η – вязкость воды, 0,01 пз; u – линейная скорость движения частицы, см/с; ρ_T , $\rho_{Ж}$ – соответственно, плотность дисперсной фазы и дисперсной среды, г/см³; g – ускорение силы тяжести, см/с².

К недостаткам следует отнести отсутствие возможности непрерывного контроля, а также высокую трудоемкость, длительность измерения и низкую точность измерения крупности частиц. Седиментационный анализ частиц с размером менее 2 мкм дает ошибку, которая может составить около 20%. Для частиц с размером 0,5 мкм отклонение конечных результатов от истинных может составить до 100%.

3. Оптические методы определения гранулометрического состава материалов основаны на принципе визуального распознавания частиц в отраженном свете под микроскопом. Более сложные методы основаны на законах дифракции света. На основе этих физических способов определения гранулометрического состава материала, оптические методы подразделяются на две группы:

- прямые, с применением обычных оптических микроскопов, просвечивающих и растровых электронных микроскопов;
- косвенные, с применением лазерных гранулометров и других, в которых используется принцип дифракции света.

На рис. 2 дан пример схемы установки для автоматизированного определения дисперсного состава порошков.

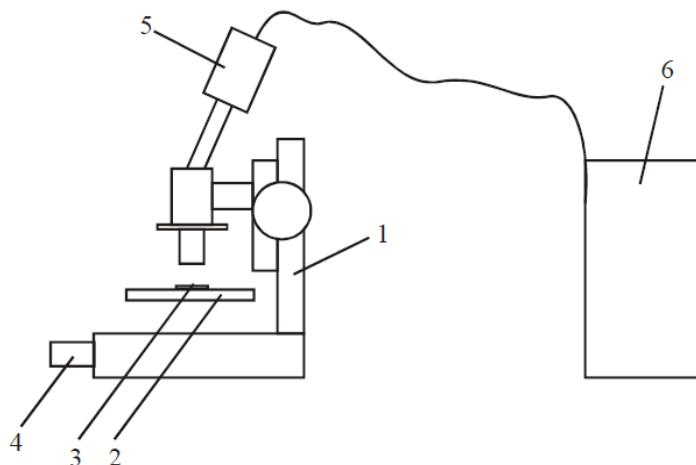


Рис. 2. Схема установка для автоматизированного определения дисперсного состава порошков:

- 1– микроскоп; 2 – предметный столик; 3 – предметное стекло с исследуемой пробой;
4 – осветитель; 5 – видеокамера; 6 – компьютер

Підготовчі процеси збагачення

У обычных оптических микроскопов высокая разрешающая способность возможна только для частиц размером не менее 1 мкм. Электронная же микроскопия позволяет с высокой точностью определять размеры частиц < 1 мкм, но главным недостатком данного анализа является то, что он длительный и весьма трудоемкий [3].

Принцип действия метода лазерной дифракции представлен на рис. 3.

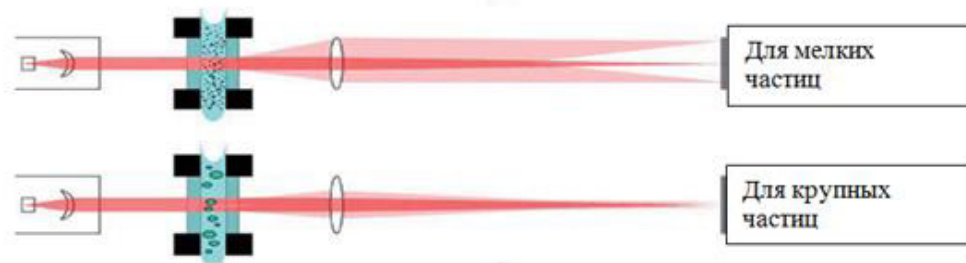


Рис. 3. Дифракция звуковых волн на крупных и мелких частицах

Спектр, анализируемый методом лазерной дифракции, получается путем регистрации флуоресценции после воздействия на исследуемое вещество лазерным излучением. Поток пульпы подвергается лазерному зондированию, после прохождения излучения через поток пульпы, с дальнейшей компьютерной обработкой [4].

Основной недостаток этого метода заключается в необходимости разбавлять пульпу водой (до 1% содержания твердого), с целью получения представительных результатов. При анализе тонкодисперсного материала, особенно, когда относительный показатель преломления пигмента и среды почти одинаковы, возникает погрешность измерения, достигающая 30%.

4. Специальные методы определения гранулометрического состава измельченного материала.

4.1 Электрические методы определения гранулометрического состава позволяют добиться высокой точности размеров частиц за счет того, что определяемым параметром является объем частиц с учетом их реальной формы. На рис. 4 показан прибор Коултера для электрического определения гранулометрического состава.

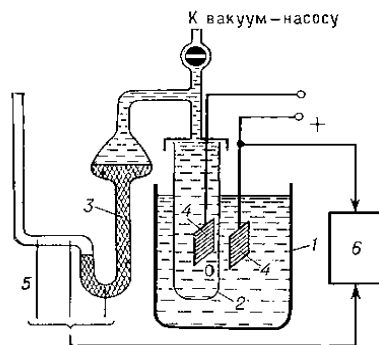


Рис. 4. Прибор Коултера для электрического определения гранулометрического состава

Підготовчі процеси збагачення

Измеряется импульс электрического напряжения, возникающий при прохождении частицы через отверстие в непроводящей перегородке (стенке ампулы). Импульс напряжения обусловлен увеличением сопротивления между электродами в момент, когда частица, увлекаемая потоком токопроводящей жидкости, проходит сквозь отверстие. Величина (амплитуда) импульса пропорциональна объёму частицы. Анализируемый материал, например суспензия, из стакана в ампулу перемещается благодаря опусканию ртути (под действием силы тяжести). Точность определения гранулометрического состава ~ 2% [5].

Недостатком данного способа является то, что осуществление дисперсионного анализа порошков и различных дисперсных систем необходимо проводить в жидкой токопроводящей среде.

4.2 Вибрационно-акустический метод заключается в использовании корреляции между значениями относительной мощности наиболее информативных частотных полос амплитудно-частотных спектров как акустического, так и вибрационного сигналов, а также размерами частичек каждого из классов крупности измельченного материала.

Контроль гранулометрического состава материала состоит из двух стадий: калибровки и измерения. На стадии калибровки ситовым анализом определяется гранулометрический состав материала в процессе измельчения с заданным интервалом времени.

Стадия измерения представляет собой непосредственно запись акустических и вибрационных сигналов, построение их спектров с помощью аппаратно-программного комплекса и формирования гранулометрического состава измельчаемого материала, на базе полученной математической модели. Погрешность измерения достигает 10% [6].

4.3 Способ спектрального анализа включает непрерывное определение гранулометрического состава материала, поступающего на весоизмеритель. Сигналы с весоизмерителя подаются на вход анализатора спектра, а на выходе формируют сигналы в виде пиков интенсивности спектральной плотности, преобразуют его в сигналы, пропорциональные содержанию отдельных фракций в потоке материала. Погрешность измерения составляет более 10% [7].

Недостатками этого способа являются низкая точность измерения крупности частиц и сложность аппаратурной схемы.

4.4 Ультразвуковой способ определения гранулометрического состава дисперсных материалов заключается в облучении образца (частиц), помещенного в иммерсионную жидкость, упругими ультразвуковыми импульсами. Происходит прием прошедших через образец импульсов и импульса, прошедшего через слой иммерсионной жидкости. Затем измеряются временные интервалы между облучающими импульсами и временами прихода импульсов из прозвучиваемой области образца, в которой и фиксируют расстояние между импульсами. После чего измеряют время возникновения резонанса гетерогенного осадка по появлению первого интерференционного минимума стоячей волны. Затем определяется время появления последующих интерференционных минимумов, и измеряют время образования каждого из последовательно возникающих резонансных слоев.

На рисунке 5 показан пример ультразвукового спектрометра для определения гранулометрического состава.

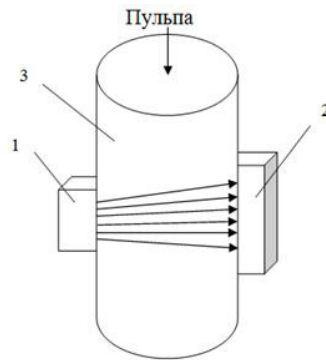


Рис. 5. Ультразвуковой спектрометр

1 – источник ультразвука; 2 – приемник ультразвуковых колебаний; 3 – пульпопровод

Принцип действия ультразвукового прибора заключается в том, что при прохождении через суспензию частично поглощаются звуковые волны, обуславливая необратимые потери энергии вследствие трения, теплопроводности и излучения. Измерительное устройство гранулометра сконструировано как система контроля гранулометрического состава и плотности пульпы, так как эти параметры измеряются одновременно и оказывают влияние на степень поглощения звуковых волн [9].

Недостатком данного способа является трудоемкость, повышенная длительность и низкая точность измерения крупности частиц.

4.5 Полагаем, что наиболее прогрессивным методом определения гранулометрического состава материалов в потоке является акустоэмиссионный способ. Он основан на явлении акустической эмиссии при разрушении или измельчении материала. Основы метода описаны в работах [10, 11]. На рис. 6 изображена схема акустоэмиссионного спектрометра.

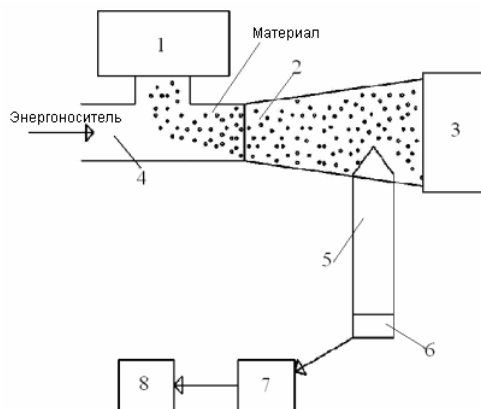


Рис. 6. Схема акустоэмиссионного спектрометра:

1 – загрузочный бункер; 2 – камера; 3 – бункер; 4 – разгонная трубка; 5 – волновод; 6 – акустический датчик; 7 – АЦП; 8 – компьютер

Підготовчі процеси збагачення

Разработанная аппаратная база включает волновод, помещенный в поток материала и соединенный с пьезокерамическим датчиком, воспринимающим сигналы акустической эмиссии при движении, разрушении или измельчении материала. Далее сигналы передаются на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и компьютер для дальнейшей обработки. Программа обработки включает использование установленных связей характеристик акустических сигналов с параметрами дисперсности гранулометрического состава и средним размером частиц исследуемого материала [12].

Этот способ располагает возможностью компьютерной обработки с высокой точностью (отклонение менее 5%) при этом реализуются возможности определения удельной поверхности, среднего размера частиц и гранулометрического состава материала на основе связи акустических измерений и дисперсионных характеристик.

Выводы

Анализ рассмотренных выше способов измерения и контроля гранулометрического состава сыпучих материалов, а также устройств для их осуществления, показывает, что практически все способы сложны и трудоемки, или не позволяют достаточно точно определить гранулометрический состав материала. В свете изложенных принципов методологии и проведенного анализа следует уделить особое внимание акустоэмиссионному методу определения гранулометрического состава материала, в направлении изучения его возможностей и совершенствования, для использования в потоках газозвеси при измельчении или транспортировании материала. В дальнейшем, следует предусмотреть возможность управления гранулометрическим составом материала в технологическом процессе, например измельчении, в широком диапазоне размера частиц.

Список литературы

1. Перов В.А., Андреев Е.Е., Биленко Л.Ф. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых: Учеб. пособие для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 301 с.
2. Рафиков, С.Р. Методы определения молекулярных весов и полидисперсности высокомолекулярных соединений / С.Р. Рафиков, С.А. Павлова, И.И. Твердохлебова. – М., 1963. – 312 с.
3. Персиц, В.З. Измерение и контроль технологических параметров на обогатительных фабриках / В.З. Персиц. – М., 1982. – 272 с.
4. [электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <http://www.outotec.com/ru/>
5. Большая советская энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия, 1969-1978. – 670 с.
6. Патент на винахід 53772 Україна, МПК В02С 25/00. Спосіб безперервного контролю гранулометричного складу матеріалу, що подрібнюється у кульовому млині / Рябушко А.В., Пермяков В.І., Кулаєнко О.О.; заявник і патентоволодар Харківський Державний Технічний Університет Будівництва та Архітектури. – u200807235; заявл. 26.05.2008; опубл. 25.10.2010, Бюл. № 20. 3 с.
7. Патент на изобретение 2212703 Россия, МПК G05D11/00. Способ контроля крупности сыпучих материалов и устройство для его осуществления / Рутковский А.Л., Жуковецкий О.В., Багаева М.Э.; заявитель и патентообладатель: Северо-Кавказский государственный

Підготовчі процеси збагачення

технологический университет, Научно-производственный комплекс "Югцветметавтоматика". – заявл. 04.05.2001; опубл. 20.09.2003. 3 с.

8. Патент на изобретение 2469309 Россия, МПК G01N29/11, G01N15/02. Ультразвуковой способ определения гранулометрического состава дисперсных материалов / Кольцова И. С., Дейнега М. А., Полухина А. С., Кольцов Ю. С.; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Санкт-Петербургский государственный университет. – заявл. 27.07.2011; опубл. 10.12.2012. 4 с.

9. [электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <http://www.dispersion.com/products>.

10. Акустический метод исследования процесса измельчения / Л.Ж. Горобец, В.Н. Бовенко, Н.С. Прядко // Обогащение руд. – 2013. – № 3. – С. 30-37.

11. Прядко Н.С. Акустико–эмиссионный мониторинг процесса струйного измельчения // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2012. – № 6. – С. 46 – 52.

12. Акустическое исследование размеров частиц в потоках газозвеси / Н.С. Прядко, Л.Ж. Горобец, В.П. Краснопер, И.В. Самофал // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2014. – Вип. 57(98). – С. 101-106.

© Терновая Е.В., 2014

*Надійшла до редколегії 25.10.2014 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. Л.Ж. Горобець*