

УДК 622.232

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ ДЛЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Ляпцев С.А., Потапов В.Я.

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

В статье дано описание экспериментальной установки, позволяющей определять триботехнические характеристики кусков горной породы. На основании теоретических исследований сформулирован принцип работы установки. Методами механики дано обоснование методики определения коэффициентов трения качения. Предложена последовательность проведения экспериментальных исследований. Разработана методика обработки полученных результатов. В статье приведены также результаты опробования разработанных методов. Экспериментально определены коэффициенты трения качения угольных формаций и асбестосодержащих продуктов для стальной и резиновой поверхностей. Статистическими методами получены уравнения взаимосвязи найденных коэффициентов с размерами частиц горной породы.

Ключевые слова: методика, трибометр, уравнения и коэффициенты трения качения частиц

SUBSTANTIATION OF METHODS FOR EXPERIMENTAL DETERMINING THE ROLLING FRICTION COEFFICIENT OF ROCK FRAGMENTS

Lyaptsev S.A., Potapov V.Y.

The state educational institution of higher professional education «Ural state mining university»,
Ekaterinburg, e-mail: gmf.tm@ursmu.ru

The article describes the experimental installation, allowing to define the tribological characteristics of rock fragments. The principle of work of installation is formulated on the theoretical researches basis. Mechanics methods give a substantiation of a rolling friction factors definition technique. The sequence of experimental researches carrying out is offered. The technique of the received results processing is developed. In article results of the developed methods approbation are resulted also. Rolling friction factors of the coal formations and the products containing asbestos are experimentally defined for steel and rubber surfaces. Statistical methods receive the equations of the found factors with the sizes of the rock particles interrelation.

Keywords: method, the tribometer, equation and coefficient of rolling friction of the particles

Разделение горной массы основывается на физических свойствах слагающих ее минералов. Одним из них, широко используемым в различных аппаратах, является трение. С точки зрения рассмотрения коэффициентов трения как признака разделения, наибольший интерес представляет кинетический коэффициент трения и приведенный коэффициент трения качения, учитывающий вращение куска при контакте с поверхностью, так как разделение частиц в основном идет в движении. Согласно теории и практике частицы минералов перемещаются по наклонной плоскости не только

со скольжением, но и с качением, что, несомненно, влияет на эффективность процесса разделения. В зависимости от угла наклона этой плоскости возможны различные режимы движения: чистое скольжение, качение без проскальзывания, качение со скольжением [1]. **Целью данной работы** является определение коэффициента трения качения частицы горной массы по разделительной поверхности.

Методика определения приведенного коэффициента трения перекачиваемой частицы получена из условия ее опрокидывания вокруг границы площадки контакта.

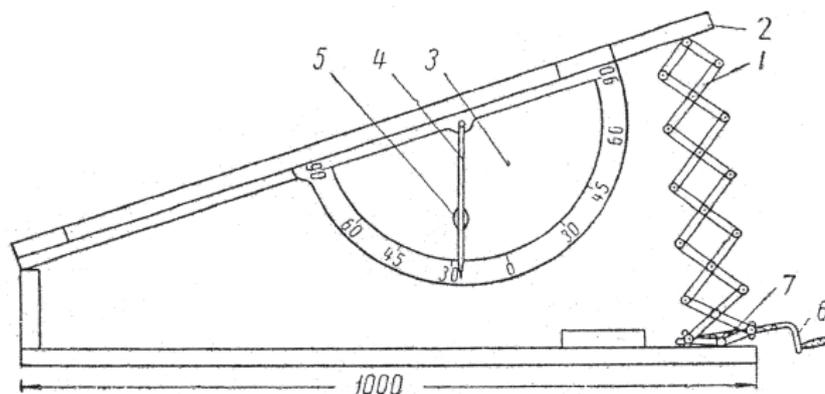


Рис. 1. Вид экспериментальной установки

Для определения коэффициента трения скольжения обычно используется установка (трибометр), представленная на рис. 1 [2]. К штативу 1 шарнирно прикреплена плоскость 2, на которой установлен транспортер 3. К сектору транспортера подвешена стрелка с отвесом 5. Изменения угла наклона плоскости 2 осуществляли с помощью рукоятки 6 и червячной передачи 7.

Точно такую же установку можно использовать и для определения приведенного коэффициента трения. Методика проведения опыта: вначале определяются форма и размеры частицы минерала, а на плоскости с переменным углом наклона размещаются сменные поверхности (сталь или резина), для которых необходимо определить фрикционные характеристики. После этого образцы исследуемых материалов помещаются на плоскость.

В процессе опыта уделялось внимание виду движения образца, фиксировались угол и время прохождения участка со скольжением. Дальнейшее увеличение угла наклона плоскости осуществлялось для перевода ее в режим качения, при этом также фиксировался завышенный угол подъема плоскости.

Коэффициент трения качения δ определяется по углу наклона β , который составляет подвижная плоскость в момент начала качения (при отсутствии проскальзывания). На рис. 2 изображены силы, действующие на частицу при ее перекатывании по наклонной плоскости: G – сила тяжести; N – нормальная составляющая реакции поверхности; $F_{\text{сц}}$ – сила сцепления, являющаяся касательной составляющей реакции. Качение начинается в тот момент времени, когда линия действия силы тяжести G выйдет за пределы границы площадки контакта частицы с наклонной плоскостью (появляется опрокидывающий момент вокруг границы площадки контакта). Предельное значение угла наклона плоскости β , при котором линия действия силы G точно попадает на границу площадки контакта, как раз и соответствует величине δ .

Как известно [3], причиной возникновения трения качения является деформация катящегося объекта и поверхности, по которой происходит качение. Момент трения качения $M_{\text{тр}}$ определяется как момент нормальной реакции N относительно точки D пересечения нормали к поверхности качения, проведенной через центр масс частицы:

$$M_{\text{тр}} = \delta \cdot N, \quad (1)$$

где $N = G \cdot \cos \beta$ – величина нормальной реакции. Сила тяжести при этом создает отно-

сительно той же точки момент, по величине равный:

$$M_D = G \cdot R \cdot \sin \beta, \quad (2)$$

где R – средний радиус частицы. Таким образом, в предельном случае (для момента начала качения) $G \cdot R \cdot \sin \beta = \delta \cdot G \cdot \cos \beta$ и, следовательно,

$$\delta = R \cdot \operatorname{tg} \beta. \quad (3)$$

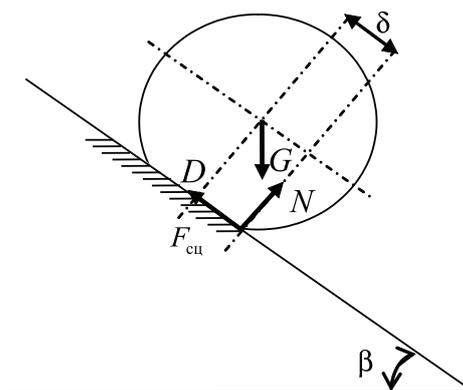


Рис. 2. Силы, действующие на частицу

При движении катящейся без скольжения частицы ускорение ее центра можно определить по теореме об изменении кинетической энергии и [3]:

$$\frac{dT}{dt} = \sum W,$$

где T – кинетическая энергия частицы,

$$T = \frac{1}{2} m V_C^2 + \frac{1}{2} J_C \omega^2,$$

где $J_C = \frac{2}{5} m R^2$ – момент инерции шарообразной частицы массой m ; V_C – скорость ее центра масс; ω – угловая скорость; $\sum W$ – сумма мощностей сил, приложенных к частице,

$$\begin{aligned} \sum W &= G V_C \sin \beta - M_{\text{тр}} \omega = \\ &= mg \cdot \left(\sin \beta - \frac{\delta}{R} \cos \beta \right) \cdot V_C. \end{aligned}$$

После подстановки указанных значений получаем

$$a_C = \frac{5}{7} g \cdot \left(\sin \beta - \frac{\delta}{R} \cos \beta \right). \quad (4)$$

Считая качение частицы по наклонной плоскости равнопеременным, величину δ при движении можно определить по длине L

пройденного ею за время t пути: $L = 0,5 g t^2$.
Отсюда с учетом выражения (4) получим

$$\delta = \left(\operatorname{tg} \beta - \frac{2,8L}{gt^2 \cos \beta} \right). \quad (5)$$

В соответствии с представленными зависимостями 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. Данная закономерность прослеживается для различных горных пород и поверхностей качения.

Уравнения взаимосвязи указанных параметров установлены методами регрессионного анализа. Выбор аналитической аппроксимационной функции осуществлен из заданного класса типовых зависимостей (линейных, степенных и т.п.) по величине

наименьшей остаточной дисперсии. Результаты экспериментальных исследований качения угольных формаций и их интерпретации представлены на рис. 3. Аналитическая аппроксимация показывает, что коэффициент трения качения связан с крупностью перемещающихся угольных кусков прямой пропорциональной зависимостью

$$\delta \approx k_M d - b,$$

где k_M – безразмерный коэффициент линейной пропорциональности; d – диаметр куска, мм; b – величина вертикального смещения графика, см. Для исследованных случаев $k_M = 2,23 \cdot 10^{-4}$, $b = 1,42 \cdot 10^{-4}$ при качении угля по резине с коэффициентом корреляции $R^2 = 0,86$ и $k_M = 2,05 \cdot 10^{-4}$, $b = 2,96 \cdot 10^{-4}$ для стальной поверхности качения с коэффициентом корреляции при этом $R^2 = 0,91$. Высокий коэффициент корреляции свидетельствует об устойчивой взаимосвязи между параметрами, установленными экспериментально, и прямо пропорциональной аналитической зависимостью.

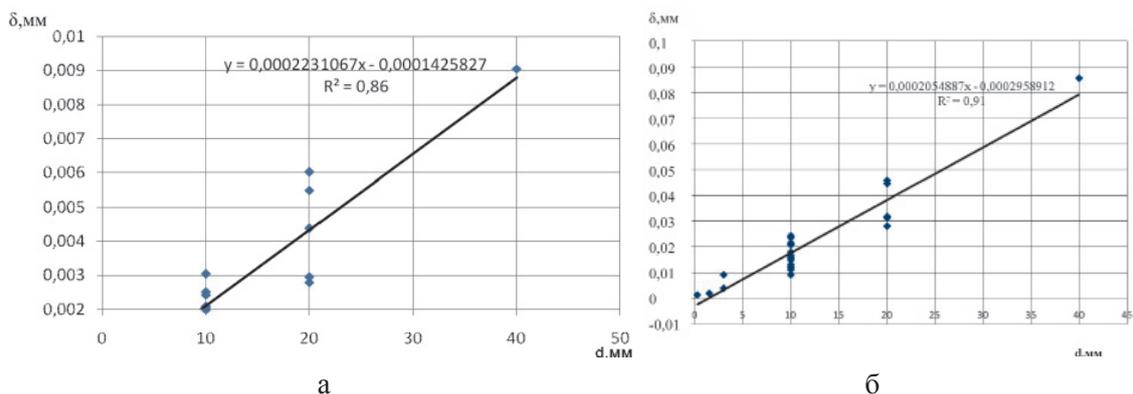


Рис. 3. Зависимость приведенного коэффициента трения качения от крупности для угольных формаций:
а – резина; б – сталь

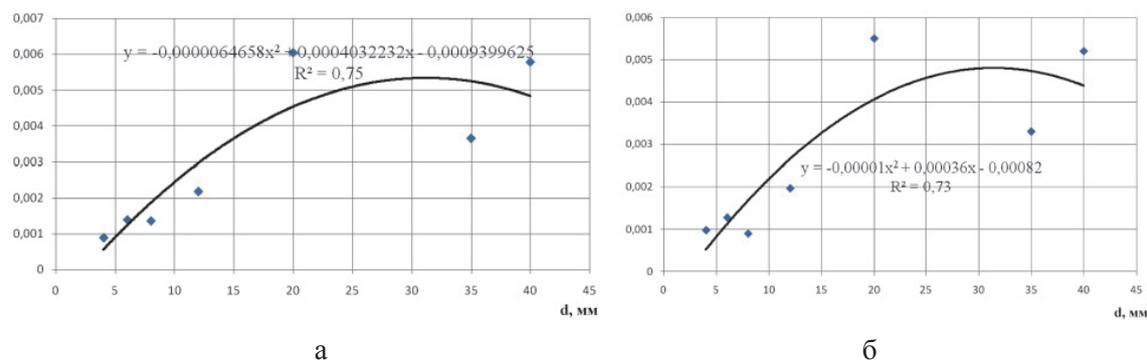


Рис. 4. Зависимость приведенного коэффициента трения качения от крупности для асбестосодержащих продуктов:
а – резина; б – сталь

Приведенная методика была апробирована также на асбестосодержащих рудах (рис. 4). Для асбестосодержащих продуктов (см. рис. 4) аналитические зависимости описываются квадратичными функциями вида

$$\delta \approx a \cdot d^2 + b \cdot d + c.$$

Значения коэффициентов функции приведены на рисунке. Соответствующие коэффициенты корреляции для резины $R^2 = 0,75$ и для стальной поверхности $R^2 = 0,73$, что также свидетельствует о тесноте связи между аналитическими и экспериментальными кривыми. Различие в коэффициентах трения качения ценного продукта и породы по стали и резине достаточны для их разделения. С уменьшением крупности разница в коэффициентах трения частиц монофаз снижается. Это можно объяснить тем, что с уменьшением крупности частиц они становятся однородными по составу и форме и, как следствие этого, разница в коэффициентах трения становится незначительной.

Таким образом, представленные результаты исследования могут послужить основой для проектирования нового оборудования по разделению фрикционным методом. Полученные зависимости использованы при моделировании процесса разделения частиц, необходимого для разработки конструкции барабанно-полочного фрикционного сепаратора и [4].

Список литературы

1. Теоретический анализ движения и удара частицы обогащаемого материала о наклонную плоскость / В.Я. Потапов, С.А. Ляпцев и др. // Известия вузов. Горный журнал. – 2006. – № 6. – С. 93–98.
2. Иванов П.А. Коэффициент трения покоя и движения угля и породы (на примере Кизеловского бассейна) // Известия вузов. Горный журнал. – 1964. – № 3. – С. 126–128.
3. Никитин Н.Н. Курс теоретической механики. – М.: Наука, 1990. – С. 324.
4. Математическое моделирование разделения частиц в барабанно-полочном фрикционном сепараторе / С.А. Ляпцев, Е.Ф. Цыпин, В.Я. Потапов, В.В. Иванов // Известия вузов. Горный журнал. – 1996, № 7. – С. 147–150.

Рецензенты:

Ошкордин О.В., д.т.н., профессор, проректор по связям с общественностью и международным отношениям Уральского государственного экономического университета Министерства образования и науки РФ, 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», г. Екатеринбург;

Бабаев Н.Х., д.т.н., профессор, генеральный директор НПФ «SAMOYINUR Co Ltd», г. Бекабад.

Работа поступила в редакцию 17.06.2011.