

С.А. Ляпцев, В.Я. Потапов**ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗДЕЛЕНИЯ МИНЕРАЛОВ
НА НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ
ФРИКЦИОННОГО СЕПАРАТОРА**

Рассмотрены математические закономерности поведения частиц на наклонной плоскости фрикционного сепаратора. Закономерности получены в соответствии с общими теоремами динамики механической системы и позволяют оценить скорость движения рудных частиц для различной их формы. Полученные зависимости могут служить основой методики определения конструктивных параметров сепаратора на основе изучения характеристик трения кусков горной породы для получения конкретных рекомендаций по совершенствованию узла стратификации. Результаты расчетов подтверждены экспериментальными исследованиями.

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 ра-

бочей поверхностью сепаратора, входят разделение по упругости, трению, адгезии, пластичности, форме и 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: (1) поток материала должен формироваться толщиной в одну частицу; (2) должно быть обеспечено достаточное расстояние между движущимися частицами. Первая стадия сепарации – движение по фрикционной поверхности. Ее задачей является сообщение частицам про-

дукта 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» (коэффициента 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 $A_i = \pi \cdot D_i^2$ и $A_e = \pi \cdot D_e^2$. 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 используется два линейных размера. Для определения критерия «неправильности» измеряются поперечное и продольное пространство 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, основан-

ные 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 обычно подразделяют куски горной массы на шесть типовых форм [2]:

1. кубообразная:

$$D/S = 1 \div 1,3; H/S = 0,7 \div 1;$$

2. плитчатая:

$$D/S = 1 \div 1,3; H/S = 0,3 \div 0,7;$$

3. пластинчатая:

$$D/S = 1 \div 1,3; H/S < 0,3;$$

4. столбчатая:

$$D/S > 1,3; H/S = 0,7 \div 1;$$

5. удлинённо-плитчатая:

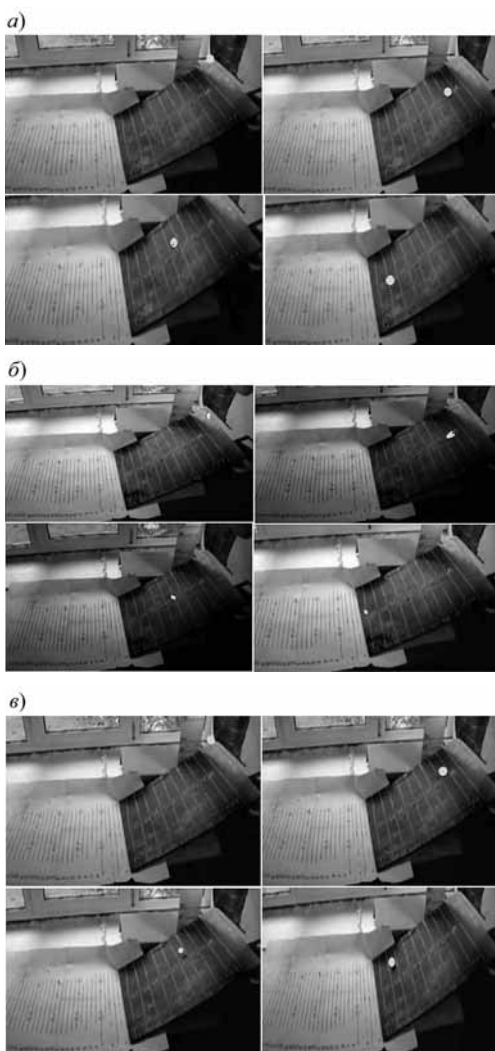
$$D/S > 1,3; H/S = 0,3 \div 0,7;$$

6. удлинённо-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, состав-



Схемы движения кусков горной породы по плоскости узла стратификации: а) чистое качение, б) скольжение, в) качение со скольжением

ляющих 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 перекачивание, что, несомненно, влияет на эффективность процесса разделения.

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

- равновесие на наклонной плоскости

$$\operatorname{tg} \alpha < \min \{f; 2\delta / D\};$$

- скольжение по ней

$$f < \min \{\operatorname{tg} \alpha, 2\delta / D\};$$

- чистое качение частицы

$$\operatorname{tg} \alpha > 2\delta / D;$$

- качение со скольжением

$$2\delta / D < f < \operatorname{tg} \alpha,$$

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 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 вращения 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] $T - T_0 = \Sigma A$, где T, T_0 – кинетическая энергия в конце и в начале участка, соответственно; ΣA – 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, возможно, 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

$$\Sigma A = mgl \sin \alpha - 2\delta mg \cos \alpha / H$$

где δ – приведенный коэффициент трения качения, м.

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

$$V = \sqrt{\frac{4}{3}gl \left(\sin \alpha - \frac{2\delta}{H} \cos \alpha \right) + V_0^2}. \quad (2)$$

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, а потому 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 :

$$\Sigma A = mgl \sin \alpha - 2\delta mg \cos \alpha / D.$$

Таким образом,

$$V = \sqrt{\frac{10}{7}gl \left(\sin \alpha - \frac{2\delta}{D} \cos \alpha \right) + V_0^2}. \quad (3)$$

При качении частицы со скольжением скорость ее центра тяжести не зависит от угловой скорости, уравнение движения возможно 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 также может быть определена, как и при чистом скольжении, то есть по формуле (3.1).

Начальная скорость V_0 во всех полученных 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 ско-

рость V в конце фрикционной полки. Приведенные зависимости позволяют описать весь процесс сепарации от стадии загрузки до момента извлечения обогащенного материала. В соот-

ветствии с этими соотношениями можно проводить вычислительный эксперимент, в котором нетрудно менять конструктивные параметры фрикционного сепаратора (величины h, l, α).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алов В.А., Морозов В.В. Разработка и применение критерия формы для оценки обогатимости угля пневматическим способом // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 6. – 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 // Современные проблемы науки и образования. – 2011. – № 2. URL: www.science-education.ru/96-4622.
4. Вебер Г.Э., Ляпцев С.А. Лекции по теоретической механике. – Екатеринбург: УГГУ, 2008 – С. 198–254. **УДК**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Ляпцев Сергей Андреевич – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, e-mail: gmf.tm@ursmu.ru,
Потапов Валентин Яковлевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: 2c1@inbox.ru,
Уральский государственный горный университет.

UDC 621.928

REGULARITIES OF MINERALS DIVISION ON THE FRICTIONAL SEPARATOR INCLINED PLANE

Lyaptsev S.A.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Chair, e-mail: gmf.tm@ursmu.ru,
Potapov V.Ya.¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: 2c1@inbox.ru,
¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia, e-mail: office@ursmu.ru.

Under consideration are mathematical laws of behavior of particles on the inclined surface of friction separator. The laws have been derived in accordance with the general theorems of mechanical system dynamics and allow estimating velocities of particles of different shape. The derived laws can be the basis for the procedure of determination of separator design parameters based on the analysis of friction between pieces of rocks in order to elaborate specific recommendations on improvement of a stratification unit. The calculation results are confirmed by the data of the experimental research.

Key words: separator, coefficients of shape, particle velocity, design parameters.

Key words: separator, form coefficients, speed of particles movement, design data.

REFERENCES

1. Adov V.A., Morozov V.V. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'. 2010, no 6, pp. 244–250.
2. Baron L.I. Kharakteristiki treniya gornykh porod (Rock friction characteristics), Moscow, Nauka, 1967, 208 p.
3. Lyaptsev S.A., Potapov V.Ya. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2011, no 2. URL: www.science-education.ru/96-4622.
4. Veber G.E., Lyaptsev S.A. Lektsii po teoreticheskoi mekhanike (Lectures on theoretical mechanics), Ekaterinburg, UGGU, 2008, pp. 198–254.

