

## Лабораторная работа № 07

### Определение коэффициента трения качения

Цель работы: экспериментальное изучение основных закономерностей, возникающих при трении качения.

#### Методика эксперимента

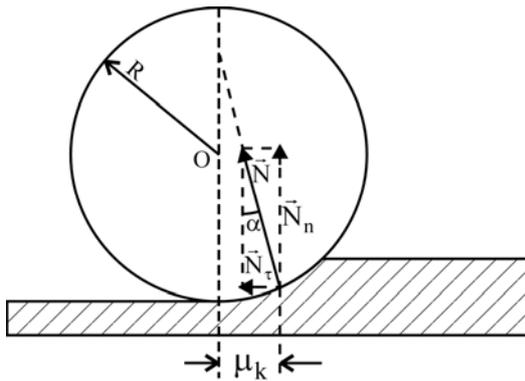


Рис. 1

При качении тела по поверхности другого возникает особая сила – сила трения качения, которая препятствует качению тела. Возникновение этой силы можно объяснить деформациями тел, имеющими место в реальных условиях. При движении цилиндра по плоскости из-за деформации поверхностей сила реакции плоскости

$\vec{N}$  (рис.1) оказывается наклоненной к поверхности качения и не проходит через ось цилиндра. Точка приложения этой силы смещается на расстояние  $\mu_k$  от линии действия силы тяжести. Так как угол наклона силы  $N$  мал, то  $N_n = N \cos \alpha \approx N$ , а  $N_\tau$  направлена почти по касательной к поверхности цилиндра. Касательная составляющая  $N_\tau$  есть как раз та сила, которая препятствует движению цилиндра вперед. Ее называют силой трения качения  $F_{mp}$ . Если цилиндр движется по плоскости равномерно, то

$$F_{mp} \cdot R = N_n \cdot \mu_k, \quad (1)$$

где  $F_{mp} \cdot R$  и  $N_n \cdot \mu_k$  – моменты сил трения и нормальной составляющей силы реакции плоскости относительно точки  $O$ . Так как  $N_n \approx N$ , для силы трения качения получим

$$F_{mp} \approx \mu_k \frac{N}{R}. \quad (2)$$

Величину  $\mu_k$  называют коэффициентом трения качения. Коэффициент трения качения, таким образом, представляет собой плечо силы  $N_n$  и имеет размерность длины. Коэффициент трения качения не зависит от скорости качения и радиуса цилиндра, но зависит от материала, из которого изготовлены взаимодействующие тела, а также от состояния их поверхностей.

## Описание экспериментальной установки

Для исследования процесса трения качения в данной работе используется метод наклонного маятника.

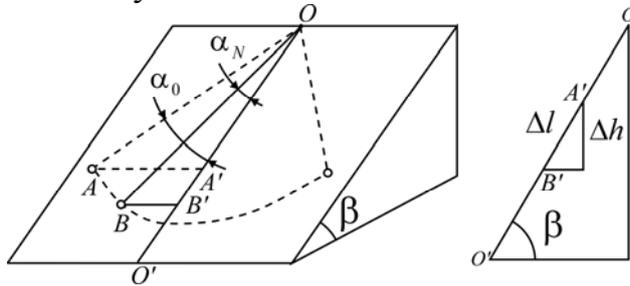


Рис. 2

Шарик, подвешенный на нити, опирается на наклонную плоскость, угол наклона которой  $\beta$  можно менять. Если вывести шарик из положения равновесия и затем отпустить, то он будет совершать колебания, катаясь около положения равновесия. Из-за трения эти колебания

постепенно будут затухать.

Формулу для расчета коэффициента трения можно получить из закона сохранения механической энергии:

$$\Delta W = A_{mp}, \quad (3)$$

где  $\Delta W$  – изменение энергии маятника при совершении  $N$  колебаний;

$A_{mp}$  – работа силы трения качения.

Пусть точка  $A$  – начальное положение шарика. Если бы трения не было, то через  $N$  колебаний маятник оказался бы в точке  $A$ , а угол отклонения был бы равен  $\alpha_0$ . Но из-за трения шар немного не докатится до точки  $A$  и остановится в точке  $B$ . В этой точке угол нити с  $OO'$  будет  $\alpha_N$ . При этом изменение потенциальной энергии между точками  $A$  и  $B$ :

$$\Delta W = mg \cdot \Delta h \quad (4)$$

где  $m$  – масса шарика;

$g$  – ускорение свободного падения;

$\Delta h$  – потеря высоты центром тяжести маятника.

Из рис. 2 имеем:

$$\Delta h = \Delta l \cdot \sin \beta = L(\cos \alpha_N - \cos \alpha_0) \cdot \sin \beta, \quad (5)$$

где  $L$  – длина маятника.

Работа силы трения качения равна

$$A_{mp} = -F_{mp} \cdot S \quad (6)$$

Здесь  $S = N \cdot 4L \langle \alpha \rangle = N \cdot 4L \frac{\alpha_0 + \alpha_N}{2}$  – путь, который проходит центр

тяжести маятника за  $N$  колебаний. Из уравнений (2) – (6) с учетом того, что  $N = mg \cdot \cos \beta$ , получим

$$\mu_k = \operatorname{tg} \beta \cdot R \frac{\cos \alpha_N - \cos \alpha_0}{2N(\alpha_0 + \alpha_N)}. \quad (7)$$

Для коэффициентов трения качения при малых углах колебаний с учетом, что  $\cos \alpha = 1 - 2 \sin^2 \left( \frac{\alpha}{2} \right) \approx 1 - \frac{\alpha^2}{2}$ , имеем

$$\mu_k = \operatorname{tg} \beta \cdot R \frac{\alpha_o - \alpha_N}{4N}, \quad (8)$$

где  $\alpha_o, \alpha_N$  – углы в радианах.

На рис. 3 приведена схема наклонного маятника. Здесь 1 – счетчик числа колебаний; 2 – миллисекундомер; 3 – исследуемый образец; 4 – исследуемый шарик; 5 – шкала углов отклонения  $\alpha$  маятника от положения равновесия; 6 – шкала углов наклона  $\gamma$  маятника.

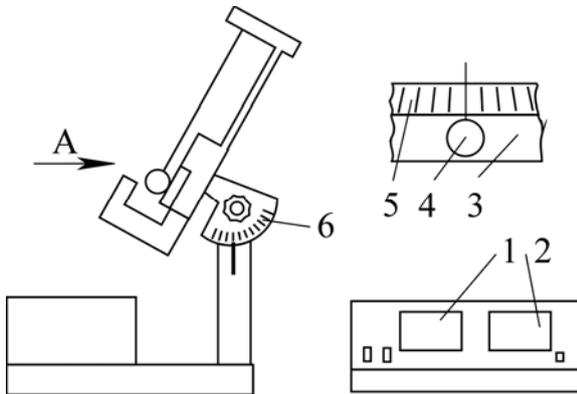


Рис. 3

### Порядок выполнения работы

1. С помощью регулировочных винтов установите заданный угол наклона плоскости маятника  $\beta = 90^\circ - \gamma$ , ( $\gamma$ -показание шкалы 6).
2. Включите секундомер.
3. Отклоните шарик от положения равновесия на угол  $\alpha_o = 8^\circ$ , нажмите клавишу «Сброс» и отпустите шарик без толчка.
4. Когда амплитуда колебания шарика станет равной  $\alpha_N = 2^\circ$ , нажмите клавишу «Стоп».
5. Запишите показания счетчика числа колебаний.

### Задание 1. Определение коэффициента трения качения

1. По указанию преподавателя установите угол наклона плоскости колебаний маятника  $\beta$  ( $30^\circ \div 60^\circ$ ).
2. Проведите 5÷7 измерений числа колебаний маятника и результаты измерений запишите в табл. 1.

Таблица 1

$i$	1	2	3	4	5	6	7
$N$							

Вычислите средние значения

$$\langle N \rangle =$$

$$\text{и } S_{\langle N \rangle} = \sqrt{\frac{\langle N^2 \rangle - \langle N \rangle^2}{n-1}}$$

$$\langle N^2 \rangle =$$

$$S_{\langle N \rangle} =$$

3. По формуле (8) определите среднее значение коэффициента трения качения  $\langle \mu_k \rangle = \text{tg}\beta \cdot R \frac{\alpha_o - \alpha_N}{4\langle N \rangle}$  при  $R = \dots$ , м,  $(\alpha_o - \alpha_N) \cdot \pi / 180^\circ$ , рад.

4. Вычислите среднеквадратичную погрешность  $S_{\langle \mu_k \rangle} = \frac{S_{\langle N \rangle}}{\langle N \rangle} \langle \mu_k \rangle$ .

5. Окончательный результат представьте в виде  $\mu_k = \langle \mu_k \rangle \pm t_{n-1,P} \cdot S_{\langle \mu_k \rangle}$ . Коэффициент Стьюдента  $t_{n-1,P}$  возьмите при  $P=0,9$ .

Задание 2. Определение коэффициента трения качения из зависимости  $N$  от  $\text{tg}\beta$

Представим формулу (8) в виде уравнения прямой линии  $y=A+Bx$ :

$$N = \frac{(\alpha_o - \alpha_N) \cdot R}{4\mu_k} \cdot \text{tg}\beta, \quad (9)$$

где  $y=N$ ;  $x=\text{tg}\beta$ ;  $B = \frac{(\alpha_o - \alpha_N) \cdot R}{4\mu_k}$ . (10)

1. Проведите для  $5 \div 7$  углов наклона маятника  $\beta$  в интервале  $30^\circ \div 60^\circ$  измерения числа колебаний маятника и результаты запишите в табл. 2.

Таблица 2

$i$	1	2	3	4	5	6	7
$\beta, ^\circ$	30	35	40	45	50	55	60
$\text{tg}\beta$							
$N$							

2. Постройте график зависимости  $N$  от  $\text{tg}\beta$  и представьте его преподавателю. Дальнейшую обработку результатов проведите по указанию преподавателя.

### Обработка экспериментальных данных

#### А. Графический метод

1. Из графика определите угловой коэффициент  $B$ .

2. По значению  $B$  из выражения (10) вычислите среднее значение коэффициента трения качения  $\langle \mu_k \rangle = \frac{(\alpha_o - \alpha_N) \cdot R}{4B}$  при  $R = \dots$ , м,  $(\alpha_o - \alpha_N) \cdot \pi / 180^\circ$ , рад.

## Б. Аналитический метод

1. Методом наименьших квадратов вычислите  $B$  и  $S_{\langle B \rangle}$ .
2. По значению  $B$  из выражения (10) вычислите среднее значение коэффициента трения качения  $\langle \mu_k \rangle = \frac{(\alpha_o - \alpha_N) \cdot R}{4B}$  при  $R = \dots$ , м,  
 $(\alpha_o^o - \alpha_N^o) \cdot \pi / 180^\circ$ , рад.
3. Результат представьте в виде  $\mu_k = \langle \mu_k \rangle \pm \frac{S_{\langle B \rangle}}{B} \langle \mu_k \rangle$ .

## Контрольные вопросы

1. Что называют трением качения? Как объяснить появление силы трения качения.
2. Объясните методику эксперимента. Выведите формулу (8).

### Коэффициент Стьюдента

P=0.9	
n	t <sub>n-1</sub>
5	2,00
6	1,94
8	1,86
10	1,81
11	1,80
12	1,78