

6. Кузин, В. В. Микроструктурная модель керамической режущей пластины / В. В. Кузин // Вестник машиностроения. — 2011. — № 5. — С. 72–76.

Kuzin, V. V. Microstructural model of ceramic cutting plate / V. V. Kuzin // Russian Engineering Research. — 2011. — Vol. 31, № 5. — P. 479–483.

7. Кузин, В. В. Математическая модель напряженно-деформированного состояния керамической режущей пластины / В. В. Кузин, В. И. Мяченков // Вестник машиностроения. — 2011. — № 10. — С. 75–80.

Kuzin, V. V. Stress-strain state of ceramic cutting plate / V. V. Kuzin, V. I. Myachenkov // Russian Engineering Research. — 2011. — Vol. 31, № 10. — P. 994–1000.

8. Григорьев, С. Н. Автоматизированная система термомпрочностных расчетов керамических режущих пла-

стин / С. Н. Григорьев, В. И. Мяченков, В. В. Кузин // Вестник машиностроения. — 2011. — № 11. — С. 26–31.

Grigor'ev, S. N. Automated thermal-strength calculations of ceramic cutting plates / S. N. Grigor'ev, V. I. Myachenkov, V. V. Kuzin // Russian Engineering Research. — 2011. — Vol. 31, № 11. — P. 1060–1066.

9. Kuzin, V. Method of investigation of the stress-strain state of surface layer of machine elements from a sintered nonuniform material / V. Kuzin, S. Grigoriev // Applied Mechanics and Materials. — 2014. — Vol. 486. — P. 32–35. ■

Получено 30.05.14

© М. А. Волосова, С. Н. Григорьев,
В. В. Кузин, 2014 г.

Д. Т. Н. С. А. Ляпцев, д. т. н. В. Я. Потапов, д. т. н. С. Я. Давыдов (✉),
к. т. н. В. В. Потапов, Л. А. Семериков, Е. А. Васильев

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

УДК 622.77.091: 622.567.6

КЛАССИФИКАЦИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ УДАРЕ О РАЗДЕЛИТЕЛЬНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Приведено основное уравнение динамики, характеризующее поведение частиц при ударе о разделительную поверхность. Представлены результаты расчета угла и скорости отражения, времени и абсциссы падения после удара частиц некоторых материалов (угольных сланцев, асбеста).

Ключевые слова: методика, фрикционные характеристики, дифференциальные уравнения, графические зависимости.

В последние годы в практике разработки конструкций строительных и горных машин для разделения и классификации руд используют различие в трении и упругости минералов. Машины этого принципа действия применяют в основном для разделения неметаллических полезных ископаемых, таких как доломит, гранит, асбест, слюда, а также могут быть использованы для очищения глин от твердых включений при производстве огнеупоров и керамики [1–6].

Основной недостаток существующих машин, основанных на эффектах взаимодействия горной массы с рабочей поверхностью аппаратов, — разделение горных пород не по комплексу физико-механических свойств, а по одному наиболее контрастному признаку: трению, упругости, форме или твердости. Внедрение новых аппаратов

по одному признаку разделения лишь частично обеспечивает возможности качественного разделения горных пород.

Наиболее перспективным направлением в совершенствовании и проектировании разделительных аппаратов является создание конструкций, в которых при разделении учитывается комплекс физико-механических свойств горных пород, что обеспечивает более полное разделение полезных ископаемых в одном аппарате.

Физико-механические характеристики пород в литературе представлены в основном одним статическим коэффициентом трения, а сведения об упругих свойствах минералов практически отсутствуют. В разных источниках одни те же минералы имеют разные значения коэффициентов: трения, восстановления и мгновенного трения при ударе, формы и твердости. В настоящей статье рассмотрено поведение частиц при ударе о наклонную поверхность.

При ударе частицы об упругую шероховатую плоскость происходит изменение величины и направления скорости частицы из-за ударного и фрикционного воздействия. Частицы с разными



С. Я. Давыдов
E-mail: davidovtrans@mail.ru

коэффициентами трения и восстановления при ударе имеют различные величины и направления скорости после удара, поэтому коэффициенты восстановления при ударе и трения могут служить разделительными признаками [1].

На рис. 1 изображена схема взаимодействия частицы с наклонной плоскостью при ударе. Если частицы падают на наклонную плоскость вертикально, то угол α падения частицы (с нормалью к плоскости) равен углу наклона плоскости. Основное уравнение динамики при ударе [2] записываем в проекциях на касательную τ и нормаль n :

$$\begin{cases} mU \sin\beta - mV \sin\alpha = -S_{\tau}, \\ mU \cos\beta + mV \cos\alpha = -S_n, \end{cases} \quad (1)$$

где β — угол отражения, град.

При этом, согласно гипотезе Пауса [2]:

$$S_{\tau} = fS_n, \quad (2)$$

где f — коэффициент трения при ударе.

Кроме того, из определения коэффициента восстановления при ударе k [2] следует, что

$$U \cos\beta = kV \cos\alpha. \quad (3)$$

Решая систему уравнений (1)–(3), получим

$$\beta = \arctg\left[\frac{1}{k}(\tg\alpha - f) - f\right], \quad (4)$$

$$U = \frac{kV \cos\alpha}{\cos\beta}.$$

Дальнейшее движение частицы после отражения, пренебрегая сопротивлением воздуха, полагаем свободным падением. В системе координат xy (см. рис. 1) уравнения свободного падения имеют вид

$$\begin{cases} x = Ut_n \sin(\alpha + \beta), \\ y = \frac{1}{2} gt_n^2 - Ut_n \cos(\alpha + \beta), \end{cases} \quad (5)$$

где t_n — время падения частицы после удара, с.

Частица упадет на горизонтальную плоскость при $y = h$, поэтому для определения времени падения имеем квадратное уравнение

$$\frac{1}{2} gt_n^2 - Ut_n \cos(\alpha + \beta) - h = 0, \quad (6)$$

где h — расстояние до горизонтальной плоскости, м.

Откуда

$$t_n = \frac{U \cos(\alpha + \beta) + \sqrt{U^2 \cos^2(\alpha + \beta) + 2gh}}{g}. \quad (7)$$

Подставляя время падения в первое уравнение системы (5), получим дальность полета частицы в виде

$$x_{\max} = Ut_n \sin(\alpha + \beta). \quad (8)$$

В работе [3] приведены некоторые значения коэффициентов восстановления k_n и трения f_n , полученные экспериментально. В частности, для из-

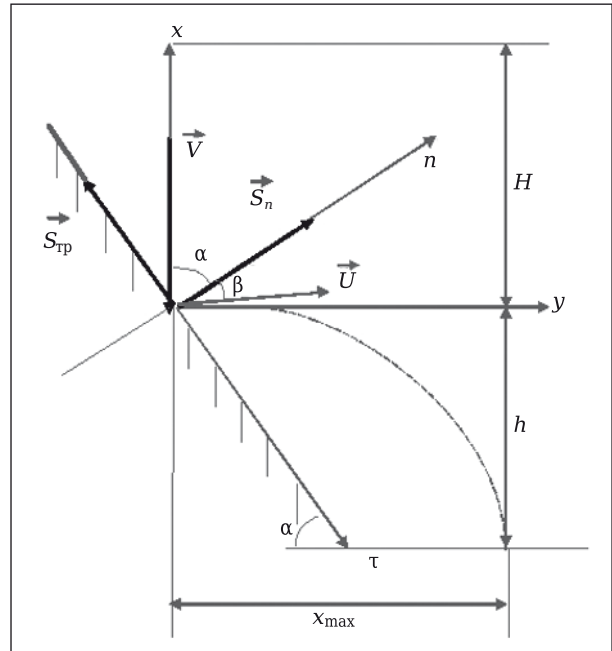


Рис. 1. Схема удара частицы о наклонную плоскость: V и U — скорости частицы перед ударом и после удара; S_n и S_{τ} — импульсы нормальной реакции и трения

верженных пород $k_n = 0,52$, $f_n = 0,16$, а для сланцев $k_c = 0,32$, $f_c = 0,27$. Произведем вычисления по формулам (4), (5), (7), (8) для данных значений коэффициентов (см. таблицу). Для сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными используем представленные в выборке [3, с. 27] значения: высота, с которой бросают частицы, $H = 0,5$ м, угол наклона разделительной плоскости $\alpha = 35^\circ$. Получим в обоих случаях $V = \sqrt{2gH} = 3,13$ м/с. В результате расчетов установлено, что разница между абсциссами точек падения изверженных пород и сланцев составит 0,19 м.

Как показывают экспериментальные исследования [4], фактический разброс агрегатов волокон асбестовых горных пород на плоскости падения значительно больше. 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 частиц породы, имеющих округлую форму, относительное среднеквадратичное отклонение дальности их отражения при углах наклона плоскости $20\text{--}30^\circ$, как правило, составляет 30–40 %.

Результаты расчета угла, скорости, времени и абсциссы падения частицы после удара

Сырье	Угол отражения β , град	Скорость отражения U , м/с	Время падения t_n , с	Абсцисса падения $x_{\max}$, м
Изверженные породы	41,3	1,77	0,29	0,50
Сланцы	47,1	1,20	0,26	0,31

Упругие свойства вмещающей породы, которые можно оценивать величиной отскока $\chi_{\max}$ частицы от плиты, в незначительной мере зависят от крупности частиц. Для интервала крупности $d = 35 \div 63$ мм зависимость между ними аппроксимируется уравнением $\chi_{\max} = 44 + 83,2 / d$ с корреляционным отношением 0,864 (рис. 2).

Как для породных частиц, так и для нераспущенного асбестового волокна эффект взаимодействия с поверхностью разделения зависит от высоты подачи продукта и угла наклона поверхности к горизонту (рис. 3).

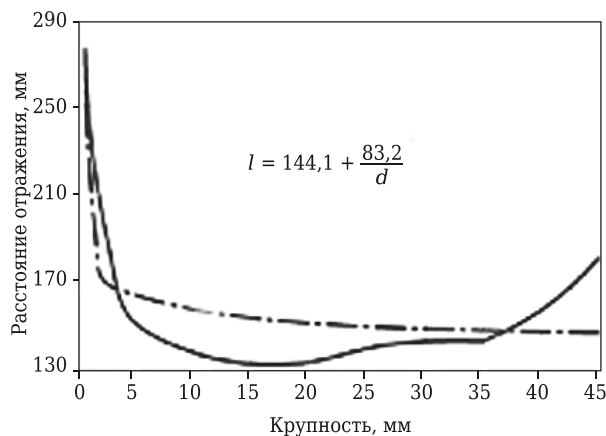


Рис. 2. Зависимость расстояния отражения частиц породы от их крупности после взаимодействия с наклонной плоскостью: — экспериментальная кривая; --- расчетная кривая

Библиографический список

1. **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.
2. **Вебер, Г. Э.** Дополнительные главы механики для горных инженеров / Г. Э. Вебер, С. А. Ляпцев. — Свердловск : УрГУ, 1989. — 199 с.
3. **Ляпцев, С. А.** Аппараты для разделения горных пород по упруго-фрикционным свойствам / С. А. Ляпцев, В. Я. Потапов, А. И. Афанасьев. — Саарбрюкен : LAPLAMBERT Academic Publishing, 2014. — 90 с.
4. **Потапов, В. Я.** Совершенствование конструкции сепаратора с неподвижной разделительной поверхностью / В. Я. Потапов, П. И. Радаев // Материалы Уральской горнопромышленной декады. — Екатеринбург : УГГУ-УПИ, 3–13 апреля 2011. — С. 365–366.

В ходе экспериментов уточнены физические характеристики частиц асбестовых и углеродсодержащих формаций, в частности значения коэффициентов трения при ударе, характеризующих относительное снижение проекции скорости частиц на плоскость удара.

Результаты экспериментальных исследований подтвердили теоретические закономерности, описанные выше. Это позволяет при наличии минерального состава руды проводить оптимизацию процесса разделения на разделительной плоскости [5, 6].

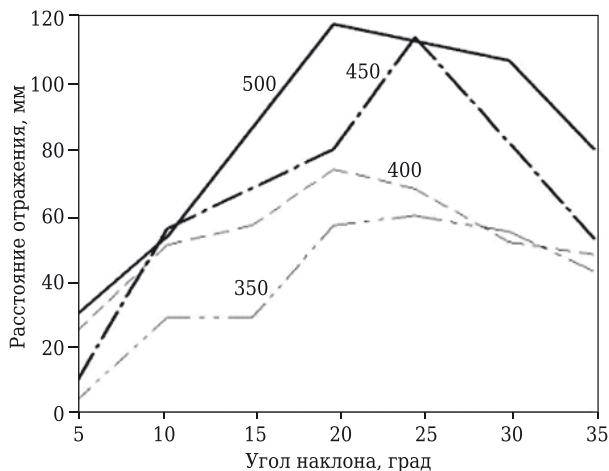


Рис. 3. Зависимость расстояния отражения частиц породы крупностью $-35 \div 20$ мм при различных высотах подачи и угла наклона плоскости. Высота подачи указана на кривых, мм

5. **Потапов, В. Я.** Выделение твердых включений из глинистого сырья по трению и упругости / В. Я. Потапов, С. Я. Давыдов, В. В. Потапов // Новые огнеупоры. — 2013. — № 8. — С. 10–12.
- Potapov, V. Ya.** Separation of solid inclusions from clay stock on the basis of friction and elasticity / V. Ya. Potapov, S. Ya. Davydov, V. V. Potapov // Refractories and Industrial Ceramics. — 2013. — Vol. 54, № 4. — P. 278–280.
6. **Потапов, В. Я.** Использование фрикционных сепараторов для выделения твердых включений из глиноземов / В. Я. Потапов, С. Я. Давыдов, В. В. Потапов // Новые огнеупоры. — 2013. — № 3. — С. 5. ■

Получено 04.07.14

© С. А. Ляпцев, В. Я. Потапов,
С. Я. Давыдов, В. В. Потапов, Л. А. Семериков,
Е. А. Васильев, 2014 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



第九届先进陶瓷国际研讨会

The Ninth International Conference on High-Performance Ceramics

9-я Международная конференция по высокотехнологичной керамике (CICC)

4-7 ноября 2015 г.

г. Гуйлинь, Китай

www.ccs-cicc.com/CICC-9