

Д. Т. Н. А. И. Афанасьев, д. т. н. С. А. Ляпцев, д. т. н. В. Я. Потапов

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, Россия

УДК 622.367.6:621.928.6

ХАРАКТЕРИСТИКИ АСБЕСТОСОДЕРЖАЩИХ ГОРНЫХ ПОРОД И ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ АППАРАТОВ ДЛЯ ИХ РАЗДЕЛЕНИЯ

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований асбестосодержащих горных пород, на основании которых разработана методика математического моделирования процесса разделения и расчета конструктивных параметров разделительных аппаратов.

Ключевые слова: барабанно-полочный фрикционный сепаратор, асбестовая руда, фрикционные и упругие характеристики, математическое моделирование.

Совершенствование технологических аппаратов горного производства в последние годы осуществляется за счет введения в рудоподготовительный передел аппаратов предварительного разделения горной массы, позволяющих после первых стадий дробления удалять из процесса породные фракции. Предварительное разделение может быть реализовано гравитационными, магнитными или специальными методами — избирательным дроблением-грохочением, радиометрической сепарацией и т. д. Чаще всего в практике разработки конструкций горных машин для разделения и классификации руд используют различие в трении и упругости минералов. Наиболее перспективным направлением в совершенствовании и проектировании разделительных аппаратов является создание аппаратов, использующих комплекс физико-механических свойств горных пород [1, 2], что обеспечивает более полное разделение полезных ископаемых в одном аппарате.

Разработка и совершенствование аппаратов для разделения горных пород напрямую связана с комплексной оценкой вещественного состава и физико-механических свойств руды. На основании этих исследований происходит выбор признаков, которые и являются основными критериями для разработки аппаратов. Особый интерес представляют физические характеристики асбеста и вмещающих пород, связанные с упругостью и трением. Упругие свойства частиц характеризуются коэффициентом восстановления k , трение скольжения — коэффициентом статического трения f и кинематического трения $f_{ск}$, а также коэффициентом трения при ударе λ .

Для создания аппаратов разделения горных масс по упругим и фрикционным характеристикам авторами разработана методика отбора

и ранжирования значимых признаков. Методика проверена на основе анализа априорной информации, полученной из опыта применения технологии сепарации асбеста, слюды и угля. Так, слюда имеет связь по фрикционным характеристикам, определяемым корреляционным отношением $\eta = 0,98$ с информационным весом признака 0,168. В ранге признака фрикционные характеристики угля стоят на 3-м месте с информационным весом 0,131. Установленные значимые параметры определяли экспериментально и использовали в дальнейшем для математического моделирования поведения разделяемого продукта в проектируемых аппаратах.

Для исследований свойств монофаз асбестовой руды были отобраны различные продукты: исходная руда, черновые концентраты, промпродукты и т. д. Эти продукты были классифицированы по крупности на ситах с размером ячеек 40, 35, 20, 12, 8, 6, 4, 2,5, 1,2 и 0,63 мм. Полученные классы крупности вручную и с помощью различных разделительных аппаратов были разделены на такие монофазы, как свободное распушенное волокно, свободное нераспушенное волокно («пешка»), породные фракции игольчатой, кубической и близкой к кубической формы. Эти формы принимает исходная руда по мере прохождения по стадиям рудоподготовки к разделению. В связи с невозможностью выделения зерен различной формы в продуктах крупностью менее 4 мм они были разделены только на свободно распушенное волокно и породу. Для полной характеристики состава исходной руды исследовали типы руд, представленные мелкой сеткой, крупной сеткой, отороченными жилами, состоящие из асбеста и породных минералов (серпентинита, перидотита и офита).

Для измерения коэффициента статического трения использована известная методика,

закрывающаяся в плавном увеличении угла наклона плоскости с расположенными на ней изучаемыми частицами и фиксации угла наклона движения частиц. Коэффициент статического трения есть тангенс угла наклона, при котором начинается скольжение частицы по плоскости [3]. Чтобы установить коэффициент кинетического трения, необходимо установить наклонную плоскость под углом, превышающим угол трения покоя на 2—3°, и измерить время прохождения частицей участка плоскости фиксированной длины. Коэффициент кинетического трения рассчитывается по формуле [4]:

$$f_{\text{ск}} = \text{tg } \alpha - \frac{2S}{gt^2 \cos \alpha}, \quad (1)$$

где α — угол наклона плоскости, град; S — длина участка, м; g — ускорение свободного падения, м/с²; t — время прохождения частицей участка S , с.

Примеры экспериментального определения коэффициентов статического и кинетического трения показаны на рис. 1, а, б. Исследования

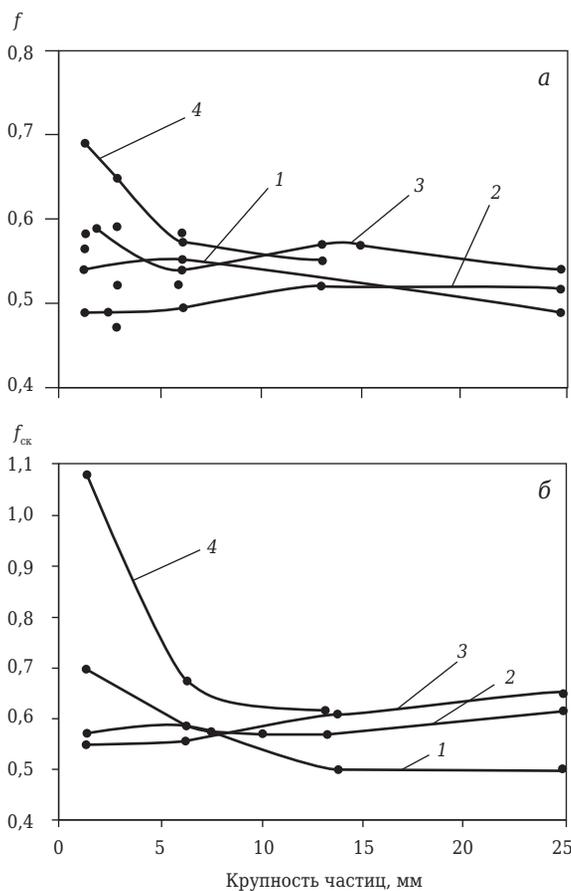


Рис. 1. Зависимости коэффициентов статического f (а) и кинетического $f_{\text{ск}}$ (б) трения горных пород по поверхности, покрытой резиной, от крупности частиц: 1 — асбест; 2 — пирротит; 3 — серпентинит; 4 — офит

показали, что коэффициенты статического и кинетического трения асбеста изменяются в широком диапазоне, что позволяет при выборе параметров отделения асбеста от породных включений использовать это для формирования поверхности загрузочных и разделительных устройств аппаратов.

Для определения коэффициентов восстановления и трения при ударе авторами настоящей статьи разработана собственная методика, основанная на обработке результатов измерения расстояния l_i от места удара частицы, брошенной с высоты h_i на наклонную плоскость, до места ее падения на горизонтальную плоскость (рис. 2). Согласно этой методике указанные коэффициенты определяются как аргументы, доставляющие минимум функционалу [4]:

$$F(\lambda, k) = \sum_{i=3}^n \left\{ \frac{4h_i}{l_i} (k+1)(\text{tg } \alpha_i - \lambda) \times \right. \\ \left. \times [k - \text{tg } \alpha_i (\text{tg } \alpha_i - k\lambda - \lambda)] - \cos^4 \alpha_i \right\}^2, \quad (2)$$

где n — число испытаний для различных углов наклона плоскости α_i .

Анализ результатов экспериментальных исследований, проведенных в УГГУ и НИИ-проектасбесте (г. Асбест Свердловской обл.), позволил установить следующие основные закономерности.

1. Упругие свойства асбестового волокна зависят от его агрегатного состояния: с увеличением расщепленности их упругость снижается, при удельной поверхности 3000—5000 см²/г волокно приобретает свойства абсолютно неупругого тела. Основной причиной значительного рассеяния дальности отскока агрегатов волокон является их вытянутая форма, приводящая к косому удару. В этом случае центр тяжести частицы значительно смещен от линии удара. У породных частиц, имеющих округлую форму

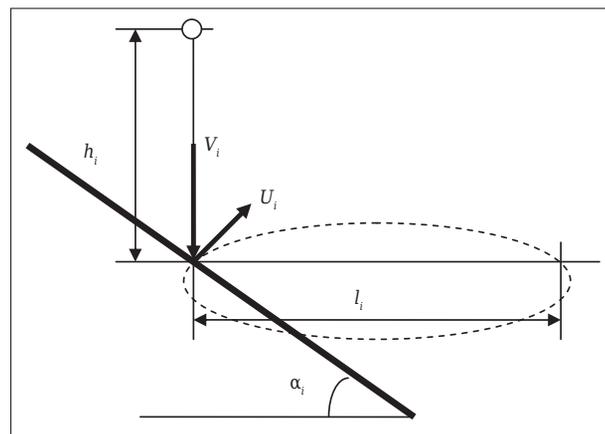


Рис. 2. Расчетная схема при проведении испытаний упругих и трещионных свойств горных пород при ударе

му, разброс дальности отражения значительно меньше. Относительное среднеквадратичное отклонение дальности их отражения при углах наклона плоскости $20\text{--}30^\circ$, как правило, составляет $30\text{--}40\%$.

2. Упругие свойства вмещающей породы в незначительной степени зависят от крупности частиц. Коэффициент восстановления увеличивается в среднем с $0,28$ до $0,30$ у частиц крупностью $45+20$ мм и до $0,37$ у частиц крупностью $1,2+0,63$ мм. То есть контрастность данного признака разделения более ярко выражена, чем скорость витания асбестового волокна и породных частиц, которая практически сблизается в классах менее 1 мм.

3. Как для породных частиц, так и для нераспушенного асбестового волокна эффект взаимодействия с поверхностью разделения зависит от высоты подачи продукта и угла наклона поверхности к горизонту. Зависимости расстояния отражения породных частиц от высоты подачи и угла наклона поверхности разделения имеют унимодальный характер с экстремумом в интервале $20\text{--}25^\circ$.

Результаты серии проведенных испытаний послужили основанием для разработки конструкций нескольких аппаратов для разделения горных пород. Разработанные конструкции можно представлять как пассивный полочный сепаратор, состоящий из разгонной плоскости и установленных ниже ее полок различной конфигурации. Проведенные в 90-х годах XX века испытания по обогащению асбестовой руды показали потенциальную работоспособность сепаратора. Однако до настоящего времени его рациональные параметры не были определены, так как не было математической модели процесса сепарации. Разработанная авторами настоящей статьи математическая модель процесса сепарации основана на анализе уравнений движения материальной частицы в пространстве аппарата, содержащих силы взаимодействия частиц с элементами конструкций. Коэффициенты восстановления и трения являются случайными величинами, меняющимися в установленных экспериментальными исследованиями пределах, поэтому процесс разделения в сепараторе является недетерминированным.

Математическая модель включает уравнения движения частицы на каждом этапе разделения. Некоторые из уравнений составлены в конечной форме, а некоторые являются дифференциальными. Так, уравнение движения частицы по узлу стратификации (шероховатой наклонной плоскости) записано с помощью известной теоремы об изменении кинетической

энергии для материальной точки [5], откуда получено значение скорости, приобретенной частицей в конце участка скольжения. Уравнения движения вдоль криволинейных образующих аппарата составлены в дифференциальной форме и проинтегрированы аналитически, а движение частицы в циркулирующем потоке воздуха интегрируется численно методом Рунге — Кутты непосредственно на компьютере. Кроме того, в систему уравнений движения включены соотношения при ударе частицы об установленные в аппарате полки. Комплекс составленных уравнений решается на компьютере для различных вариантов расположения элементов конструкций аппаратов, случайные величины реализуются с помощью датчика случайных чисел. В результате многократных расчетов для различных начальных условий производится статистический анализ разброса частиц с различным содержанием полезного компонента и подбираются параметры устройств, обеспечивающие максимальный разброс.

Имитационное моделирование процесса разделения позволило усовершенствовать конструкцию барабанно-полочного фрикционного сепаратора [6], а также разработать принципиально новое разделительное устройство — сепаратор для разделения материалов по трению и упругости [7]. Барабанно-полочный фрикционный сепаратор работает следующим образом. Исходный материал, состоящий из частиц, разных по физическим свойствам, подается на наклонную поверхность. В результате движения материала по этой поверхности происходит расслоение материала. Частицы, обладающие высоким коэффициентом трения, разгоняются незначительно и на склоне с криволинейной поверхности продолжают двигаться по более крутой траектории, чем породные частицы. Далее частицы ударяются о барабан, вращающийся навстречу потоку материала, падающего с наклонной поверхности. Имея разные упругие характеристики, частицы от поверхности барабана отскакивают в приемники соответствующих фракций. В результате имитационного моделирования процесса разделения были установлены угол наклона и радиус кривизны фрикционной поверхности, расположение и кинематические характеристики вращающегося барабана, места расположения приемников горной массы. Получено положительное решение на выдачу патента на соответствующий способ разделения сыпучих материалов [8].

Сепаратор по трению и упругости включает корпус с загрузочным лотком в виде наклон-

ной плоскости и отражательные элементы, закрепленные консольно. Разделение сыпучих материалов в этом сепараторе также осуществляется поэтапно: исходный продукт подается на поверхность желоба, который обеспечивает не только подачу материала в зону разделения, но и подготавливает материал к разделению с различными коэффициентами трения (в узле стратификации). После прохождения по желобу сформированный поток продуктов в виде веера подается на ярусно расположенные отражательные элементы, установленные таким образом, чтобы обеспечить полное ударное взаимодействие с исходным материалом. В результате этого взаимодействия образуется продольный веер разделяемых частиц материала. Неупругая (обогащенная) фракция располагается в начальной зоне веера, упругая (обедненная) — на противоположном его краю. В результате имитационного моделирования установлены схемы пространственного расположения отражающих элементов, углы наклона элементов к горизонту, расстояния между ярусами элементов, расстояния от нижней кромки загрузочного желоба до верхнего яруса элементов, положения отсекающих шиберов.

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет всесторонне исследовать процесс разделения частиц по трению и упругим свойствам и служит для рассмотрения большого числа вариантов конструкций и оптимизации режимов работы аппарата при относительно небольших затратах, не прибегая к изготовлению макетов, опытных образцов и к их экспериментальному исследованию. Входящие в расчетные формулы коэффициенты трения покоя и трения скольжения, а также коэффициенты восстановления и размеры частиц являются случайными величинами, вследствие чего аналитически без ЭВМ рассчитать траекторию движения частицы и осуществить прогноз технологических показателей разделения практически невозможно.

Библиографический список

1. **Давыдов, С. Я.** Энергосберегающее оборудование для транспортировки сыпучих материалов: исследование, разработка, производство / С. Я. Давыдов. — Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ—УПИ, 2007. — 317 с.
2. **Давыдов, С. Я.** Трубчатый ленточный конвейер с переворотом холостой ветви ленты / С. Я. Давыдов, И. Д. Кащеев, С. Н. Сычев, С. А. Ляпцев // Новые огнеупоры. — 2010. — № 7. — С. 10—15.
3. **Davydov, S. Ya.** Tubular belt conveyer with turnover of the return run of the belt / S. Ya. Davydov, I. D. Kashcheev, S. N. Sychev, S. A. Lyaptsev // Refractories and Industrial Ceramics. — 2010. — Vol. 51, № 4. — P. 250—256.
4. **Гриб, В. В.** Лабораторные испытания материалов на трение и износ / В. В. Гриб, Г. Е. Лазарев. — М.: Наука, 1968. — 141 с.
5. **Потапов, В. Я.** Методика определения упругих и фрикционных характеристик сыпучих материалов / В. Я. Потапов, Е. Ф. Цыпин, С. А. Ляпцев, А. И. Афанасьев // Изв. вузов. Горный журнал, 1998. — № 5/6. — С. 103—108.
6. **Вебер, Г. Э.** Дополнительные главы механики для горных инженеров / Г. Э. Вебер, С. А. Ляпцев. — Свердловск: УрГУ, 1989. — 200 с.
7. **Потапов, В. Я.** Совершенствование барабанно-полощного сепаратора для разделения частиц, обладающих парусностью / В. Я. Потапов // Современные проблемы науки и образования (приложение «Технические науки»). — 2012. — № 6. — С. 4.
8. **Пат. 111780 Российская Федерация.** Сепаратор для разделения материалов по трению и упругости / Потапов В. Я., Афанасьев А. И., Ляпцев С. А., Цыпин Е. Ф., Потапов В. В., Иванов В. В.; заявл. 24.06.11; опубл. 27.12.11, Бюл. № 36.
9. **Пат. 201018658 «Д» Российская Федерация.** Способ разделения сыпучих материалов и устройство для его осуществления / Потапов В. Я., Цыпин Е. Ф., Потапов В. В., Иванов В. В.; заявл. 20.11.11; опубл. 20.11.11, Бюл. № 4. ■

Получено 21.03.13

© А. И. Афанасьев, С. А. Ляпцев, В. Я. Потапов, 2013 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



7–11 октября 2013 г. г. Киев, Украина

Национальная академия наук Украины (НАНУ)
Украинское материаловедческое общество (УМО)
Национальный технический университет Украины «КПИ»
Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАНУ
Национальный информационный центр по РП7 в Украине
ООО «ИНТЕМ» (Украина)

4-я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«HighMatTech»