

А. АХМАТОВ

**НАКЛОННЫЙ МАЯТНИК И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ
К ИССЛЕДОВАНИЮ МОЛЕКУЛЯРНОГО МЕХАНИЗМА ВНЕШНЕГО
ТРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

[(Представлено академиком А. Ф. Иоффе 11 VII 1939)]

Молекулярная теория внешнего трения твердых тел в случае чистых поверхностей и в условиях граничной смазки находится еще в начальных фазах своего развития.

В настоящем предварительном сообщении у нас нет возможности войти в рассмотрение литературы⁽¹⁾. Достаточно будет указать, что положение вопроса настоятельно требует дальнейших исследований.

В настоящем сообщении кратко описан новый метод исследования явлений трения и граничной смазки, позволяющий получить как некоторый статистический результат непосредственно из регистрации затухания гармонических колебаний ряд величин, характеризующих эти процессы.

Ниже описаны также некоторые из результатов, полученных нами с помощью упомянутого метода.

1. **Н а к л о н н ы й м а я т н и к.** Предлагаемый нами новый прибор представляет собой сочетание наклонной плоскости с математическим маятником (реализованным в виде небольшого металлического шара, подвешенного на тонкой нити). Испытуемой фрикционной парой в этом случае являются шар и плоскость.

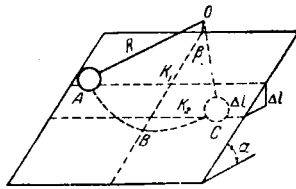
Очевидно, что шар, помещенный на поверхность наклонной пластины (фиг. 1) и укрепленный на тонкой шелковой нити (параллельной пластине), будучи отведен из положения равновесия *ОВ* и отпущен, будет совершать затухающие колебания качения. Мы построили такой прибор, названный нами «**н а к л о н н ы м м а я т н и к о м**», и испытали его в различных условиях действия.

Изменением угла наклонной плоскости α может быть удобно изменена нормальная составляющая веса шара N , которая при $\alpha = \text{Const}$ для всех точек траектории шара также остается постоянной. Это обстоятельство позволяет при больших значениях α (близких к $\frac{\pi}{2}$) настолько уменьшить величину N , что возникает возможность исследования трения при очень малых нагрузках, а также и явлений адгезии (при $N=0$); в этих же условиях при замене шара плоским ползуном возможно исследование трения скольжения. Отметим, что прибор кроме того позволяет легко

изменять период колебаний и радиус качения. Наклонный маятник ⁽¹⁾, таким образом, представляет собой, по видимому, наиболее универсальный трибометр из описанных до настоящего времени в литературе.

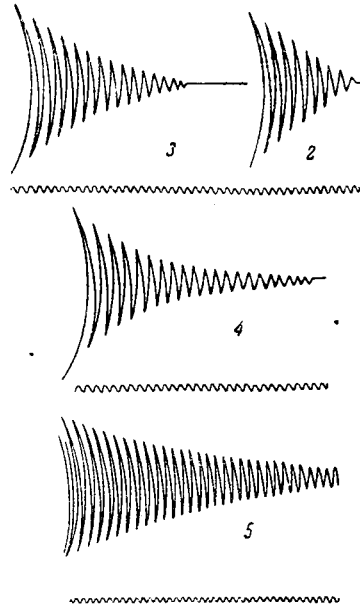
2. Определение коэффициентов трения качения δ и скольжения μ . Для экспериментального определения с помощью наклонного маятника коэффициентов трения, а также для установления вида функциональной связи между трением и скоростью движения (см. ниже), необходима кривая затухания его колебаний.

Мы регистрировали эту кривую фотографически. Возможны при этом различные проекции колебаний на плоскость фотопленки. Ниже мы будем иметь в виду только следующую проекцию: плоскость пленки параллельна



Фиг. 1

Фиг. 2—поверхность полирована и совершенно чиста; фиг. 5—та же поверхность; нанесено (из титрованного раствора) несколько слоев стеариновой кислоты ($C_{18}H_{36}O_2$); фиг. 3 и 4—поверхность тщательно очищена; механическая обработка различная: фиг. 3—фрезерование, фиг. 4—строгание



наклонной плоскости; движение пленки направлено по линии OB (фиг. 1); кривые, полученные в этих условиях, приведены на фиг. 2, 3, 4 и 5.

Очевидно, что затухание гармонических колебаний наклонного маятника, если пренебречь (вследствие их малости) сопротивлением воздуха и потерями энергии, при закручивании тонкой шелковой нити подвеса будет целиком определено внешним трением. В случае его постоянства ($R = \text{Const}$) коэффициенты могут быть найдены особенно просто.

Действительно, потеря маятником потенциальной энергии за n колебаний должна равняться работе трения на пути S , эквивалентном n . За половину периода, например $\frac{T}{2}$, потеря высоты центром тяжести маятника ($x_1 - x_2 = \Delta x$) найдется как проекция на вертикаль разности длин ($l_1 - l_2 = \Delta l$), измеренной на экспериментальной кривой $\Delta x = \Delta l \cdot \sin \alpha$ (фиг. 1).

Коэффициент трения качения δ тогда будет:

$$\delta = r \cdot \text{tg } \alpha \cdot \frac{\Delta l}{S}; \quad (1)$$

⁽¹⁾ Мы начали наши эксперименты с исследования затухания колебаний качения шара на внутренней поверхности металлической сферы; наклонный маятник допускает ряд модификаций конструкции: например в виде сочетания маятника Максвелла (маховик, цилиндр) с наклонной плоскостью.

здесь r — радиус шара, α — угол наклонной плоскости, S — дуга ABC (фиг. 1); Δl и S могут быть найдены из кривой колебаний, Δl при этом — непосредственно, а дуга S — через величину ее проекции ($K_1 + K_2$) и радиус качения (длину) маятника R , так как например, $K_1 = R \cdot \sin \beta$.
Для коэффициента трения скольжения μ соответственно получим:

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{\Delta l}{R \cdot \arcsin \left(\frac{K}{R} \right)}. \quad (2)$$

Найденные нами описанным выше методом величины коэффициента трения хорошо удовлетворяли табличным значениям. Отметим, что в случае очищенных поверхностей коэффициенты трения значительно возрастают; так например, в одном из опытов при качении стали по стали δ оказалась равной 0.032 см (вместо 0.005 см). Несомненно, что причина этого роста коэффициентов трения заключается в уменьшении (при очищении) экранирования поля твердой фазы — в увеличении адгезионных сил (эффект W. Hardy).

3. Установление с помощью наклонного маятника основного закона динамического трения. Аналитическая форма кривой затухания колебаний наклонного маятника должна выражать основной закон динамического трения — силу сопротивления, как функцию скорости, т. е. $R = f(v)$. Очевидно, что вид этой функциональной связи будет изменяться в зависимости от геометрических и физико-химических свойств поверхности тел (адсорбция).

Перечислим кратко возможные случаи. При $R = \text{Const}$ уменьшение амплитуды, как известно, подчиняется закону арифметической прогрессии. При $R = k \left(\frac{dx}{dt} \right)$ имеет место логарифмический закон затухания. Возможны и весьма интересны промежуточные случаи при $R = k_1 \left(\frac{dx}{dt} \right)^\gamma$, где $0 < \gamma < 1$. Не исключена, наконец, возможность пропорциональности сопротивления трения второй степени скорости⁽²⁾: $R = k_2 \left(\frac{dx}{dt} \right)^2$.

4. Влияние шероховатости (характера обработки) поверхности на форму кривой затухания. Прделанные нами опыты привели нас к следующим предварительным результатам. В случае полированной (стальной) поверхности, весьма тщательно очищенной, затухание значительно и подчиняется закону $R = \text{Const}$ (см. кривую 2). При наличии неровностей поверхностей, получаемых при механической их обработке (строгание, фрезерование и т. д.), появляется несомненная зависимость трения от скорости $R = f(v)$ (см. кривые 3, 4). Нами установлен вид этой связи и произведено сопоставление полученных кривых с профилем поверхности.

Мы полагаем, что наклонный маятник в той или иной его модификации может найти и чисто техническое применение для характеристики обработки поверхности твердого тела⁽¹⁾. При этом, вероятно, достаточно будет производить визуальный отсчет изменения амплитуды его качания.

5. О статистике разрывов элементарных контактов, как основании к построению адгезионной теории внешнего трения. При качении, например шара по плоскости, при условии зеркальных, совершенно чистых поверхностей контакт между ними следует принимать практически непрерывным во времени.

⁽¹⁾ По этому вопросу наша лаборатория ведет в настоящее время работу.

Поверхность контакта σ , величину которой согласно теории Герца можно считать равной $\sigma = k \cdot P^{\frac{2}{3}}$ (где P — давление), подвергается с одной стороны непрерывному возобновлению (в направлении движения), а с другой стороны непрерывному разрыву. Сила сопротивления в этих условиях должна оставаться постоянной и не зависящей от скорости (фиг. 2).

В случае шероховатой поверхности работа трения на пути S выразится как сумма элементарных актов касания катящейся сферой гребней и выступов поверхности. Очевидно, что в этом случае сила трения зависит от закона распределения контактов на пути S и во всяком случае является функцией скорости.

6. Влияние смазки. При нанесении на поверхность полированного металла возрастающего числа полярных молекул (жирных кислот) закон затухания колебаний наклонного маятника изменяется (фиг. 5). Проведенные нами опыты привели нас к следующим заключениям. При наличии немногих молекулярных рядов в адсорбционном покрытии металла в силу гетерогенности поверхности твердого тела эффект экранирования не равноценен для различных участков поверхности — имеет место прерывистое контактирование.

По мере увеличения толщины смазывающего слоя все больше сказывается скольжение элементарных пластин смазывающего слоя. В другом исследовании⁽³⁾, в настоящее время законченном, мы пришли к заключению, что как при свободной диффузии молекул адсорбционного слоя, так и в условиях вынужденного их движения при трении имеет место упомянутое выше смещение молекулярных рядов ориентированных молекул.

На основании измерений скачка межфазного (электрического) потенциала мы пришли к заключению, что CH_3 — поверхность моно-тримолекулярного слоя, наиболее прочно фиксированная, является «главной» плоскостью скольжения; вдоль нее по преимуществу идет перемещение как непрерывным потоком, так и отдельными участками (различной толщины) смазывающего покрытия.

Произведенные нами с помощью наклонного маятника предварительные опыты также подтверждают эту точку зрения. В случае толстого слоя смазки выполняется уравнение ламинарного потока Ньютона.

Станко-инструментальный институт
Москва

Поступило
17 VII 1939

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Marcel Brillouin, Ann. Chim. Phys., Série 7, t. XVI, P. 433 (1899); W. B. Hardy a. I. Doubleday, Proc. Roy. Soc., A, C, p. 550 (1922); W. B. Hardy, Theorie of Lubrication, London (1922); K. Terzaghi, Erdbaumechanik, Wien, S. 50 (1925); Paul W o o g, Contribution a l'étude du graissage, Paris, p. 204 (1926); G. Tomlinson, Philos. Mag. 7, 905 (1929). Б. Дерягин, Z. f. Physik, Bd. 88, S. 661 (1934). ² W. Hort, Technische Schwingungslehre, S. 44 (1922). ³ А. А х м а т о в, Acta physicochim. URSS, Vol. VIII, № 3, p. 373 (1938).