

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗДЕЛЕНИЯ МИНЕРАЛОВ НА НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ ФРИКЦИОННОГО СЕПАРАТОРА

Ляпцев С. А., Потапов В. Я., Потапов В. В., Семериков Л. А.

Приведен теоретический анализ движения рудных частиц различной формы по наклонной плоскости фрикционного сепаратора. Результаты расчетов подтверждены экспериментальными исследованиями. Полученные в результате исследований зависимости позволяют полностью описывать весь процесс сепарации.

Ключевые слова: сепаратор; коэффициенты формы; скорость движения частиц; конструктивные параметры.

Разделительные устройства для сухого разделения обычно классифицируют по различным признакам, например, по характеру движения воздушного потока, способу подачи материала, конструктивным особенностям и т. д. Однако, эта классификация не отражает главного предназначения разделительных устройств, так как не содержит характеристик завершенности процессов разделения кусков горной массы. Хорошо известно, что различные аппараты обладают различной разделительной способностью, и это обстоятельство должно быть определяющим в любой их классификации. Для характеристики разделительных устройств важны такие параметры, как диапазон изменения граничной крупности разделения, производительность и область применения, конструктивная особенность поверхности разделения. Эти факторы также должны найти отражение при сравнительном рассмотрении различных аппаратов для разделения горной массы.

В группу процессов разделения полезных ископаемых, использующих различие в эффектах взаимодействия кусков разделяемых компонентов с рабочей поверхностью сепаратора, входят разделение по упругости, трению, адгезии, пластичности, форме, а также методы, в основу которых положена комбинация нескольких эффектов взаимодействия с рабочей поверхностью. Как показывает анализ работ по разделению полезных ископаемых, разделение по упругости и трению широко применяется для получения высококачественных заполнителей для бетона из

неравнопрочных пород, отделения гравия от глинистых включений, обогащения известнякового щебня, для получения кондиционных продуктов из слюдосодержащего сырья и тальковых руд. В сельском хозяйстве широко применяются аппараты для очистки от примесей и разделение по трению продуктов переработки зерна.

Работа фрикционного сепаратора эффективна при соблюдении двух обязательных условий: поток материала должен формироваться толщиной в одну частицу; должно быть обеспечено достаточное расстояние между движущимися частицами. Первая стадия сепарации – движение по фрикционной поверхности. Ее задачей является сообщение частицам продукта требуемой скорости движения. На второй стадии частица покидает фрикционную поверхность и совершает свободное движение в пространстве. Задачей второй стадии является собственно разделение – обеспечение падения частиц на разное расстояние.

Фрикционные свойства горных пород зависят как от формы отдельных кусков полезного компонента и породы, так и от гранулометрического состава – кусковатости породной массы. Установлено, что нерегулярная форма кусков породы снижает показатели разделения полезного компонента при фрикционной сепарации по сравнению с кусками горной породы идеальной формы.

Степень отклонения формы кусков горных пород от шарообразной можно оценить при помощи критерия «неправильности» (ко-

эфициента формы K_ϕ). Этот критерий в соответствии с [1] можно установить по одной из двух методик. Первая из них определяет коэффициент формы как отношение площадей вписанной в образец породы и описанной вокруг него сфер. Если при этом D_i – диаметр меньшей из них, а D_e – большей, то соответствующие площади равны $A_i = \pi D_i^2$ и $A_e = \pi D_e^2$. Следовательно, $K_\phi = A_i / A_e = D_i^2 / D_e^2$. Таким образом, по первой методике коэффициент формы определяется как отношение квадратов диаметров вписанной и описанной вокруг куска горной породы сфер. Во второй методике используются два линейных размера. Для определения критерия «неправильности» измеряются поперечное и продольное распространение контура образца в прямоугольном шаблоне, и коэффициент формы рассчитывается как отношение продольного линейного размера (D) к поперечному (H): $K_\phi = D / H$.

Часто для описания формы куска недостаточно двух измерений. Поэтому используются критерии, основанные на соотношении размеров кусков по трем взаимно перпендикулярным направлениям. Такими величинами являются: наибольший размер – длина D , средний размер – ширина S и наименьший размер – толщина H . Для возможности сопоставления данных о кусках разной крупности принято длину и толщину выражать в относительных величинах (относительно ширины): D / S и H / S . Эти отношения называются относительными длиной и толщиной, их принято считать численной характеристикой формы куска. В зависимости от их значения куски горной массы обычно подразделяют на шесть типовых форм [2]:

- 1) кубообразная: $D / S = 1 \dots 1,3$, $H / S = 0,7 \dots 1$;
- 2) плитчатая: $D / S = 1 \dots 1,3$, $H / S = 0,3 \dots 0,7$;
- 3) пластинчатая: $D / S = 1 \dots 1,3$, $H / S < 0,3$;
- 4) столбчатая: $D / S > 1,3$, $H / S = 0,7 \dots 1$;
- 5) удлиненно-плитчатая: $D / S > 1,3$, $H / S = 0,3 \dots 0,7$;
- 6) удлиненно-пластинчатая: $D / S > 1,3$, $H / S < 0,3$.

Обобщая приведенную классификацию, можно остановиться на трех вариантах: кубообразная форма (1, 2), столбчатая (4) и плитчатая (3, 5, 6).

Прогнозирование результатов предварительного обогащения и выбор рациональных параметров устройства возможно осуществить с помощью моделирования рассматриваемого процесса на ПЭВМ. Большинство исследователей пользуются методами такого моделирования на основе уравнений движения частицы обогащаемого материала по шероховатой наклонной плоскости, составленных с помощью основного закона динамики точки (второго закона Ньютона). Использование точечной механической модели характерно и для определения механических характеристик частиц, составляющих стандартную методику исследований.

Практика обогащения угля и гранатов, а также асбестовых руд показывает, что в зависимости от угла наклона фрикционного лотка возможно не только скольжение частиц по наклонной плоскости, но и их перекатывание, что, несомненно, влияет на эффективность процесса разделения.

Математическое описание движения частицы по наклонной плоскости [3–6] позволило установить все возможные варианты движения частицы:

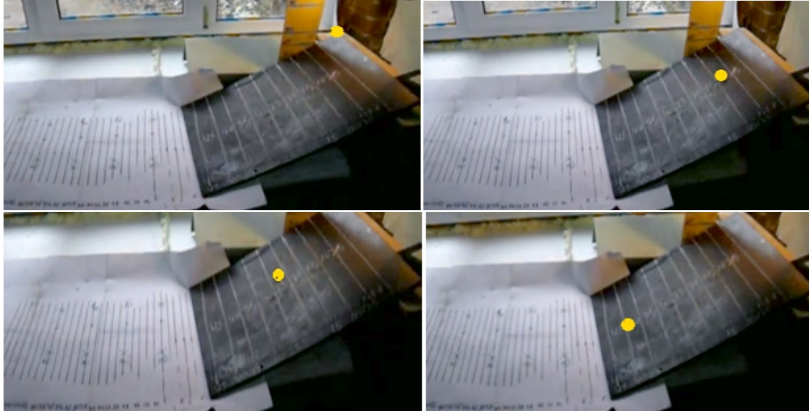
- равновесие на наклонной плоскости $\text{tg } \alpha < \min \{f; 2\delta / D\}$;
 - скольжение по ней $f < \min \{\text{tg } \alpha; 2\delta / D\}$;
 - чистое качение частицы $\text{tg } \alpha > 2\delta / D$;
 - качение со скольжением $2\delta / D < f < \text{tg } \alpha$,
- где α – угол наклона фрикционной плоскости, f и δ – коэффициенты трения скольжения и качения, соответственно.

Условия перемещения частиц по наклонной плоскости были проверены экспериментально и представлены на рис. 1 в виде фотографий движения частиц.

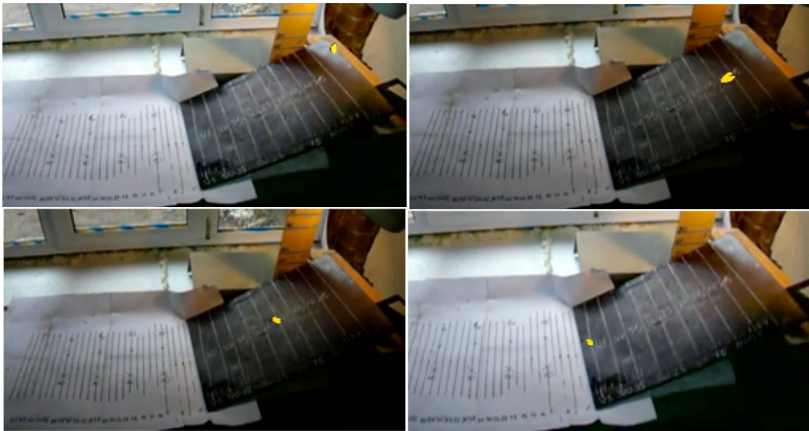
На основании теоремы об изменении кинетической энергии проведем теоретический анализ движения различных типовых форм кусков горных пород по поверхности узла стратификации.

Частицы *плитчатой* формы перемещаются по наклонной плоскости исключительно скольжением, поэтому при их движении

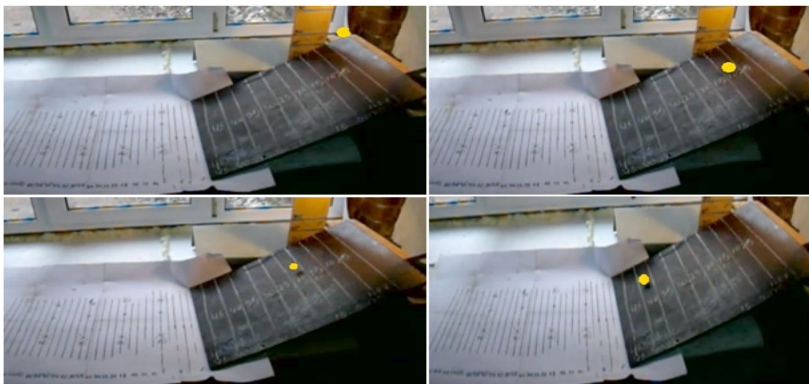
работу совершают лишь сила тяжести и сила трения скольжения. Учитывая, что при этом, как правило, наблюдается поступательное



a



б



в

Рис. 1. Схемы движения кусков горной породы по плоскости узла стратификации:

a – чистое качение, *б* – скольжение, *в* – качение со скольжением

движение частицы, ее скорость в конце наклонной плоскости можно определить в виде:

$$v = \sqrt{2gl(\sin \alpha - f \cos \alpha) + v_0^2}, \quad (1)$$

где l – длина полки (наклонной плоскости), м; v_0 – скорость частицы в начале участка скольжения, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с².

Движение частицы *столбчатой* формы зависит от ее ориентации в момент начала движения вдоль полки. За счет момента трения верчения частица за короткий срок стремится занять энергетически рациональное расположение и выходит на режим качения, совершая плоскопараллельное движение.

В соответствии с теоремой об изменении кинетической энергии [4] $T - T_0 = \sum A$, где T , T_0 – кинетическая энергия в конце и в начале участка, соответственно; $\sum A$ – сумма работ, приложенных к частице сил.

Кинетическая энергия при плоскопараллельном движении $T = 0,5(mv^2 + J\omega^2)$, где m – масса частицы, кг; J – ее момент инерции относительно продольной оси, кг·м². При этом для качения без скольжения $\omega = 2v / H$, а момент инерции относительно продольной оси можно приближенно представить в виде $J = 0,125mH^2$ по формуле для однородного цилиндра. Следовательно, кинетическая энергия $T = 0,75mv^2$.

Работу при качении частицы по наклонной плоскости совершают сила тяжести и момент сил трения качения, поэтому $\sum A = mg / \sin \alpha - 2\delta mg \cos \alpha / H$, где δ – приведенный коэффициент трения качения, м.

Подставляя указанные зависимости в уравнение теоремы об изменении кинетической энергии, получим выражение для скорости в виде

$$v_0 = \sqrt{\frac{4}{3} g l (\sin \alpha - \frac{2\delta}{H} \cos \alpha) + v_0^2}. \quad (2)$$

Для частиц *кубообразной* формы возможно несколько режимов движения в зависимости от угла наклона полки:

- 1) чистое скольжение частицы по наклонной плоскости;
- 2) качение без проскальзывания;
- 3) качение со скольжением.

Скорость частицы в конце полки при качении без проскальзывания можно определить, скорректировав формулу (2). Так как кубообразную частицу нельзя приближать формой неправильного цилиндра, ее момент

инерции удобнее определять для правильного геометрического тела, близкого по форме к шару, для которого $J = 0,1mD^2$. Кинетическая энергия в этом случае $T = 0,7mv^2$, работа действующих сил также связана с величиной D : $\sum A = mgl \sin \alpha - 2\delta mg \cos \alpha / D$.

Таким образом,

$$v_0 = \sqrt{\frac{10}{7} g l (\sin \alpha - \frac{2\delta}{D} \cos \alpha) + v_0^2}. \quad (3)$$

При качении частицы со скольжением скорость ее центра тяжести не зависит от угловой скорости, уравнение движения можно описать по теореме о движении центра масс [4]:

$$ma_c = mg \sin \alpha - F_{тр},$$

где $F_{тр} = fN = fmg \cos \alpha$.

Отсюда видно, что ускорение, а значит и скорость частицы не зависят от величины коэффициента трения качения. А это, в свою очередь, означает, что скорость частицы в конце наклонной плоскости так же, как и при чистом скольжении, может быть определена по формуле (1) [6].

Начальная скорость v_0 во всех приведенных формулах может быть получена на основании анализа удара частицы о наклонную плоскость. Так, если загрузка обогащаемого материала происходит с высоты h , то после неупругого удара о наклонную плоскость [3]

$$v_0 = \sqrt{2gh} (\sin \alpha - f \cos \alpha). \quad (4)$$

Таким образом, совокупность формул (1)–(4) может служить основой для расчетов движения рудных частиц различной формы вдоль наклонной плоскости, чтобы определить их скорость v в конце фрикционной полки. Приведенные зависимости позволяют описать весь процесс сепарации от стадии загрузки до момента извлечения обогащенного материала. В соответствии с этими соотношениями можно проводить вычислительный эксперимент, в котором нетрудно менять конструктивные параметры фрикционного сепаратора (величины h , l , α).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Адов В. А., Морозов В. В. Разработка и применение критерия формы для оценки обогатимости угля пневматическим способом. М.: ГИАБ, 2010. С. 244–250.
2. Барон Л. И. Характеристики трения горных пород. М.: Наука, 1967. 208 с.
3. Ляпцев С. А., Потапов В. Я. Совершенствование узла стратификации фрикционного сепаратора //

4. Вебер Г. Э., Ляпцев С. А. Лекции по теоретической механике. Екатеринбург: УГГУ, 2008. С. 198–254.
5. Потапов В. Я. Теоретический анализ движения и удара частицы обогащаемого материала о наклонную плоскость / В. Я. Потапов [и др.] // Изв. вузов. Горный журнал. 2007. № 1. С. 110–113.
6. Потапов В. Я., Потапов В. В. Закономерности движения куска горной породы по наклонной плоскости фрикционного сепаратора // Изв. вузов. Горный журнал. 2011. № 5. С. 94–100.

Поступила в редакцию 23 апреля 2014 г.

Ляпцев Сергей Андреевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой технической механики, профессор. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: gmf.tm@ursmu.ru

Потапов Валентин Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры горной механики, доцент. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: 2c1@inbox.ru

Потапов Владимир Валентинович – кандидат технических наук, доцент. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет.

Семериков Леонтий Андреевич – аспирант кафедры горной механики. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет.