

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СИЛЫ СУХОГО ТРЕНИЯ (ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ)

Цель работы: определить коэффициенты трения качения для различных пар материалов.

Приборы и оборудование: установка с двумя сменными маятниками, секундомер.

Теория метода и описание установки

Трение качения обусловлено взаимной деформацией тел, которая несимметрична относительно катящегося тела (цилиндра, колеса), поэтому реакция опоры (почвы, рельсов) несколько смещена по направлению движения цилиндра и не проходит через его ось. Это приводит к появлению момента реакции опоры относительно оси вращения – момента M силы трения качения:

$$M = k_0 N, \quad (1)$$

где N – нормальная составляющая реакции опоры, равная при горизонтальной опоре весу цилиндра; k_0 – коэффициент трения качения, имеющий размерность длины и численно равный плечу силы N . Элементарная работа силы трения определяется выражением:

$$dA = M d\alpha,$$

где α – угол поворота.

В технике обычно пользуются величиной силы трения равной по модулю силе F необходимой для перекачивания колеса и приложенной к его оси:

$$F = k \frac{P}{R}, \quad (1')$$

где R – радиус колеса (рис. 1); P – сила тяжести. При движении по горизонтальной поверхности можно принять $N=P$.

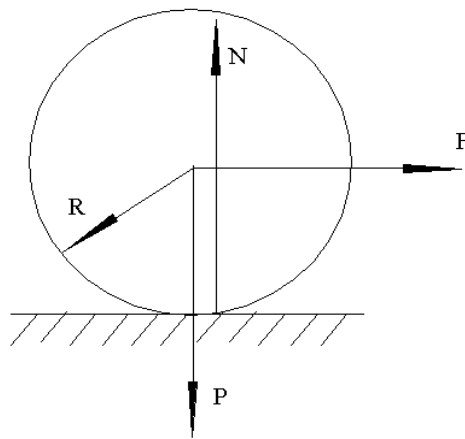


Рис. 1

Теоретическое рассмотрение процесса качения с учетом характеристик материала тел, скорости их движения, деформации тела и поверхности по которой оно движется, приводит к сложным выражениям для величины этой силы. Уравнения (1) и (1') следует рассматривать как первые приближения, удобные для определения искомой величины в каком-либо конкретном случае.

В лабораторной установке применяется стальной цилиндр (1) (рис. 2), находящийся на плоской стальной плите (2). Под цилиндр можно подкладывать плоские пластины из различных материалов, что позволит определять коэффициенты трения качения для различных пар материалов и сравнивать их между собой.

С цилиндром жестко связан стержень, проходящий вниз через отверстие в плите. Верхний конец этого стержня выполнен в виде стрелки (3), а на нижнем его конце закреплен груз (4). Подвижная часть установки фактически является маятником, который может совершать затухающие колебания и имеет центр масс, расположенный на оси стержня и смещенный относительно оси цилиндра в сторону груза.

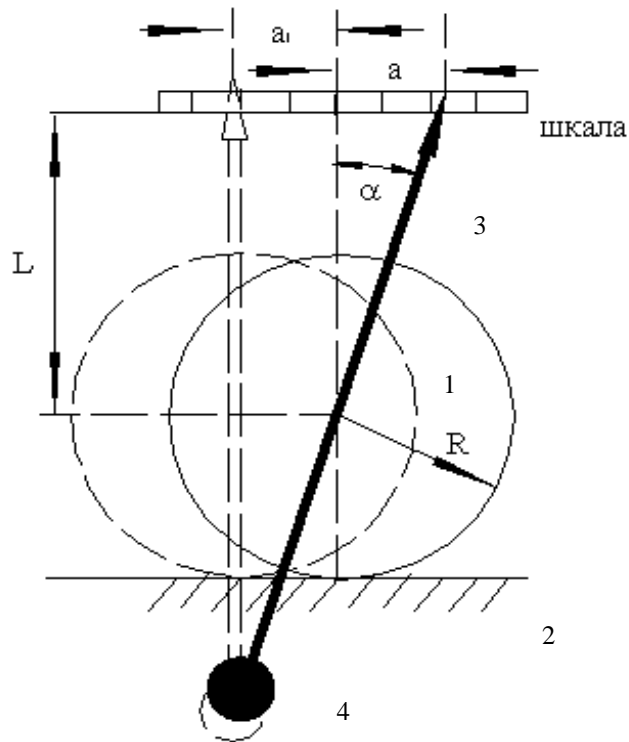


Рис. 2.

При повороте стрелки цилиндр по поверхности опоры, его ось движется поступательно, а центр масс конструкции поднимается. Отклонение стрелки по шкале будет суммой двух отклонений:

$$a_1 = R \operatorname{tg} \alpha, \quad (2)$$

$$a = L \operatorname{tg} \alpha, \quad (3)$$

где a_1 – горизонтальное смещение оси цилиндра, R – радиус цилиндра, a – отклонение стрелки, связанное с вращением цилиндра, L – расстояние от оси цилиндра до шкалы.

Суммарное смещение стрелки вдоль шкалы:

$$S = a + a_1 = a \left(1 + \frac{a_1}{a} \right) = a \left(1 + \frac{R \operatorname{tg} \alpha}{L \operatorname{tg} \alpha} \right) = a \left(1 + \frac{R}{L} \right) \quad (4)$$

при $R \ll L$ можно пренебречь величиной $\frac{R}{L}$ и считать

$$S = a = L \operatorname{tg} \alpha. \quad (5)$$

Если угол α мал, то $\operatorname{tg}\alpha \approx \alpha$ и можно записать, соответственно, угол отклонения в начальный момент времени и после n полных периодов колебаний в следующем виде:

$$\alpha_0 = \frac{S_0}{L} \quad \text{и} \quad \alpha_n = \frac{S_n}{L}. \quad (6)$$

Уменьшение угла отклонения за известное число периодов колебаний маятника дает возможность вычислить коэффициент трения качения.

Выведем формулу для расчета коэффициента трения качения, считая его не зависящим от скорости движения маятника. Воспользуемся для этого законом сохранения энергии. При начальном отклонении маятника

$$E_0 = Ph_0 = Pl(1 - \cos \alpha_0), \quad (7)$$

где P – вес, h_0 – перемещение по вертикали точки центра тяжести маятника, l – расстояние между точкой центра тяжести и осью маятника.

Через один полный период колебаний маятника аналогично получим

$$E_1 = Pl(1 - \cos \alpha_1), \quad (8)$$

где α_1 – угол отклонения маятника через один полный период колебаний.

Уменьшение потенциальной энергии будет

$$\Delta E = Pl(\cos \alpha_1 - \cos \alpha_0) = -2Pl \left(\sin \frac{\alpha_1 + \alpha_0}{2} \cdot \sin \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{2} \right), \quad (9)$$

следовательно,

$$\Delta E = 0,5Pl(\alpha_0^2 - \alpha_1^2). \quad (10)$$

Это уменьшение энергии вызвано работой против сил трения качения.

За полный период колебаний маятника работа может быть записана так:

$$\Delta A = Pk(\alpha_0 + \alpha'_0 + \alpha'_0 + \alpha_1), \quad (11)$$

где k – коэффициент трения качения; α'_0 – угол отклонения после одного полупериода. Исключим из уравнения (11) угол α'_0 . Пусть $\Delta\alpha$ – уменьшение угла отклонения за один полупериод. Тогда можно записать:

$$\alpha'_0 = \alpha_0 - \Delta\alpha = \alpha_1 + \Delta\alpha. \quad (12)$$

Из уравнений (11) и (12) найдем

$$\Delta A = 2Pk(\alpha_0 + \alpha_0 - \Delta\alpha + \alpha_1 + \Delta\alpha + \alpha_1) = 2Pk(\alpha_0 + \alpha_1). \quad (13)$$

Приравнивая (13) и (10), получим:

$$k = \frac{1}{4}l(\alpha_0 - \alpha_1), \quad (14)$$

где для n – колебаний правую часть формулы (14) можно представить как:

$$\frac{1}{4}l(\alpha_0 - \alpha_n) = \frac{1}{4}l(\alpha_0 - \alpha_1 + \alpha_1 - \alpha_2 + \dots + \alpha_{n-1} - \alpha_n) = nk,$$

откуда

$$k = \frac{1}{4}l(\alpha_0 - \alpha_n) \frac{1}{n} \quad (15)$$

С учетом формулы (6), окончательно получим выражение для вычисления коэффициента трения качения.

$$k = \frac{1}{4} \frac{l}{n} \frac{S_0 - S_n}{L}. \quad (16)$$

Порядок выполнения работы

1. Установить начальное отклонение маятника $S_0 = 2,5$ см.
2. Отпустить маятник и сосчитать число полных колебаний n до тех пор, пока конечное отклонение маятника не станет равным $S_n = 1$ см.
3. П.п. 1 и 2 повторить не менее 3 раз.
4. Пользуясь средним арифметическим значением полученных величин, по формуле (16) вычислить коэффициент трения качения. Значения L (расстояние от оси цилиндра до шкалы) и l (расстояние между центром тяжести и осью маятника) даны в описании работы. ($L = 0,13$ м, $l = 0,03$ м).
5. Повторить п.п. 1 – 4 для всех пар имеющихся материалов.
6. Заполнить табл. 1.1 для одного маятника и табл. 1.2 для другого.
7. Найти абсолютную и относительную погрешности измерений.
8. Полученные значения коэффициентов трения качения для различных пар материалов сравнить между собой.

Дано: $L = 0,13$ м, $l = 0,03$ м.

Таблица 1.1

№ n/n	Алюминий		Резина		Стеклотекстолит	
	n	k_1 , м	n	k_2 , м	n	k_3 , м
1						
2						
3						
ср.						

Результаты:

$$k_1 = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$k_2 = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$k_3 = \underline{\hspace{2cm}}$$

Таблица 1.2

№ n/n	Алюминий		Резина		Стеклотекстолит	
	n	k_1 , М	n	k_2 , М	n	k_3 , М
1						
2						
3						
ср.						

Результаты:

$$k_1 = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$k_2 = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$k_3 = \underline{\hspace{2cm}}$$

Определения и формулы: трение, внутреннее трение, внешнее трение, сухое трение, жидкое (или вязкое) трение, сила трения, сила трения покоя, сила трения скольжения, сила трения качения, потенциальная и кинетическая энергии, закон сохранения энергии.

Контрольные вопросы

1. Что такое трение? Что такое сила трения?
2. Объясните механизм возникновения сил трения.
3. Запишите формулы, определяющие силу трения качения и силу трения скольжения.
4. От чего зависит коэффициент трения скольжения? коэффициент трения качения?
5. В чем отличие коэффициента трения качения от коэффициента трения скольжения?
6. Примените закон сохранения механической энергии для описания колебаний маятника.
7. Приведите примеры пользы и вреда силы трения в природе и технике. Как уменьшить силу трения, если это необходимо?