

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УЗЛА СТРАТИФИКАЦИИ ФРИКЦИОННОГО СЕПАРАТОРА

Ляпцев С.А., Потапов В.Я.

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург, Россия, e-mail: gmf.tm@ursmu.ru

В статье рассмотрен процесс движения различных типовых форм кусков горных пород по поверхности узла стратификации (полки) фрикционного сепаратора. Приведены критерии оценки формы кусков. На основании специально разработанных методик установлены экспериментально фрикционные характеристики угля, асбеста, слюды и вмещающих пород для различных материалов узла стратификации.

Разработка и совершенствование узлов стратификации фрикционных сепараторов осуществляется за счет установки нескольких плоскостей под различными углами и на определенном расстоянии друг от друга. Представлено описание конструкции барабанно-полочного фрикционного сепаратора.

Ключевые слова: уравнения движения, критерий формы, схема сил, действующих на частицу, узел стратификации, барабанно-полочный фрикционный сепаратор, фрикционные и упругие характеристики

THE PERFECTION OF THE FRICTIONAL SEPARATOR STRATIFICATION KNOT

Lyaptsev S.A., Potapov V.Y.

FSBEI HPE «Ural state mining university», Ekaterinburg, Russia, e-mail: gmf.tm@ursmu.ru

The article is described how the movement of various standard rock forms fragments on the surface of the frictional separator stratification (board) node. The criteria evaluation form lumps. On the basis of specially developed techniques established experimentally the frictional characteristics of coal, asbestos, mica and host rock material for the various node stratification.

Development and improvement of the friction separators stratification nodes made through the installation of several planes at different angles and at a certain distance from each other. The description of the design friction barrel-board separator is presented.

Keywords: equations of movement, test form, the scheme of forces acting on the particle, the stratification node, the frictional barrel-board separator, frictional and elastic properties

Переработка полезных ископаемых на обогатительных фабриках включает ряд последовательных операций, в результате которых достигается отделение полезных компонентов от примесей. Различия в форме частиц и коэффициенте трения позволяют отделять плоские чешуйчатые частички слюды или волокнистые агрегаты асбеста от частичек породы, которые имеют округлую форму. При движении по наклонной плоскости волокнистые и плоские частички скользят, а округлые скатываются вниз. Сопротивление качению всегда меньше сопротивления скольжению, поэтому плоские и округлые частички движутся по наклонной плоскости с разными скоростями и по разным траекториям, что создаёт условия для их разделения.

В практике обогащения полезных ископаемых нашли применение сепараторы, разделяющие смеси по совокупности таких свойств, как трение и гравитация, удар и трение, гидродинамические и гравитационные свойства, аэродинамические и фрикционные свойства и др. В процессе фрикционной сепарации можно выделить две стадии: первая стадия – движение по поверхности узла стратификации; вторая стадия – свободное падение. Для эффективной работы такого сепаратора обязательными являются два условия: создание потока материала толщиной в одну частицу; разделение сыпучих на составляющие (обеспечение достаточного расстояния между скользящими частицами). Основной задачей первой стадии фрикционной сепарации является сообщение частицам продукта требуемой

скорости движения. Задачей второй стадии является собственно разделение – обеспечение падения частиц на разное расстояние.

Разработка и совершенствование узлов стратификации фрикционных сепараторов осуществляются за счет установки нескольких плоскостей под различными углами и на определенном расстоянии друг от друга. Такое расположение позволяет увеличить разницу между скоростями разделения кусков с различными фрикционными и упругими характеристиками, влияя на характер распределения продуктов и траектории движения частиц после схода с полки.

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 работой [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 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 обычно подразделяют куски горной массы 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) удлинненно-плитчатая $D/S > 1,3$, $H/S = 0,3 \dots 0,7$;
- 6) удлинненно-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).

Рассмотрим процесс движения различных типовых форм кусков горных пород по поверхности узла стратификации фрикционного сепаратора. Схема сил, действующих на частицу, приведена на рис. 1. На рисунке обозначены: mg – сила тяжести, а также N , $F_{\text{ТР}}$, $M_{\text{ТР}}$ – нормальная реакция, сила трения скольжения и момент трения качения, соответственно.

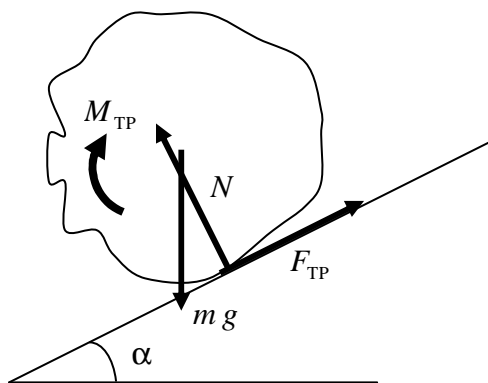


Рис. 1. Схема сил, действующих на частицу

Частицы *плитчатой* формы перемещаются по наклонной плоскости исключительно скольжением, поэтому при их движении работу совершают лишь сила тяжести и сила трения скольжения (см. рис. 1). Учитывая, что при этом, как правило, наблюдается поступательное движение частицы, ее скорость в конце наклонной плоскости можно определить по теореме об изменении кинетической энергии в виде:

$$V = \sqrt{2gl(\sin \alpha - f \cos \alpha) + V_0^2}, \quad (1)$$

где l – длина полки (наклонной плоскости), м; α – угол ее наклона; f – коэффициент трения скольжения; V_0 – скорость частицы в начале участка скольжения, м/с; g – ускорение свободного падения, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

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.

Приведем вывод выражения для скорости частицы в конце наклонной плоскости при плоскопараллельном движении. Для этого также применяем теорему об изменении кинетической энергии [3]:

$$T - T_0 = \sum A,$$

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, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$.

При этом для качения без скольжения $\omega = 2V / H$, а момент инерции относительно продольной оси возможно приближенно представить в виде $J = 0,125 m H^2$ 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 (см. рис. 1), поэтому

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

где δ – коэффициент трения качения, м.

Подставляя записанные выражения в уравнение теоремы об изменении кинетической энергии, получим выражение для скорости в виде:

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

Для частиц *кубообразной* формы возможно несколько режимов движения в зависимости от угла наклона полки [4]:

1. Чистое скольжение частицы по наклонной плоскости возникает при условии, что

$$f < \min \{ \operatorname{tg} \alpha, 2 \delta / D \}, \quad (3)$$

где D – условный (эквивалентный) диаметр частицы, м. Скорость частицы в этом случае, как указывалось выше, определяется по формуле (1).

2. Качение без проскальзывания происходит при условии

$$\operatorname{tg} \alpha > 2 \delta / D. \quad (4)$$

Скорость частицы в конце полки можно определить по теореме об изменении кинетической энергии с небольшой корректировкой формулы (2). Дело в том, что 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 $J = 0,1 m D^2$. Кинетическая энергия в этом случае

$$T = 0,7 m V^2,$$

работа действующих сил также связана с величиной D :

$$\sum A = m g l \sin \alpha - 2 \delta m g \cos \alpha / D.$$

Таким образом,

$$V = \sqrt{\frac{10}{7} g l \left(\sin \alpha - \frac{2 \delta}{D} \cos \alpha \right) + V_0^2}. \quad (5)$$

Учитывая, что при движении без скольжения $F_{\text{тр}} < f N$, из уравнений плоскопараллельного движения можно получить соотношение между коэффициентами трения в виде:

$$\operatorname{tg} \alpha + 4 \delta / D < 3 f. \quad (6)$$

3) Качение частицы по наклонной плоскости со скольжением происходит при условии

$$2 \delta / D < f < \operatorname{tg} \alpha. \quad (7)$$

Поскольку при этом скорость центра тяжести частицы не зависит от ее угловой скорости, то уравнение движения возможно описать по теореме о движении центра масс [2] в соответствии с рис. 1:

$$m a_C = m g \sin \alpha - F_{\text{тр}}, \text{ где } F_{\text{тр}} = f N = f m g \cos \alpha.$$

Отсюда видно, что ускорение, а значит и скорость частицы, не зависят от 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 (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 в момент соприкосновения с плоскостью полки скорость частицы $U = \sqrt{2 g h}$ (обозначение для скорости U принято нестандартно только для того, чтобы не связывать эту величину с приведенными ранее скоростями).

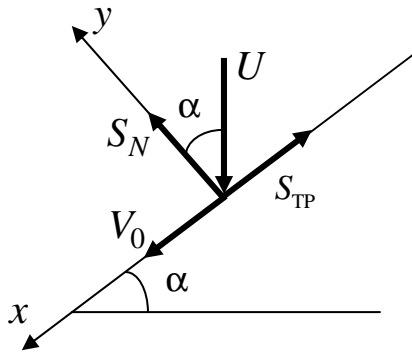


Рис. 2. Векторы, определяющие удар

решая полученную систему алгебраических уравнений и используя гипотезу Рауса $S_{TP} = f S_N$, получим значение скорости в начале движения по наклонной плоскости:

$$V_0 = \sqrt{2gh} (\sin \alpha - f \cos \alpha). \quad (8)$$

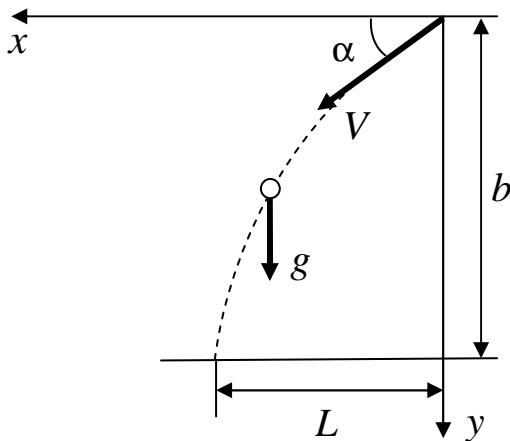


Рис. 3. Схема свободного полета частицы

движения форма рудных частиц играет не столь заметную роль. Если пренебречь сопротивлением среды, то их свободное движение можно описать с помощью законов равномерного (по горизонтали) и равнопеременного (по вертикали) движений. Для удобства теоретического описания здесь мы вводим прямоугольную систему координат, оси которой направлены горизонтально влево и вертикально вниз (рис. 3). В данной системе координат записываем указанные законы движения в виде:

$$\begin{cases} x = V t \cos \alpha, \\ y = V t \sin \alpha + g t^2 / 2. \end{cases}$$

Для $y = b$ из уравнения проекций на ось y получаем время падения частицы с высоты b . После подстановки полученного значения в уравнение проекций на ось x определяем дальность полета частицы в виде:

В соответствии с основным уравнением теории удара (теоремой об изменении количества движения) [3] запишем векторное уравнение:

$$m\vec{V}_0 - m\vec{U} = \vec{S}_N + \vec{S}_{TP},$$

где \vec{S}_N и \vec{S}_{TP} – составляющие ударного импульса, в проекциях на оси прямоугольной системы координат xu (рис. 2):

$$\begin{cases} mV_0 - mU \sin \alpha = -S_{TP}, \\ mU \cos \alpha = S_N. \end{cases}$$

Решая полученную систему алгебраических

Таким образом, совокупность формул (1), (2), (5), (8) может служить основой для расчетов движения рудных частиц различной формы вдоль наклонной плоскости, чтобы определить их скорость V в конце фрикционной полки.

Как указывалось выше, вторая стадия сепарации – свободный полет частиц обеспечивает их падение на разных расстояниях от места соскальзывания с поверхности полки. Силы сопротивления движению здесь не столь велики, как трение на фрикционной поверхности, особенно при небольших скоростях движения, при которых происходит сепарация. Поэтому на этой стадии

$$L = \frac{V \cos \alpha}{g} \left(\sqrt{V^2 \sin^2 \alpha + 2g b} - V \sin \alpha \right). \quad (9)$$

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).

Наряду с конструктивными параметрами в представленные уравнения входят коэффициенты трения скольжения и качения, которые можно определить только экспериментально. Несмотря на трудности, связанные с исследованием фрикционных характеристик единичных кусков горных пород различной формы, для их определения возможно использовать стандартное лабораторное оборудование. На основании специально разработанных методик [5, 6] установлены экспериментально фрикционные характеристики угля и асбеста для различных материалов узла стратификации. Некоторые из полученных результатов представлены в таблице.

Фрикционные характеристики материалов на различных поверхностях разделения

Продукт	Коэффициенты					
	статического трения	трения в движении, f	трения качения, δ	восстановления, k	трения при ударе	
Асбест	сталь	0,96	0,79	–	0,01	0,29
	резина	1,27	0,84	–	0,01	0,44
Порода	сталь	0,38–0,53	0,23–0,41	0,001–0,006	0,45–0,48	0,08–0,1
	резина	0,49–0,67	0,31–0,49	0,001–0,0056	0,42–0,52	0,08–0,12
Уголь	сталь	0,52	0,34	0,001–0,0085	0,24	0,21
	резина	0,7	0,56	0,0015–0,0093	0,16	0,26
Порода- сланец	сталь	0,46	0,31	–	0,7	0,12
	резина	0,59	0,47	–	0,33	0,19
Глинистое сырье: глина	сталь	0,74	0,62	–	0,12	0,36
	резина	1,1	0,88	–	0,09	0,48
Кварц	сталь	0,46	0,37	0,0008–0,005	0,76	0,08
	резина	0,59	0,47	0,001–0,0055	0,33	0,12
Слюда	сталь	0,63	0,56	–	0,08	0,26
	резина	0,72	0,62	–	0,06	0,34
Гранат	сталь	0,45	0,32	0,0007–0,0048	0,45	0,12
	резина	0,56	0,42	0,001–0,0052	0,38	0,18

Результаты эксперимента свидетельствуют, что статический коэффициент трения по стали меньше, чем по резине для всех представленных в таблице минералов. С точки зрения рассмотрения коэффициента трения как признака разделения руд, наибольший интерес представляет кинетический коэффициент трения, т.к. разделение частиц в основном идет в движении. Кинетический коэффициент трения частиц на 15–35 % меньше статического коэффициента трения. В соответствии с зависимостями [6] проведено экспериментальное

определение приведенного коэффициента трения качения горных пород по стальной и резиновой поверхностям. Исследования показывают, что существует закономерная взаимосвязь между крупностью подвижного куска и коэффициентом трения качения: чем больше размер, тем выше коэффициент трения качения и тем больше зависит от модуля упругости минеральных включений. Данная закономерность прослеживается для различных горных пород и поверхностей качения. Различие в коэффициентах трения качения ценного продукта и породы по стали и резине достаточно для их разделения. Полученные данные об упругих свойствах минералов свидетельствуют о высокой контрастности исследуемого признака и возможности его эффективного использования для разделения продуктов различной крупности.

Расчет по вышеприведенным формулам показывает, что для асбестовых, угольных и слюдосодержащих руд при длине полки 1 м и угле наклона 35° горизонтальная дальность полета рудных частиц меняется в пределах 0,6–1,2 м. Разница между дальностью полета полезных минералов и пустой породы составляет 0,3–0,45 м, что доказывает эффективность фрикционного способа разделения данных материалов.

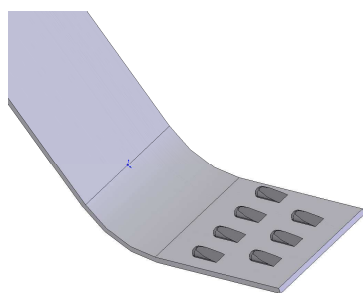


Рис. 4. Узел стратификации с дополнительной зоной сепарации

совокупность нескольких механических устройств (полки, барабана), каждое из которых предназначено для разделения горных пород по различным свойствам. На рис.4. представлена модель БПФС, состоящая из разделительной плоскости с трамплином и дефлектором 1 (см. рис. 5), вращающегося барабана 2, аспирационной системы 4, ячейчатых приемников фракции и породы 5,6, весь сепаратор закрыт кожухом 3.

Результаты процесса разделения на БПФС подтвердили основные выводы представленных теоретических исследований.

Повышения эффективности разделения можно добиться введением дополнительной зоны разделения в узле стратификации в виде плоскости с трамплином и дефлектором (рис. 4). В сепараторах, использующих фрикционные и упругие характеристики разделяемых компонентов, наличие узла стратификации (расслоения) позволяет провести подготовку продуктов к последующему разделению.

В качестве объекта проектирования была разработана модель сепаратора с подвижной разделительной поверхностью – барабанно-полочный фрикционный сепаратор (БПФС) (рис. 5). Он представляет собой

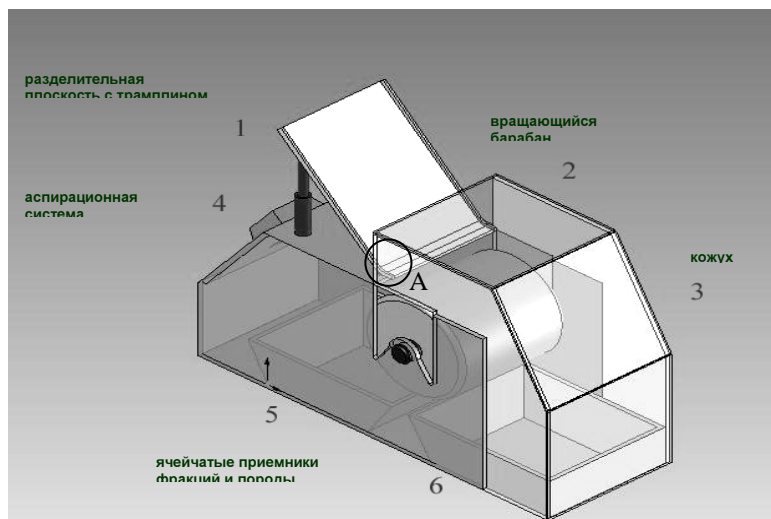


Рис. 5. Барабанно-полочный фрикционный сепаратор

Список литературы

1. Адов В.А. Разработка и применение критерия формы для оценки обогатимости угля пневматическим способом / В.А. Адов, В.В. Морозов. – М.: ГИАБ, 2010. – С. 244-250.
2. Барон Л.И. Характеристики трения горных пород. – М.: Наука, 1967. – 208 с.
3. Никитин Н.Н. Курс теоретической механики. – М.: Наука, 1990 – 324 с.

4. Теоретический анализ движения и удара частицы обогащаемого материала о наклонную плоскость / С.А. Ляпцев, В.В. Потапов, В.Я. Потапов [и др.] // Известия вузов, Горный журнал. – 2007. – № 1. – С. 107–110.

5. Методика определения упругих и фрикционных характеристик сыпучих материалов / С.А. Ляпцев, В.Я. Потапов [и др.] // Известия вузов, Горный журнал. – 1998. – № 5-6. – С. 105–108.

6. Ляпцев С.А. Обоснование методов экспериментального определения коэффициентов трения качения для горных пород» / С.А. Ляпцев, В.Я. Потапов. // Фундаментальные исследования. – М.: РАЕ, 2011. – № 8.

Рецензенты:

Готлиб Б.М., д.т.н., профессор, зав. кафедрой мехатроники Уральского государственного университета путей сообщения Министерства образования и науки России, г. Екатеринбург;

Кожушко Г.Г. д.т.н., профессор, зав. кафедрой подъемно-транспортных машин и роботов ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» Министерства образования и науки России, г. Екатеринбург.

Работа получена 07.07.2011.