МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Тверской государственный технический университет» $(Tв\Gamma TY)$

Кафедра прикладной физики

А.Ф. Гусев, В.В. Измайлов, М.В. Новоселова

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ. ТРИБОЛОГИЯ

Учебно-методическое пособие

УДК 531.43(075.8) ББК 34.41я7

Рецензент заведующий кафедрой «Технология и автоматизация машиностроения» д.т.н. Гультяев В.И.

Гусев А.Ф., Измайлов В.В., Новоселова М.В. Лабораторный практикум. Трибология: учебно-методическое пособие. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2021. 52 с.

Процессы трения и изнашивания сопровождают работу практически любого современного технического устройства. От грамотного проектирования, изготовления и эксплуатации узлов трения зависит надежность сложных и ответственных технических систем.

Содержит описание лабораторных работ, предусматривающих экспериментальное исследование трибологических характеристик на моделях фрикционных пар. Должно способствовать формированию у студентов умений и навыков планирования и проведения экспериментальных исследований, статистической обработки результатов экспериментов и их оценки.

Предназначено для студентов технических специальностей, выполняющих лабораторные работы по трибологии и триботехнике в соответствии с учебным планом.

Рекомендовано к опубликованию на заседании кафедры прикладной физики (протокол № 6 от 17.03.2020).

[©] Тверской государственный технический университет, 2021 © Гусев А.Ф., Измайлов В.В., Новоселова М.В., 2021

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ МЕТОДОМ НАКЛОННОГО МАЯТНИКА

Цель работы: определение коэффициента трения качения в контакте шар – плоскость.

Приборы и принадлежности: лабораторная установка «Наклонный маятник», набор шаров, штангенциркуль.

$\begin{array}{c|c} R & F \\ \hline P & N \\ \hline k \\ \hline \end{array}$

Рис. 1. Качение жесткого шара по деформируемому полупространству

Теоретическое введение

Трением качения называется трение движения двух тел, при котором их скорости в точках касания равны по величине и направлению. Рассмотрим равномерное качение абсолютно жесткого (недеформируемого) шара по деформируемому полупространству (рис. 1). Шар нагружен вертикальной силой P и горизонтальной силой F. Со стороны полупространства на шар действуют силы реакции: N — нормальная реакция опоры и T — сила сопротивления качению (сила трения качения). Вследствие деформации полупространства нормальная реакция N смещена относительно

линии действия силы F на расстояние k. Из уравнений равновесия F = T; P = N; Nk = FR получаем выражение для величины k:

$$k = \frac{FR}{P} \,. \tag{1}$$

Следуя концепции Ш. Кулона, предложившего в 1785 г. уравнение (1), величину k называют коэффициентом трения качения. Очевидно, что величина k имеет размерность длины, в отличие от безразмерного коэффициента трения скольжения. Это не всегда удобно, поэтому наряду с размерным коэффициентом трения качения k используют безразмерную величину $f_R = k/R = F/P$, которую называют приведенным коэффициентом трения качения или коэффициентом сопротивления качению. Эта величина как характеристика сопротивления трению качения также не лишена недостатков, так как при ее использовании необходимо указывать, для какой величины радиуса катящегося тела она определена. Коэффициент сопротивления качению обычно много меньше, чем коэффициент трения скольжения.

Для стальных шаров или цилиндров при качении по стальной плоской детали размерный коэффициент трения качения $k \approx 10^{-5}$ м; для пневматической шины при качении по асфальту $k \approx 10^{-4}$ м.

По современным представлениям основными причинами возникновения сопротивления качению считаются упругий гистерезис при деформировании контактирующих тел, микропроскальзывание в зоне контакта и адгезионное взаимодействие контактирующих тел.

Упругий гистерезис является следствием того, что реальные контактирующие тела не абсолютно упругие. Например, при качении жесткого шара по упругому полупространству (см. рис. 1) материал полупространства поочередно деформируется шаром (сжимается) и восстанавливается после его прохождения. Если бы материал полупространства был идеально упругим, то энергия, затраченная на его деформирование при сжатии, равнялась бы энергии, выделившейся при восстановлении, т. е. потери энергии отсутствовали бы, следовательно, сила трения также отсутствовала бы. Реальные материалы не являются идеально упругими, т. е. энергия, затраченная на деформирование материала, не возвращается полностью при его восстановлении, часть энергии рассеивается (переходит во внутреннюю энергию, в результате чего контактирующие тела нагреваются). Это рассеяние (диссипация) энергии и является одной из причин сопротивления качению.

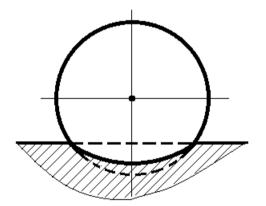


Рис. 2. Деформация контактирующих тел (пунктиром показаны исходные профили недеформированных тел)

Вторая составляющая сопротивления качению обусловлена взаимным проскальзыванием контактирующих тел по поверхности контакта. Поверхностные слои полупространства в зоне контакта его с катящимся шаром растянуты, а поверхностные слои шара — сжаты (рис. 2). Вследствие этого на границе раздела контактирующих тел возникает проскальзывание (трение скольжения), в результате чего также происходит диссипация энергии, следовательно, возникает сопротивление качению.

Третьей причиной возникновения сопротивления качению может быть адгезионное взаимодействие контактирующих тел. При качении происходит постоянное обновление контакта в направлении движения, сопровождающееся образованием и разрывом адгезионных связей. Образование и разрушение адгезионных связей происходят в направлении, близком к нормальному относительно поверхности контакта, в отличие от трения скольжения, где образование и разрушение адгезионных связей происходят вдоль поверхности контакта. Кроме того, при качении адгезионные связи разрушаются постепенно (одна за другой), а не одновременно по всей площадке контакта, как при скольжении.

Роль перечисленных составляющих сопротивления качению зависит от условий трения. Потери, связанные с микропроскальзыванием, характерны для большинства механизмов. Составляющая, обусловленная гистерезисом, относительно мала для материалов с высоким модулем упругости и твердостью (закаленные стали), но существенна для материалов с малым модулем упругости

(полимеры, резины и т. п.). Адгезионное взаимодействие может играть заметную роль при контактировании чистых металлических поверхностей и существенно уменьшается при наличии на поверхности контактирующих тел адсорбированных пленок, в том числе смазочного материала.

Описание экспериментальной установки и методики эксперимента

В данной работе для экспериментального определения коэффициента трения качения используются затухающие механические колебания наклонного маятника, схематически изображенного на рис. 3.

Наклонный маятник собран на платформе 1, оснащенной регулировочными винтами 2, позволяющими устанавливать платформу в горизонтальное положение. На платформе закреплена поворотная штанга 3, положение которой изменяется ручкой 4, а угол наклона штанги к вертикали отсчитывается по шкале 5.

В верхнем кронштейне 6 штанги размещается механизм подвеса 7 маятника, который позволяет регулировать его длину. Маятник представляет собой тонкую эластичную нить 8 с шаром 9. Шар имеет указательную стрелку 10, предназначенную для пересечения оптической оси фотоэлектрического датчика 11, который выдает электрический сигнал на миллисекундомер. Цифровые индикаторы времени «ВРЕМЯ» и количества полных периодов колебаний маятника «ПЕРИОДЫ» расположены на лицевой панели блока управления и измерений 12. На нижнем кронштейне 13 штанги расположены плоская полированная пластина 14, по которой происходит качение шара, и шкала отсчета 15 амплитуды колебаний маятника.

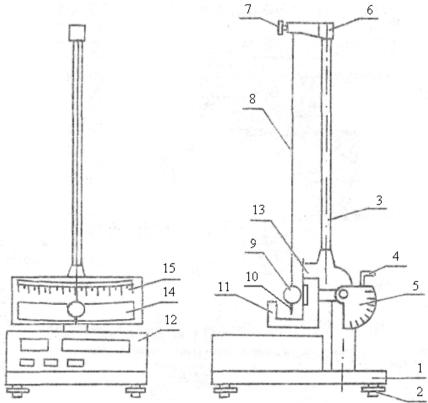


Рис. 3. Внешний вид и схема маятника

На лицевой панели блока управления и измерений 12 размещены кнопки «СЕТЬ», «СБРОС» и «СТОП»:

- 1. «СЕТЬ» включение / выключение питающего напряжения миллисекундомера. Кнопка имеет фиксацию.
- 2. «СБРОС» обнуление индикаторов времени и числа колебаний, генерирование сигнала на начало измерений. Кнопка без фиксации.
- 3. «СТОП» генерирование сигнала разрешения на окончание процесса счета. После нажатия этой кнопки счет прекращается не сразу, а только после того, как маятник завершит очередное колебание. Кнопка без фиксации.

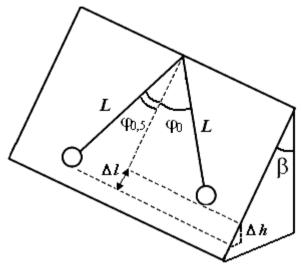


Рис. 4. Углы отклонения маятника

Если маятник вывести из положения равновесия и отпустить, он будет катиться по наклонной плоскости 14 по дуге окружности радиусом L (рис. 4). По затуханию колебаний (по изменению амплитуды колебаний во времени) можно определить приведенный коэффициент трения качения f_R . Амплитуда колебаний со временем уменьшается, так как энергия маятника расходуется на преодоление сил трения качения. На рис. 4 изображены положения шара в начальный момент времени и через половину периода колебаний. Изменение энергии

маятника за половину периода равно разности потенциальных энергий шара в двух крайних положениях:

$$\Delta E_{0,5} = mg\Delta h = mg \Delta l \cos\beta = mgL (\cos\varphi_{0,5} - \cos\varphi_0) \cos\beta, \qquad (2)$$

где ϕ_0 и $\phi_{0,5}$ — угол отклонения маятника от положения равновесия в начальный момент времени и через половину периода; β — угол наклона плоскости 14 к вертикали, который совпадает с углом наклона штанги 3 (см. рис. 3).

С учетом того, что при малых углах $\cos \phi \approx 1 - \phi^2/2$, выражение (2) можно переписать в виде

$$\Delta E_{0,5} = \frac{1}{2} mgL \left(\varphi_0^2 - \varphi_{0,5}^2 \right) \cos\beta. \tag{3}$$

Работу против сил трения качения за половину периода на пути, равном длине дуги окружности $L(\phi_0 + \phi_{0,5})$, можно рассчитать следующим образом:

$$A_{0.5} = FL(\varphi_0 + \varphi_{0.5}) = f_R \, mg \, \sin\beta \, L(\varphi_0 + \varphi_{0.5}). \tag{4}$$

Приравняв работу сил трения качения (4) к изменению потенциальной энергии (3), получим уменьшение амплитуды колебаний за половину периода:

$$\varphi_0 - \varphi_{0,5} = 2f_R \operatorname{tg} \beta. \tag{5}$$

Из анализа выражения (5) следует, что изменение амплитуды колебаний одинаково для каждого полупериода. Следовательно, изменение амплитуды $\Delta \phi$ за n целых периодов колебаний равно

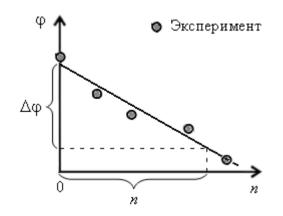


Рис. 5. Зависимость амплитуды колебаний от числа колебаний

$$\frac{\Delta \varphi}{n} = 4 f_R \operatorname{tg} \beta, \tag{6}$$

и зависимость амплитуды колебаний от числа колебаний $\varphi(n)$ имеет линейный характер (рис. 5).

Из выражения (6) можно получить расчетную формулу для приведенного коэффициента трения качения:

$$f_R = \frac{1}{4 \text{tg}\beta} \frac{\Delta \varphi}{n}, \qquad (7)$$

где изменение амплитуды $\Delta \varphi$ выражено в радианах.

Порядок выполнения работы

- 1. Записать в таблицу материалы шара и плоскости.
- 2. Измерить штангенциркулем диаметр шара D, результат измерений занести в таблицу.

Мате	Гатериалы шара и плоскости									Диа	метр шара	$D = \dots$	ММ
No	Угол		4 -	T .	<i>(T</i>) •			4 -		A	C	A . C	(AC)2
та	наклона штанги	m	τ, ε	1, c	< <i>T</i> >, c	φ_0	φ_m	t, c	n	Δφ	f_R	Δf_R	$(\Delta f_R)^2$
1													
2	$\beta_1 =$	10				10°							
3													
4													
5	$\beta_2 =$	10				10°							
6													
7													
8	$\beta_3 =$	10				10°							
9													

Подготовка установки к работе

3. Установить поворотную штангу 3 (см. рис. 3) в вертикальное положение с помощью ручки 4, угол наклона штанги β к вертикали по шкале 5 должен быть равен 0° .

- 4. Произвести регулировку положения платформы 1 при помощи винтов 2 так, чтобы стрелка на шаре 9 в положении равновесия совпадала с нулевым делением шкалы 15.
- 5. Отрегулировать длину нити 8 с помощью механизма подвеса 7 на верхнем кронштейне так, чтобы при колебаниях шар 9 перемещался по поверхности полированной пластины 14 и не выходил за ее пределы.

Выполнение измерений

- 6. Установить угол наклона штанги β_1 к вертикали (задается преподавателем из интервала $10^{\circ}...50^{\circ}$) и записать его значение в таблицу.
- 7. Отклонить маятник на угол $\varphi = 10^{\circ}$ от положения равновесия так, чтобы стрелка на шаре была направлена строго вдоль нити. Освободив маятник, одновременно включить секундомер и замерить время m = 10 полных колебаний. Результат измерения занести в таблицу.
 - 8. Повторить измерения еще два раза (см. п. 7).
- 9. Вычислить период колебания по формуле T = t/m и среднее значение периода < T >. Результаты записать в таблицу.
- 10. Отклонить маятник на угол $\varphi_0 = 10^\circ$ вправо от положения равновесия. Освободив маятник, одновременно включить секундомер и замерить время, за которое отклонение стрелки шара вправо уменьшится до значения φ_n (задается преподавателем). Результат измерения занести в таблицу.
 - 11. Повторить измерения еще два раза (см. п. 10).
- 12. Провести опыт (см. пп. 7–11) при двух других значениях угла наклона штанги β_2 и β_3 (задаются преподавателем).

Обработка результатов эксперимента

- 1. Рассчитать число колебаний n, совершенных маятником за время t, по формуле n = t/< T>. Результаты записать в таблицу.
 - 2. Вычислить изменение амплитуды в радианах по формуле

$$\Delta \varphi = (\varphi_0 - \varphi_m)\pi/180.$$

Результаты записать в таблицу.

- 3. Рассчитать приведенный коэффициент трения качения f_R по формуле (6). Результаты занести в таблицу.
- 4. Рассчитать среднее значение коэффициента трения $< f_R >$, доверительный интервал Δ_f и относительную погрешность эксперимента E (см. прилож. 1).
 - 5. Рассчитать размерный коэффициент трения качения по формуле

$$k = \langle f_R \rangle \cdot R$$
,

где R — радиус шара в мм.

Результат работы

1. Записать экспериментальные значения коэффициентов трения качения:

$$f_R = \langle f_R \rangle \pm \Delta_f = \dots;$$
 $E = \dots\%;$ $k = \dots MM.$

2. Сравнить экспериментально определенное значение коэффициента трения качения k с табличным (см. прилож. 2) и сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

- 1. Какова природа силы трения качения?
- 2. Что называется коэффициентом трения качения? Какова его размерность?
 - 3. Существует ли безразмерный коэффициент трения качения?
- 4. Нарисуйте колесо, катящееся *свободно* по плоской поверхности, и покажите на рисунке силы и моменты сил, приложенные к колесу. Нарисуйте аналогичный рисунок для колеса, катящегося под действием приложенного к нему *движущего* момента сил (например, ведущее колесо автомобиля).
- 5. Как с физической точки зрения можно обосновать справедливость известного практического совета «круглое кати»?
 - 6. Как уменьшить силу трения качения?
- 7. Почему колебания маятника, используемого в данной лабораторной работе, затухают со временем? Как изменяется во времени амплитуда этих колебаний?
- 8. Отклонив первоначально маятник на некоторый угол от положения равновесия, вы сообщили ему определенный запас потенциальной энергии. В конце концов колебания маятника прекратятся, и он вернется в исходное положение. Куда девалась сообщенная ему энергия?
- 9. На рис. 6 изображены типичные зависимости изменения во времени амплитуды колебаний маятников, подобных используемому в данной лабораторной работе. В одном случае колебания происходят в воздухе, в другом в вязкой жидкости. Какая зависимость какой среде соответствует? Почему?

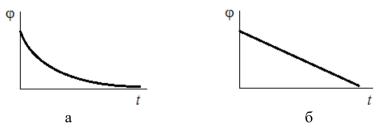


Рис. 6. Зависимость амплитуды колебаний от времени

10. Оцените, во сколько раз сила, необходимая для перемещения цилиндрической бочки массой 50 кг по деревянному настилу, отличается в случае, если бочку: а) катить; б) тащить волоком? Необходимые данные возьмите из справочников.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ НИТЕОБРАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: определение коэффициента трения нити по металлу.

Приборы и принадлежности: прибор для определения коэффициента трения, разновесы.

Теоретическое введение

Сила внешнего трения возникает на границе раздела соприкасающихся тел при смещении одного из них по поверхности другого. Силу трения можно разделить на две составляющие: молекулярную и механическую. Молекулярная составляющая представляет собой сопротивление сдвигу, вызванное силами притяжения между молекулами контактирующих тел. Механическая составляющая возникает в результате сопротивления деформированию микронеровностей на поверхностях контактирующих тел при их взаимном смещении. Как молекулярная, так и механическая составляющие силы трения формируются на фактической площади контакта (ФПК), образующейся в результате деформации микронеровностей контактирующих поверхностей. Фактическая площадь контакта обычно составляет малую часть от номинальной (геометрической) площади и зависит от нормальной нагрузки, формы шероховатых поверхностей и физико-механических характеристик материалов: модуля упругости, предела текучести и др.

Работа, затрачиваемая на преодоление сил трения, переходит во внутреннюю энергию тел. Диссипация энергии приводит к нагреванию поверхностей, их окислению и другим изменениям, вызывающим, в свою очередь, изменение силы трения.

По кинематическим признакам различают трение покоя и трение движения, которое, в свою очередь, делится на трение скольжения и трение качения. В зависимости от наличия смазки и характера ее влияния различают следующие разновидности трения: трение без смазочного материала и трение со смазочным материалом (при граничной смазке, жидкостной смазке, твердой смазке и газовой смазке). При трении без смазочного материала смазка отсутствует, поверхности покрыты окисными пленками и адсорбированными слоями молекул воды, газа и других веществ. При граничной смазке поверхности разделены тонким слоем смазки, обычно толщиной в несколько слоев молекул.

Таким образом, сила трения

$$F = F_{\text{MOЛ}} + F_{\text{MeX}} = \tau A_r = (\tau_{\text{MOЛ}} + \tau_{\text{MeX}}) A_r, \tag{1}$$

где τ , $\tau_{\text{мол}}$ и $\tau_{\text{мех}}$ – полная удельная сила трения, ее молекулярная и механическая составляющие; A_r – фактическая площадь контакта.

Коэффициент трения скольжения – отношение силы трения к нормальной силе, прижимающей контактирующие тела друг к другу:

$$f = \frac{F}{N} = \frac{F}{\sigma_n A_r} = \frac{\tau}{\sigma_n} = \frac{\tau_{\text{MOЛ}}}{\sigma_n} + \frac{\tau_{\text{MEX}}}{\sigma_n} = f_{\text{MОЛ}} + f_{\text{MEX}}, \tag{2}$$

где σ_n — среднее фактическое давление в контакте; $f_{\text{мол}}$ и $f_{\text{мех}}$ — молекулярная и механическая составляющие коэффициента трения.

Молекулярная составляющая удельной силы трения является линейной функцией фактического давления в контакте:

$$\tau_{\text{MOJ}} = \tau_0 + \beta \sigma_n, \tag{3}$$

где τ_0 и β – константы для данной пары трения.

Из формул (2) и (3) следует, что

$$f_{\text{MOЛ}} = \frac{\tau_0}{\sigma_n} + \beta. \tag{4}$$

Механическая составляющая силы трения зависит от деформации выступов шероховатости контактирующих поверхностей и является сложной функцией нагрузки, геометрических и физико-механических характеристик контактирующих поверхностей. Учитывая, что в условиях контактирования гладких поверхностей молекулярная составляющая значительно выше, чем механическая, последней можно пренебречь. Однако такое приближение не всегда приемлемо, особенно в случае трения полимеров.

В инженерных расчетах в целях их упрощения коэффициент трения часто считают постоянной величиной, что возможно, согласно формуле (4), если $\frac{\tau_0}{\sigma_n} \ll \beta$ или если $\sigma_n = \text{const.}$

Л. Эйлер, считая коэффициент трения постоянным, вывел формулу, связывающую силы натяжения в набегающей и сбегающей ветвях гибкой нити, скользящей по цилиндрическому шкиву. Рассматривая равновесие элемента нити (рис. 1), можно записать:

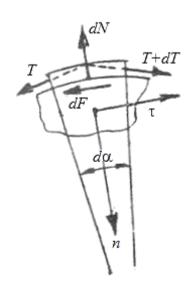


Рис. 1. Равновесие элемента гибкой нити

$$dT\cos\left(\frac{d\alpha}{2}\right) - dF = 0;$$

$$2T\sin\left(\frac{d\alpha}{2}\right) + dT\sin\left(\frac{d\alpha}{2}\right) - dN = 0.$$
 (5)

Поскольку $\cos\left(\frac{d\alpha}{2}\right) \approx 1$ и $\sin\left(\frac{d\alpha}{2}\right) \approx \frac{d\alpha}{2}$, то, пренебрегая бесконечно малыми величинами 2-го порядка малости, получим

$$\begin{cases}
dF = dT; \\
dN = Td\alpha.
\end{cases}$$
(6)

Учитывая, что сила трения dF = f dN, из уравнений (6) получаем дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными:

$$\frac{dT}{T} = f d\alpha. (7)$$

Уравнение решается простым интегрированием обеих частей:

$$\int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = f \int_0^{\alpha_k} d\alpha.$$

В результате получаем формулу Эйлера:

$$T_2 = T_1 e^{f\alpha_k}, (8)$$

где T_1 и T_2 — силы натяжения в сбегающей и набегающей ветвях гибкой нити; α_k — угол охвата шкива гибкой нитью (рис. 2). Формула Эйлера успешно применяется для расчета канатных, ременных передач, сил натяжения в текстильных нитях, транспортерных лентах и т. д. Эту формулу можно использовать для вычисления коэффициента трения исходя из линейной зависимости между $\ln(T_2/T_1)$ и углом охвата α , которая получается логарифмированием обеих частей уравнения (8): $\ln(T_2/T_1) = f \alpha$. Следовательно, коэффициент трения определяется как тангенс угла наклона прямой: $f = \frac{\Delta \ln(T_2/T_1)}{\Lambda \alpha}$.

Описание экспериментальной установки

На рис. 2 изображена схема прибора для определения коэффициента трения нити. Гибкая нить 1 охватывает цилиндрический сменный шкив 2. К одному концу нити подвешивается груз 3, создающий силу натяжения T_1 . Второй конец нити крепится к плоской пружине динамометра 4, деформация которой измеряется индикатором 5. Площадка 6, на которой установлены пружина и индикатор, шарнирно прикреплена к оси шкива. Стрелка 7, укрепленная на площадке, указывает по шкале транспортира 8 угол охвата шкива нитью α_k . Привод шкива во вращение осуществляется с помощью мотора 9, на его барабан 10 наматывается тяговый тросик 11, связанный с диском 12, на котором и установлен шкив 2.

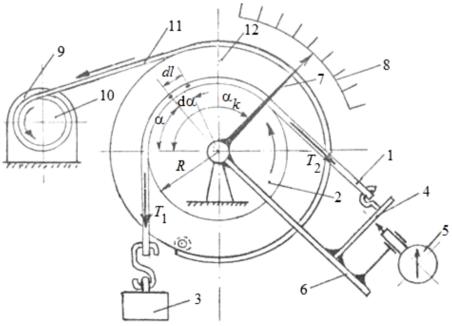


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Порядок выполнения работы

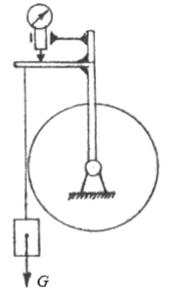


Рис. 3. Расположение пружины динамометра при тарировке

- 1. Ознакомиться с установкой и указаниями на ней.
- 2. Произвести тарировку пружинного динамометра, для чего, поворачивая площадку 6, установить пружину в горизонтальное положение, как это показано на рис. 3.

Подвешивая к пружине грузы различной массы, измерить деформацию пружины по индикатору. Результаты тарировки занести в табл. 1.

По результатам тарировки (табл. 1) построить график зависимости между нагрузкой G и средним числом делений индикатора n (должна получиться прямая линия) и по наклону

этой линии определить коэффициент жесткости пружины C [H/дел.].

Таблица 1

Macca	Нагрузка	Число делений индикатора <i>n</i>									
груза, г	Нагрузка G , Н	При увеличении нагрузки	При уменьшении нагрузки	Среднее							
50	0,5										
100	1,0										
150	1,5										
200	2,0										
250	2,5										
300	3,0										

- 3. Уложить нить 1 (см. рис. 2) на поверхность шкива 2 и подвесить к ней наименьший из грузов, предусмотренных табл. 2. Установить угол охвата 90°.
- 4. Проверить достаточность запаса тягового тросика 11 (см. рис. 2) в канавке диска 12, обеспечивающего поворот диска на 270...300°. Намотать избыток тросика на барабан двигателя 9.
- 5. Тумблером включить электродвигатель и через 10–15 секунд записать установившееся показание индикатора пружинного динамометра в делениях в табл. 2. Пересчитать с помощью определенного в п. 2 коэффициента жесткости пружины C показание индикатора в делениях в величину силы натяжения T_2 , которую после этого занести в табл. 2.
- 8. По данным табл. 2 рассчитать значения $\ln(T_2/T_1)$, которые потом занести в табл. 3.

Таблица 2

Масса груза, г	Сила	$ m Угол \ охвата \ lpha_{\it k}, \ paд$												
	натяжения	ия 0,5π		π		$1,5\pi$		2π		$2,5\pi$				
	T_1 , H	<i>T</i> ₂ , дел.	T_2 , H	<i>T</i> ₂ , дел.	T_2 , H	<i>T</i> ₂ , дел.	T_2 , H	<i>T</i> ₂ , дел.	T_2 , H	<i>T</i> ₂ , дел.	T_2 , H			
50	0,5													
100	1,0													
150	1,5													
200	2,0													
250	2,5													

Таблица 3

T_1 , H	Значения $\ln(T_2/T_1)$ при значениях угла охвата α_k , рад										
	0,5π	π	1,5π	2π	2,5π						
0,5											
1,0											
1,5											
2,0											
2,5											
Среднее значение $ln(T_2/T_1)$											

9. По данным табл. 3 построить график зависимости $\ln \frac{T_2}{T_1}$ от значения угла охвата α_k аналогично графику, изображенному на рис. 4. По наклону полученной прямой найти экспериментальное значение коэффициента трения $f_{\text{эксп}}$:

$$f=rac{\Delta \ln rac{T_2}{T_1}}{\Delta lpha}.$$
 $\ln (T_2/T_1)$ $\Delta \ln (T_2/T_1)$ $\Delta lpha$ $lpha$, рад

Рис. 4. Зависимость логарифма отношения сил натяжения гибкой нити от угла охвата

Результат работы

1. Записать экспериментальное значение коэффициента трения в виде

$$f = f_{\text{ЭКСП}} \pm \Delta f = \dots;$$
 $E = \dots\%.$

Контрольные вопросы

- 1. Что такое внешнее трение? В чем его отличие от внутреннего?
- 2. Как различаются виды трения по кинематическому признаку? Какой вид трения вы исследовали в данной лабораторной работе?
- 3. Какова природа молекулярной и механической составляющих силы трения? Какая составляющая, по вашему мнению, преобладает в данной лабораторной работе?
 - 4. От каких факторов зависит коэффициент трения скольжения?
- 5. Поясните сущность метода определения коэффициента трения, используемого в данной лабораторной работе.
- 6. Какие величины экспериментально измеряют в ходе данной лабораторной работы для вычисления коэффициента трения? Как обрабатываются результаты измерения?
- 7. Почему в ременных передачах обычно используют ремень клиновидной, а не плоской формы?
- 8. Известно, что с помощью каната, намотанного на кнехт (круглая металлическая тумба на палубе судна или на причале для крепления тросов), можно удержать гораздо больший груз, чем просто держа его на весу за привязанный к нему канат. Используя результаты, полученные в данной лабораторной работе, оцените, сможете ли вы таким образом удержать груз массой 100 кг?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ

Цель работы: определение коэффициентов трения качения для различных пар материалов.

Приборы и принадлежности: маятник, секундомер.

Теоретическое введение

Трением качения называется трение движения двух тел, при котором их скорости в точках касания равны по величине и направлению. Рассмотрим равномерное качение абсолютно жесткого (недеформируемого) цилиндра по де-

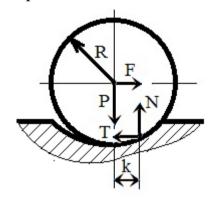


Рис. 1. Качение жесткого цилиндра по деформируемому полупространству

формируемому полупространству (рис. 1). Цилиндр нагружен вертикальной силой P и горизонтальной силой F. Со стороны полупространства на цилиндр действуют силы реакции N и T. Вследствие деформации полупространства нормальная реакция N смещена относительно линии действия силы F на расстояние k. Из уравнений равновесия F = T; P = N; Nk = FR получаем выражение для величины k:

$$k = \frac{FR}{P}.$$
 (1)

Следуя концепции Ш. Кулона, предложившего в 1785 г. уравнение (1), величину k называют коэффициентом трения качения. Очевидно, что величина k имеет размерность длины, в отличие от безразмерного коэффициента трения скольжения. Это не всегда удобно, поэтому наряду с размерным коэффициентом трения качения k используют безразмерную величину $f_R = k/R = F/P$, которую называют приведенным коэффициентом трения качения или коэффициентом сопротивления качения также не лишена недостатков, так как при ее использовании необходимо указывать, для какой величины радиуса катящегося тела она определена. Коэффициент сопротивления качению обычно много меньше, чем коэффициент трения скольжения. Для стальных цилиндров или шаров при качении по стальной плоской детали $k \approx 10^{-5}$ м; для пневматической шины при качении по асфальту $k \approx 10^{-4}$ м.

По современным представлениям основными причинами возникновения сопротивления качению считаются упругий гистерезис при деформировании контактирующих тел, микропроскальзывание в зоне контакта и адгезионное взаимодействие контактирующих тел.

Упругий гистерезис является следствием того, что реальные контактирующие тела не абсолютно упругие. Например, при качении жесткого цилиндра по упругому полупространству (см. рис. 1) материал полупространства пооче-

редно деформируется цилиндром (сжимается) и восстанавливается после его прохождения. Если бы материал полупространства был идеально упругим, то энергия, затраченная на его деформирование при сжатии, равнялась бы энергии, выделившейся при восстановлении, т. е. потери энергии отсутствовали бы, следовательно, сила трения также отсутствовала бы. Реальные материалы не являются идеально упругими, т. е. энергия, затраченная на деформирование материала, не возвращается полностью при его восстановлении, часть энергии рассеивается (переходит во внутреннюю энергию, в результате чего контактирующие тела нагреваются). Это рассеяние (диссипация) энергии и является одной из причин сопротивления качению.

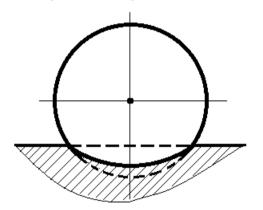


Рис. 2. Деформация контактирующих тел (пунктиром показаны исходные профили недеформированных тел)

Вторая составляющая сопротивления качению обусловлена взаимным проскальзыванием контактирующих тел по поверхности контакта. Поверхностные слои полупространства в зоне контакта его с катящимся цилиндром растянуты, а поверхностные слои цилиндра — сжаты (рис. 2). Вследствие этого на границе раздела контактирующих тел возникает проскальзывание (трение скольжения), в результате чего также происходит диссипация энергии, следовательно, возникает сопротивление качению.

Третьей причиной возникновения сопротивления качению может быть адгезионное взаимодействие контактирующих тел. При качении происходит постоянное обновление контакта в направлении движения, сопровождающееся образованием и разрывом адгезионных связей. Образование и разрушение адгезионных связей происходят в направлении, близком к нормальному относительно поверхности контакта, в отличие от трения скольжения, где образование и разрушение адгезионных связей происходят вдоль поверхности контакта. Кроме того, при качении адгезионные связи разрушаются постепенно (одна за другой), а не одновременно по всей площадке контакта, как при скольжении.

Роль перечисленных составляющих сопротивления качению зависит от условий трения. Потери, связанные с микропроскальзыванием, характерны для большинства механизмов. Составляющая, обусловленная гистерезисом, относительно мала для материалов с высоким модулем упругости и твердостью (закаленные стали), но существенна для материалов с малым модулем упругости (полимеры, резины и т. п.). Адгезионное взаимодействие может играть заметную роль при контактировании чистых металлических поверхностей и существенно уменьшается при наличии на поверхности контактирующих тел адсорбированных пленок, в том числе смазочного материала.

Описание экспериментальной установки и методики эксперимента

В данной работе для экспериментального определения коэффициента трения качения используются затухающие механические колебания маятника, схематически изображенного на рис. 3. Цилиндр 1 радиусом *R* контактирует с плоскими пластинами 2, закрепленными на плите 5, в которой сделана прорезь. К цилиндру 1 снизу прикреплен массивный груз 3, а сверху — стержень 4 со стрелкой на конце. Отклонения стрелки фиксируются по шкале 6.

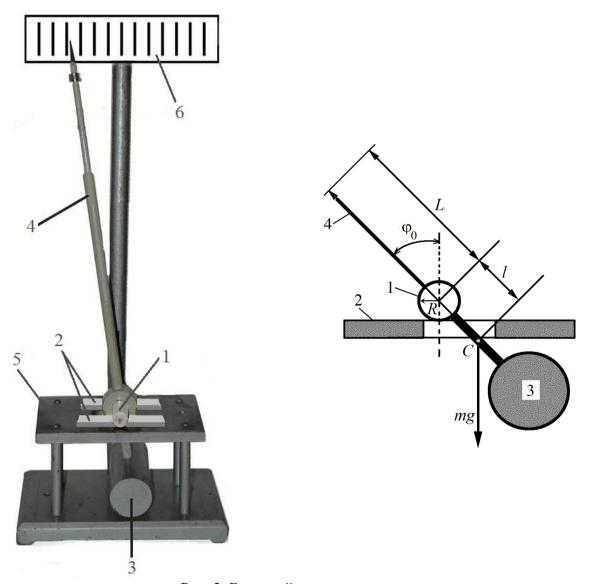


Рис. 3. Внешний вид и схема маятника

Если маятник вывести из положения равновесия и отпустить, то он будет совершать затухающие колебания. По затуханию колебаний (по изменению амплитуды колебаний во времени) можно определить коэффициент трения качения k. Для этого воспользуемся законом сохранения энергии. При первоначальном отклонении маятника на угол ϕ_0 (см. рис. 3) его центр масс (точка C) поднимается на высоту

$$h_0 = l(1 - \cos\varphi_0),$$

при этом его потенциальная энергия будет равна

$$E_0 = mgh_0 = mgl(1 - \cos\varphi_0).$$

Спустя половину периода маятник отклоняется в противоположную сторону на угол $\phi_{0,5} < \phi_0$ (рис. 4). Для потенциальной энергии маятника в этом положении аналогично получим

$$E_{0,5} = mgh_{0,5} = mgl(1 - \cos\varphi_{0,5}),$$

где $\phi_{0,5}$ — угол отклонения маятника после первого полупериода колебаний (рис. 4). Воспользовавшись известным из тригонометрии соотношением $1-\cos\phi=2\sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)$, получим величину изменения потенциальной энергии маятника за первый полупериод колебаний:

$$\Delta E_{0,5} = E_0 - E_{0,5} = 2mgl\left(\sin^2\frac{\varphi_0}{2} - \sin^2\frac{\varphi_{0,5}}{2}\right). \tag{2}$$

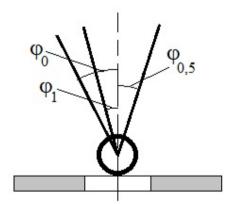
При малых углах $\sin \varphi \approx \varphi$, поэтому формулу (2) можно записать в виде

$$\Delta E_{0,5} = \frac{1}{2} mgl(\varphi_0^2 - \varphi_{0,5}^2). \tag{3}$$

Пренебрегая силой сопротивления воздуха, будем считать, что изменение потенциальной энергии маятника равно работе против сил трения качения. За первый полупериод работа равна

$$A_{0,5} = mgk(\varphi_0 + \varphi_{0,5}), \tag{4}$$

где в скобках записана величина угла поворота маятника за первый полупериод (рис. 4). Приравнивая $\Delta E_{0,5}$ к $A_{0,5}$, из уравнений (3) и (4) получим изменение угла отклонения маятника за первый полупериод колебаний:



$$\varphi_0 - \varphi_{0,5} = \frac{2k}{l}. (5)$$

Рассуждая совершенно аналогично, для второго полупериода получим изменение угла отклонения маятника в виде

$$\varphi_{0,5} - \varphi_1 = \frac{2k}{l},\tag{6}$$

Рис. 4. Углы отклонения маятника

4).

где $\phi_{0,5}$ и ϕ_1 — углы отклонения маятника в начале и в конце второго полупериода (см. рис.

Итого за каждый период колебаний изменение угла отклонения маятника составит величину $\Delta \varphi = 4k/l$. Соответственно, за n периодов колебаний

$$\varphi_0 - \varphi_n = n\Delta \varphi = 4nk/l, \tag{7}$$

откуда для коэффициента трения качения получаем формулу

$$k = \frac{l(\varphi_0 - \varphi_n)}{4n}.$$
(8)

В экспериментальной установке, используемой в данной работе, измеряют не углы отклонения маятника, а линейные отклонения стрелки 4, отсчитываемые по шкале 6 (см. рис. 3). Установим связь угла поворота маятника ф с отклонениями стрелки.

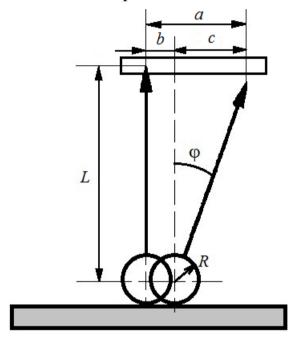


Рис. 5. Смещение стрелки при качении маятника

Маятник совершает сложное движение, которое можно разложить на поступательное движение по плоскости 2 (см. рис. 3) и вращательное движение вокруг оси цилиндра 1. Тогда смещение конца стрелки a можно представить в виде суммы двух составляющих: a = b + c (рис. 5). Смещение $b = R\phi$ обусловлено поступательным движением маятника, а смещение $c = Ltg\phi$ — вращательным. Поскольку при малых углах $tg\phi \approx \phi$, то полное смещение $a = (R + L)\phi$, и из формулы (8) получаем окончательную расчетную зависимость для коэффициента трения качения:

$$k = \frac{l}{4n} \cdot \frac{a_0 - a_n}{L + R},\tag{9}$$

где n — число колебаний маятника за время измерения; a_0 и a_n — начальное и конечное отклонения стрелки 4 по шкале 6 (см. рис. 3).

Порядок выполнения работы

- 1. Отклонить маятник на угол $5-10^{\circ}$ от положения равновесия.
- 2. Освободив маятник, одновременно включить секундомер и замерить время *п* полных периодов колебания (*число колебаний задается преподавате- лем*). Результат измерения занести в табл. 1.

Повторить измерения еще два раза, затем вычислить среднее значение периода колебаний.

Таблица 1

Мат	Материалы цилиндра и плоскости										
Диа	метр цилиндра $D = \dots$	$L = \dots MM$	$l=\dots$ MM								
№	Число колебаний п	Время t, с	Период $T = t/n$, с	$T_{\rm cp},{ m c}$							
1											
2											
3											

- 3. Осторожно отклонить маятник на угол 5– 10° влево, не допуская его проскальзывания по пластинам 2, и записать в табл. 2 начальное отклонение стрелки a_0 на шкале 6.
- 4. Освободив маятник, одновременно включить секундомер и замерить время, за которое максимальное отклонение стрелки 4 влево уменьшится до значения a_n по шкале 6. Результат измерения занести в табл. 2.

Повторить измерения еще не менее двух раз, отклоняя маятник влево от положения равновесия.

- 5. Осторожно отклонить маятник на угол 5– 10° вправо, не допуская его проскальзывания по пластинам 2, и записать в табл. 2 начальное отклонение стрелки a_0 на шкале 6.
- 6. Освободив маятник, одновременно включить секундомер и замерить время, за которое максимальное отклонение стрелки вправо уменьшится до значения a_n по шкале 6. Результат измерения занести в табл. 2.

Повторить измерения еще не менее двух раз, отклоняя маятник вправо от положения равновесия.

7. Рассчитать число колебаний n и значения коэффициента трения качения k по формуле (9). Результаты записать в табл. 2.

Таблина 2

№ опыта	Отклонение	<i>a</i> ₀ , MM	a_n , MM	t, c	$n = t/T_{\rm cp}$	k, mm	Δk	$(\Delta k)^2$
1								
2								
3	Влево							
4								
5								
6								
7								
8	Вправо							
9								
10								

- 8. Вычислить среднее значение коэффициента трения качения $k_{\rm cp}$, доверительный интервал Δ_k и относительную погрешность эксперимента E (см. прилож. 1).
- 9. Рассчитать безразмерный коэффициент сопротивления качению по формуле

$$f_R = k_{\rm cp} / R$$
,

где R — радиус цилиндра 1 (см. рис. 5).

Результат работы

1. Записать экспериментальные значения коэффициентов трения качения:

$$k=k_{\mathrm{cp}}\pm\Delta_k=\dots$$
 mm; $E=\dots$ %; $f_R=\dots$

2. Сравнить экспериментально определенные значения коэффициентов трения с табличными (см. прилож. 2) и сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

- 1. Какова природа силы трения качения?
- 2. Что называется коэффициентом трения качения? Какова его размерность?
 - 3. Существует ли безразмерный коэффициент трения качения?
- 4. Нарисуйте колесо, катящееся *свободно* по плоской поверхности, и покажите на рисунке силы и моменты сил, приложенные к колесу. Нарисуйте аналогичный рисунок для колеса, катящегося под действием приложенного к нему *движущего* момента сил (например, ведущее колесо автомобиля).
- 5. Как с физической точки зрения можно обосновать справедливость известного практического совета «круглое кати»?
 - 6. Как уменьшить силу трения качения?
- 7. Почему колебания маятника, используемого в данной лабораторной работе, затухают со временем? Как изменяется во времени амплитуда этих колебаний?
- 8. Отклонив первоначально маятник на некоторый угол от положения равновесия, вы сообщили ему определенный запас потенциальной энергии. В конце концов колебания маятника прекратятся, и он вернется в исходное положение. Куда девалась сообщенная ему энергия?
- 9. На рис. 6 изображены типичные зависимости изменения во времени амплитуды колебаний маятников, подобных используемому в данной лабораторной работе. В одном случае колебания происходят в воздухе, в другом в вязкой жидкости. Какая зависимость какой среде соответствует? Почему?

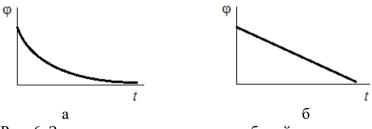


Рис. 6. Зависимость амплитуды колебаний от времени

10. Оцените, во сколько раз сила, необходимая для перемещения цилиндрической бочки массой 50 кг по деревянному настилу, отличается в случае, если бочку: а) катить; б) тащить волоком? Необходимые данные возьмите из справочников.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СТАТИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ И ПАРАМЕТРОВ МОЛЕКУЛЯРНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ УДЕЛЬНОЙ СИЛЫ ТРЕНИЯ НА МИКРОТРИБОМЕТРЕ

Цель работы: ознакомление с одним из методов экспериментального определения коэффициента статического трения и параметров молекулярной составляющей удельной силы трения.

Приборы и принадлежности: микротрибометр, набор разновесов, образцы для определения коэффициента трения.

Теоретическое введение

Сила внешнего трения — сила сопротивления, возникающая при смещении одного тела по поверхности другого и направленная тангенциально к общей границе между двумя телами.

Различают *силу трения скольжения* — при относительном перемещении тел — и *силу трения покоя* — при отсутствии относительного перемещения соприкасающихся тел. Обычно максимальная сила трения покоя немного больше силы трения установившегося скольжения.

Ko эффициентом трения называют отношение силы трения F к нормальной составляющей внешних сил N, действующих на поверхности тел:

$$f = \frac{F}{N}. (1)$$

Если в формуле (1) F — сила трения покоя, то соответствующий коэффициент трения f называют коэффициентом трения покоя или коэффициентом статического трения.

Согласно современным представлениям трение имеет двойственную молекулярно-механическую природу. На площадках фактического контакта поверхностей действуют силы молекулярного притяжения, образующие адгезионные связи. При относительном сдвиге тел происходит их разрушение, что требует затрат энергии в необратимой форме. Одновременно будет происходить взаимное деформирование микровыступов контактирующих поверхностей – пропахивание. Общая сила трения составляет сумму адгезионной (молекулярной) и деформационной (механической) составляющих:

$$F = F_{\text{all}} + F_{\text{ned}}. \tag{2}$$

Соответственно, общий коэффициент трения равен

$$f = f_{\text{anr}} + f_{\text{net}}. \tag{3}$$

Механическая составляющая силы трения зависит от глубины внедрения выступов одного тела в другое и является сложной функцией нагрузки, геометрических и физико-механических характеристик поверхностей. В условиях данной работы, когда контактируют гладкие поверхности при очень малых нагрузках, механическая составляющая намного меньше молекулярной и ей можно пренебречь, т. е. считать $f = f_{\rm ant}$.

Для молекулярной (адгезионной) составляющей справедлив биноминальный закон:

$$\tau = \tau_0 + \beta p_r,\tag{4}$$

где τ — сдвиговое напряжение, характеризующее сопротивление на срез молекулярных связей; τ_0 — сдвиговое напряжение при отсутствии нормальных напряжений; β — пьезокоэффициент, характеризующий упрочнение адгезионной связи под действием нормального давления; p_r — фактическое нормальное давление на контакте.

Напряжение сдвига τ представляет собой молекулярную составляющую силы трения, приходящуюся на единицу площади фактического контакта поверхностей, т. е. *удельную силу трения*. Параметры τ_0 и β называют *параметрами удельной силы трения*.

Применительно к коэффициенту трения биноминальный закон приобретает вид

$$f = \frac{\tau_0}{p_r} + \beta. \tag{5}$$

Если имеет место упругий контакт шарика с гладкой поверхностью образца, то фактическое контактное давление рассчитывается по формуле, полученной Г. Герцем:

$$p_r = \frac{1}{\pi} \sqrt[3]{\left(\frac{4}{3}\right)^2 \frac{N}{r^2 I^2}},\tag{6}$$

где r – радиус шарика; $I=\frac{1-\mu_1^2}{E_1}+\frac{1-\mu_2^2}{E_2}$, E_1 и E_2 , μ_1 и μ_2 – соответственно модули упругости и коэффициенты Пуассона образца и контробразца (шарика).

Тогда, согласно формулам (5), (6), получим следующее соотношение для зависимости коэффициента трения от нормальной нагрузки:

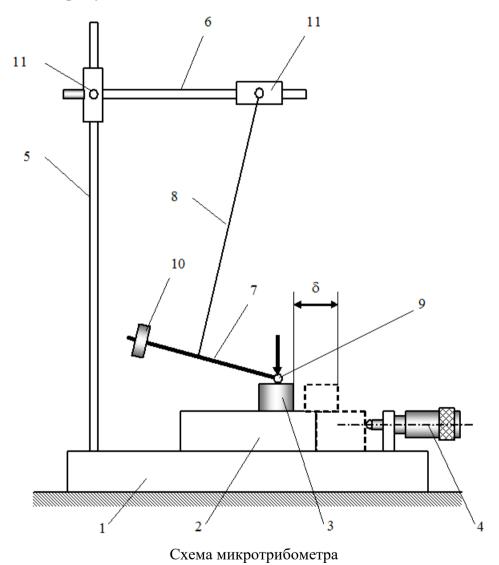
$$f = \tau_0 k_y N^{-\frac{1}{3}} + \beta. \tag{7}$$

Здесь коэффициент k_y зависит от упругих и геометрических характеристик контактирующих тел и рассчитывается по формуле

$$k_y = \pi \left(\frac{3}{4}rI\right)^{\frac{2}{3}}.\tag{8}$$

Описание экспериментальной установки и методики эксперимента

Изучение фрикционных характеристик тонких поверхностных слоев представляет известную трудность, так как необходимо проводить измерения при малых нагрузках, что предполагает регистрацию с достаточной точностью очень малых значений силы трения. В частности, это относится к измерению коэффициентов трения тонкослойных покрытий и пленок на поверхности трения. Для такого рода исследования используется *микротрибометр* (патент РФ № 2150688). С его помощью можно исследовать трение поверхностных слоев при очень малых нагрузках. Микротрибометр успешно применялся для определения параметров удельной силы трения оксидных пленок, ионно-плазменных покрытий, низкомодульных полимерных покрытий на металлах и тонких слоев, полученных методом лазерного поверхностного упрочнения. Схема прибора представлена на рисунке.



Прибор состоит из основания 1, ползуна 2, на поверхности которого устанавливают образец 3, микрометрического винта 4 для линейного перемещения образца, регулируемой стойки 5 с подвижной траверсой 6 и держателя

контробразца 7, подвешенного к траверсе на двух параллельных нитях 8. Держатель контробразца имеет вид крестообразной балки, на одном конце которой находится контробразец 9, а на противоположном — уравновешивающий его противовес 10. Поверхность трения образца плоская. В качестве контробразца используются сферические инденторы. Это дает возможность измерить параметры адгезионной (молекулярной) составляющей удельной силы трения τ_0 и β .

Измерение осуществляют следующим образом. Образец помещают на поверхность ползуна. Ползун устанавливают так, чтобы он одной стороной упирался в шток привода линейного перемещения (микрометрический винт), и по шкале микрометрического винта фиксируют начальное показание δ '. Передвигая фиксаторы 11 на стойке и траверсе, подводят контробразец (шарик) к поверхности образца так, чтобы он легко касался образца. После этого нагружают контакт гирьками из набора разновесов. Плавно вращая головку микрометрического винта, перемещают ползун вместе с образцом в горизонтальной плоскости. При этом контробразец за счет трения перемещается вместе с образцом, а нити, на которых он подвешен, отклоняются от вертикали, в результате чего увеличивается горизонтальная составляющая силы натяжения нити. Образец продолжают сдвигать до тех пор, пока эта сила не превысит максимального значения силы трения покоя и контробразец-шарик не начнет проскальзывать относительно образца. В этот момент прекращают перемещение ползуна и по шкале микрометрического винта фиксируют конечное показание δ ".

Если угол отклонения нити от вертикали α мал, то $\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha$ и силу трения можно определить как $F = P \sin \alpha = P\left(\frac{\delta}{l}\right)$. Тогда коэффициент трения равен

$$f = \frac{P}{G} \cdot \frac{\delta}{l},\tag{9}$$

где $P=m_P\cdot g$ — вес балки вместе с контробразцом и противовесом, m_P — масса балки; $G=m_G\cdot g$ — вес гирьки, равный нормальной нагрузке на контакт N=G, m_G — масса гирьки; $\delta=\delta'-\delta''$ — величина линейного перемещения образца; l — длина нити, на которой подвешена балка.

Порядок выполнения работы

Упражнение 1. Измерение коэффициента статического трения

- 1. Ознакомиться с устройством микротрибометра и методикой эксперимента.
- 2. Записать в табл. 1 значения длины нити l, массы балки m_p и веса балки P (указаны на основании микротрибометра).
- 3. Передвинуть ползун так, чтобы он одной стороной упирался в шток микрометрического винта. По шкале микрометрического винта измерить начальное показание δ '. Результат измерений занести в табл. 1.
- 4. Поместить образец на поверхность ползуна. Передвигая фиксаторы на стойке и траверсе, привести контробразец-шарик в соприкосновение с поверхностью образца. Нагрузить контакт гирькой массой m_G , указанной в табл. 1.

- 5. Плавно вращать головку микрометрического винта, перемещая ползун вместе с образцом в горизонтальной плоскости до тех пор, пока контробразецшарик не начнет проскальзывать относительно образца. Измерить по шкале микрометрического винта конечное показание δ". Результат измерений занести в табл. 1.
- 6. Рассчитать и занести в табл. 1 величину линейного перемещения образца как разность конечного и начального показаний по шкале микрометрического винта: $\delta = \delta' \delta''$.
- 7. Повторить измерения при тех же условиях еще два раза. Результаты занести в табл. 1.
- 8. Повторить эксперимент пп. 3–7 при других нагрузках на контакт, постепенно увеличивая нагрузку в каждом последующем опыте.

Обработка результатов эксперимента

1. Рассчитать для каждого опыта (каждой массы m_G) и занести в табл. 1: вес гирьки по формуле $G = m_G \cdot g$;

среднее из трех измерений значение смещения образца до начала проскальзывания $<\!\!\delta\!\!>$;

коэффициент статического трения f по формуле (9).

Таблица 1

l =	MM		$m_p =$	Г		<i>P</i> =	Н		N =	= <i>G</i>		
№	m_G ,	СП	δ', мм		δ", мм		$\delta = \delta' - \delta'',$		MM	<δ>, мм	£	<i>N</i> ^{-1/3} , H ^{-1/3}
110	МΓ	G , п	O, MM	1	2	3	1	2	3	<0~, MM	J	/V , 11
1	50											
2	100											
3	200											
4	300											
5	500											

- 2. Построить график зависимости коэффициента трения f от нормальной нагрузки на контакт N, учитывая, что вес гирьки равен нормальной нагрузке на контакт N = G.
- 3. Сделать выводы о зависимости коэффициента трения от нормальной нагрузки при малых нагрузках на контакт.

Упражнение 2. Определение параметров молекулярной составляющей удельной силы трения

- 1. Рассчитать для каждого опыта, т. е. для каждой нагрузки N, значения $N^{-1/3}$. Результат расчетов занести в табл. 1.
- 2. Построить график зависимости коэффициента трения от нагрузки в координатах $f = f(N^{-1/3})$. Обработку массива данных $(f, N^{-1/3})$ рекомендуется выполнять по методу наименьших квадратов с применением ЭВМ. Если экспери-

ментальная зависимость в указанных координатах достаточно хорошо аппроксимируется прямой линией, то это подтверждает справедливость уравнения (7).

- 3. Определить пьезокоэффициент β экстраполированием прямой $f = f(N^{-1/3})$ до значения N = 0, т. е. до пересечения с осью ординат.
 - 4. Рассчитать параметр τ_0 по углу наклона прямой к оси абсцисс:

$$\tau_0 = \frac{1}{k_y} \frac{\Delta f}{\Delta \left(N^{-\frac{1}{3}} \right)},$$

где коэффициент k_y рассчитывается по формуле (8). Физико-механические характеристики материалов образца и шарика (E_1 и E_2 , μ_1 и μ_2) определить по справочной литературе и занести их значения в табл. 2.

5. Результаты расчетов занести в табл. 2.

Таблица 2

№	Материал		E , H/ M^2	μ	$I, M^2/H$	r, mm	k_y	τ_0 , H/ M^2	β
1	Образец					1			
2	Шарик								

6. Проанализировать полученные результаты. Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

- 1. Какова физическая природа внешнего трения? Какова природа молекулярной и механической составляющих силы трения?
 - 2. Что называют коэффициентом трения, удельной силой трения?
 - 3. Что такое трение покоя, статический коэффициент трения?
- 4. Поясните биноминальный закон молекулярной составляющей удельной силы трения. Каков физический смысл параметров τ_0 и β ? Что такое фактическое контактное давление p_r ?
- 5. Поясните устройство и принцип работы микротрибометра, используемого в данной лабораторной работе.
- 6. Как рассчитываются в данной лабораторной работе значения параметров τ_0 и β ?
- 7. Какие существуют методы измерения коэффициентов трения f и параметров удельной силы трения τ_0 и β ?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ В ПОДШИПНИКЕ КАЧЕНИЯ

Цель работы: определение коэффициента трения в радиальном шариковом подшипнике качения.

Приборы и принадлежности: маятник, секундомер.

Теоретическое введение

Трением качения называется трение движения двух тел, при котором их скорости в точках касания равны по величине и направлению. Впервые объяснение природы силы сопротивления, возникающей при качении катка по плоской поверхности, предложил Ш. Кулон в 1785 г. Оно состоит в следующем.

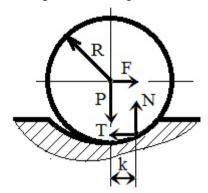


Рис. 1. Качение жесткого катка по деформируемому полупространству

Рассмотрим равномерное качение абсолютно жесткого (недеформируемого) катка радиусом R по деформируемому полупространству (рис. 1). На каток действуют вертикальная сила P и горизонтальная сила F, которая заставляет его катиться. Со стороны полупространства на каток действуют силы: N — нормальная реакция опоры и T — сила сопротивления качению (сила трения качения). Вследствие деформации полупространства нормальная реакция N смещена относительно линии действия си-

лы P на расстояние k (см. рис. 1). Из уравнений равновесия F = T; P = N; Nk = FR получаем выражение для величины k:

$$k=\frac{FR}{P}.$$

Следуя концепции Ш. Кулона, величину k называют коэффициентом трения качения. Очевидно, что величина k имеет размерность длины, в отличие от безразмерного коэффициента трения скольжения.

По современным представлениям основными причинами возникновения сопротивления качению считаются упругий гистерезис при деформировании контактирующих тел, микропроскальзывание в зоне контакта и адгезионное взаимодействие контактирующих тел.

Упругий гистерезис является следствием того, что реальные контактирующие тела не абсолютно упругие. Например, при качении жесткого катка по упругому полупространству (см. рис. 1) материал полупространства поочередно деформируется катком (сжимается) и восстанавливается после его прохождения. Если бы материал полупространства был идеально упругим, то энергия, затраченная на его деформирование при сжатии, равнялась бы энергии, выделившейся при восстановлении, т. е. потери энергии отсутствовали бы, следовательно, сила трения также отсутствовала бы. Реальные материалы не являются

идеально упругими, т. е. энергия, затраченная на деформирование материала, не возвращается полностью при его восстановлении, часть энергии рассеивается (переходит во внутреннюю энергию, в результате чего контактирующие тела нагреваются). Это рассеяние (диссипация) энергии и является одной из причин сопротивления качению.

Вторая составляющая сопротивления качению обусловлена взаимным проскальзыванием контактирующих тел по поверхности контакта. Поверхностные слои полупространства в зоне контакта его с катком растянуты, а поверхностные слои катка — сжаты (рис. 2). Вследствие этого на границе раздела контактирующих тел возникает проскальзывание, в результате чего также происходит диссипация энергии.

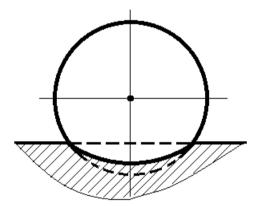


Рис. 2. Деформация контактирующих тел (пунктиром показаны исходные профили недеформированных тел)

Третьей причиной возникновения сопротивления качению может быть адгезионное взаимодействие контактирующих тел. При качении происходит постоянное обновление контакта в направлении движения, сопровождающееся образованием и разрывом адгезионных связей.

Роль перечисленных составляющих сопротивления качению зависит от условий трения. Потери, связанные с микропроскальзыванием, характерны для большинства механизмов. Состав-

ляющая, обусловленная гистерезисом, относительно мала для материалов с высоким модулем упругости и твердостью (закаленные стали), но существенна для материалов с малым модулем упругости (полимеры, резины и т. п.). Адгезионное взаимодействие может играть заметную роль при контактировании чистых металлических поверхностей и существенно уменьшается при наличии на поверхности контактирующих тел адсорбированных пленок, в том числе смазочного материала.

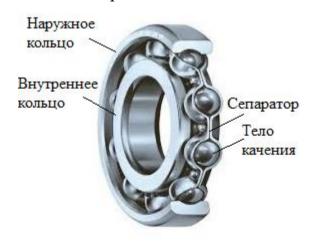


Рис. 3. Подшипник качения

Поскольку потери энергии при качении деталей друг по другу обычно намного меньше потерь энергии при их относительном скольжении, замена трения скольжения трением качения широко используется в различных узлах трения. Примером таких узлов могут служить подшипники качения. На рис. 3 изображен радиальный шариковый подшипник качения, состоящий из внешнего и внутреннего колец и находящихся между ними тел качения, разделенных сепаратором. Кроме

шариков, в качестве тел качения используются ролики, особенно в тяжело нагруженных подшипниках.

Подшипник называется радиальным, если нагрузка на него перпендикулярна оси вращения колец, и упорным, если нагрузка на подшипник направлена вдоль оси вращения колец. Существуют также радиально-упорные подшипники, способные нести как радиальную, так и осевую нагрузки.

Потери энергии в подшипниках качения обусловлены несколькими причинами. Основные из них следующие:

- 1. Трение качения между телами качения (шарики или ролики) и кольцами подшипника. Природа этого трения описана выше.
 - 2. Трение тел качения о сепаратор.
 - 3. Внутреннее трение в смазочном материале.

При небольших нагрузках и пластичном смазочном материале момент трения может быть выражен формулой

$$M_{\rm Tp} = \frac{1}{2} f_{\rm \Pi p} P d, \tag{1}$$

где $f_{\rm np}$ — приведенный коэффициент трения (безразмерная величина); P — нагрузка на подшипник; d — диаметр посадочного отверстия подшипника. Приведенный коэффициент трения $f_{\rm np}$ в зависимости от условий работы и типа подшипника принимает значения $0{,}001 < f_{\rm np} < 0{,}02$.

Описание экспериментальной установки и методики эксперимента

В данной лабораторной работе для экспериментального определения коэффициента трения качения используются затухающие механические колебания маятника, размещенного на установке, внешний вид которой изображен на рис. 4. Маятник 1 с помощью подшипниковой опоры 2 закреплен на стойке 3. Стойка 3 крепится к основанию 4, на лицевой панели которого расположена шкала секундомера 5 и кнопки управления. К стойке 3 крепится шкала 6 для измерения отклонений маятника в процессе колебаний. Подвижные грузы 7 позволяют менять расположение центра масс маятника.

Если маятник вывести из положения равновесия и отпустить, он будет совершать затухающие колебания. По затуханию колебаний (по изменению амплитуды колебаний во времени) можно определить коэффициент трения в подшипниках $f_{\rm np}$. Для этого воспользуемся законом сохранения энергии. При первоначальном отклонении маятника на угол ϕ_0 его центр масс C (рис. 4) поднимается на высоту $h_0 = l(1-\cos\phi_0)$, при этом его потенциальная энергия будет равна

$$E_0 = mgh_0 = mgl(1 - \cos\varphi_0),$$

где m – масса маятника; l – расстояние от оси вращения маятника до центра масс.

В конце первого полупериода колебаний маятник отклонится в противоположную сторону на угол $\phi_{0.5}$ и его потенциальная энергия будет равна

$$E_{0,5} = mgl\left(1 - \cos\varphi_{0,5}\right).$$

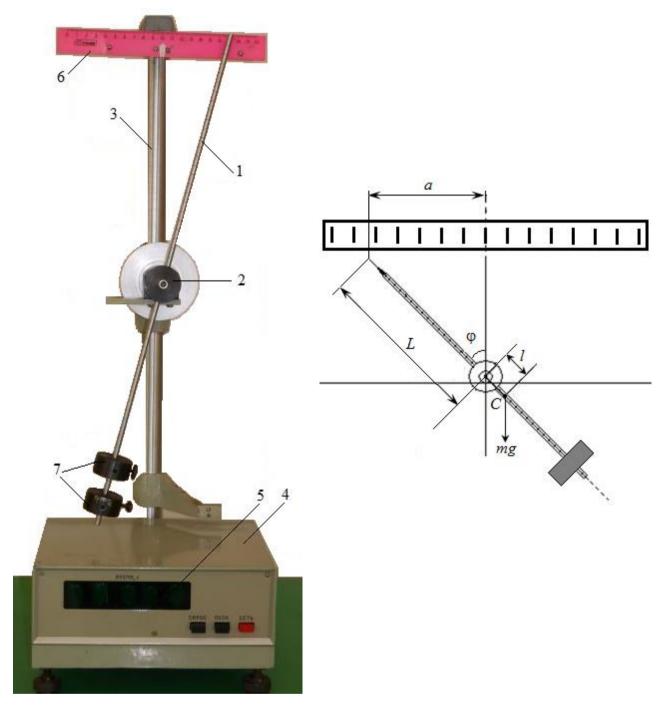


Рис. 4. Внешний вид экспериментальной установки и схема маятника

Воспользовавшись известным из тригонометрии соотношением $1-\cos\phi=2\sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)$, получим величину изменения потенциальной энергии маятника за первый полупериод колебаний:

$$\Delta E_{0,5} = E_0 - E_1 = 2mgl\left(\sin^2\frac{\varphi_0}{2} - \sin^2\frac{\varphi_{0,5}}{2}\right). \tag{2}$$

При малых углах $\sin \varphi \approx \varphi$, поэтому формулу (2) можно записать в виде

$$\Delta E_{0,5} = \frac{1}{2} mgl \left(\varphi_0^2 - \varphi_{0,5}^2 \right). \tag{3}$$

Пренебрегая силой сопротивления воздуха, можно приравнять изменение потенциальной энергии маятника за первый полупериод работе момента сил трения в подшипнике за этот же полупериод, которая (с учетом выражения (1)), равна

$$A_{0,5} = M_{\rm TP} \left(\varphi_0 + \varphi_{0,5} \right) = \frac{1}{2} f_{\rm IIP} mgd \left(\varphi_0 + \varphi_{0,5} \right), \tag{4}$$

где в скобках записана величина угла поворота маятника за первый полупериод.

На основании уравнений (3) и (4) из равенства $\Delta E_{0,5} = A_{0,5}$ получим изменение угла отклонения маятника за первый полупериод колебаний:

$$\varphi_0 - \varphi_{0,5} = \frac{f_{\pi p}d}{l}.$$
 (5)

Рассуждая совершенно аналогично, для второго полупериода получим изменение угла отклонения маятника в виде

$$\varphi_{0,5} - \varphi_1 = \frac{f_{\pi p}d}{l},\tag{6}$$

где $\phi_{0,5}$ и ϕ_1 — углы отклонения маятника в начале и в конце второго полупериода.

Итого, согласно уравнениям (5) и (6), за каждый период колебаний изменение угла отклонения маятника составит величину $\Delta \varphi = 2 \frac{f_{\rm np} d}{l}$. Соответственно, за n периодов колебаний $\varphi_0 - \varphi n = n \Delta \varphi = 2n \frac{f_{\rm np} d}{l}$, откуда для коэффициента трения в подшипнике получаем формулу

$$f_{\text{пр}} = \frac{l}{2nd} (\varphi_0 - \varphi_n). \tag{7}$$

В экспериментальной установке, используемой в данной работе, измеряют не углы отклонения маятника φ , а линейные отклонения a, отсчитываемые по шкале 6 (см. рис. 4 и 5). Установим связь угла поворота маятника φ с отклонением a. Из рис. 5 видно, что $a = L\sin\varphi$. Поскольку при малых углах $\sin\varphi \approx \varphi$, то смещение $a = L\varphi$, и из формулы (7) получаем окончательную расчетную зависимость для коэффициента трения в подшипнике:

$$f_{\rm np} = \frac{l}{2nLd} (a_0 - a_n). \tag{8}$$

Порядок выполнения работы

- 1. Отклонить маятник на угол 5–10° от положения равновесия.
- 2. Освободив маятник, одновременно включить секундомер и замерить время *п* полных периодов колебания (*число колебаний задается преподавателем*). Результат измерения занести в табл. 1. Повторить измерения еще два раза, затем вычислить среднее значение периода колебаний.

Таблица 1

$N_{\underline{0}}$	Число колебаний п	Время <i>t</i> , с	Период $T = t/n$, с	$T_{\rm cp},{ m c}$
1				
2				
3				

- 3. Отклонить маятник на угол 5– 10° влево и записать в табл. 2 начальное отклонение маятника a_0 на шкале 6.
- 4. Освободив маятник, одновременно включить секундомер и замерить время, за которое максимальное отклонение его влево уменьшится до значения a_n по шкале 6 (значение a_n задается преподавателем). Результат измерения занести в табл. 2.

Повторить измерения еще не менее двух раз, отклоняя маятник влево от положения равновесия.

- 5. Отклонить маятник на угол 5– 10° вправо и записать начальное отклонение маятника a_0 на шкале 6.
- 6. Освободив маятник, одновременно включить секундомер и замерить время, за которое максимальное отклонение его вправо уменьшится до значения a_n по шкале 6. Результат измерения занести в табл. 2.

Повторить измерения еще не менее двух раз, отклоняя маятник вправо от положения равновесия.

7. Рассчитать число колебаний n и значения коэффициента трения качения в подшипнике $f_{\rm np}$ по формуле (8). Результаты записать в табл. 2.

Таблина 2

$L = \dots$	•		<i>l</i> =			<i>d</i> =		,
№ опыта	Отклонение	<i>a</i> ₀ , MM	a_n , MM	<i>t</i> , c	$n=t/T_{\rm cp}$	$f_{\Pi \mathrm{p}}$	$\Delta f_{\Pi p}$	$(\Delta f_{\rm np})^2$
1								
2								
3	Влево							
4								
5								
6								
7								
8	Вправо							
9		·						
10		·						

8. Вычислить среднее значение коэффициента трения качения в подшипнике $f_{\rm np}$, доверительный интервал Δ_f и относительную погрешность эксперимента E (см. прилож. 1).

Результат работы

1. Записать экспериментальные значения коэффициентов трения качения:

$$f_{\text{пр}} = f_{\text{пр cp.}} \pm \Delta_f = \dots;$$
 $E = \dots\%.$

2. Сравнить экспериментально определенное значение коэффициента трения $f_{\rm np}$ с табличным (см. прилож. 2) и сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

- 1. Какова природа силы трения качения?
- 2. Что называется коэффициентом трения качения? Какова его размерность?
 - 3. Существует ли безразмерный коэффициент трения качения?
- 4. Нарисуйте колесо, катящееся *свободно* по плоской поверхности, и покажите на рисунке силы и моменты сил, приложенные к колесу. Нарисуйте аналогичный рисунок для колеса, катящегося под действием приложенного к нему *движущего* момента сил (например, ведущее колесо автомобиля).
- 5. Как с физической точки зрения можно обосновать справедливость известного практического совета «круглое кати»?
 - 6. Как уменьшить силу трения качения?
- 7. Почему колебания маятника, используемого в данной лабораторной работе, затухают со временем? Как изменяется во времени амплитуда этих колебаний?
- 8. Отклонив первоначально маятник на некоторый угол от положения равновесия, вы сообщили ему определенный запас потенциальной энергии. В конце концов колебания маятника прекратятся, и он вернется в исходное положение. Куда девалась сообщенная ему энергия?
- 9. Как устроен подшипник качения? Какие конструкции подшипников качения используются в машиностроении и приборостроении?
- 10. Каковы преимущества и недостатки подшипников качения по сравнению с подшипниками скольжения?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА МЕТОДОМ СТОКСА

Цель работы: изучение принципа действия вискозиметра с падающим шариком. Экспериментальное определение коэффициента динамической вязкости жидкого смазочного материала (масла).

Приборы и принадлежности: цилиндрический сосуд с жидким смазочным материалом, секундомер, микрометр, металлические шарики.

Теоретическое введение

Вязкость (внутреннее трение) проявляется в сопротивлении перемещению одного слоя среды относительно другого. В жидкостях вязкость обусловлена в основном силами притяжения молекул. Другой причиной, в жидкостях играющей незначительную роль (в отличие от газов), является перенос импульса между слоями при скачкообразном переходе молекул из слоя в слой. В результате такого перехода молекул импульс более быстрого слоя уменьшается, а импульс более медленного – возрастает.

При движении тел в вязкой жидкости возникает сила сопротивления этому движению. При малых скоростях движения тела причина сопротивления следующая. Слой жидкости, прилегающий к телу, движется с ним как одно целое, увлекая за счет внутреннего трения соседние слои. Очевидно, что вдали от тела жидкость остается невозмущенной движением тела, т. е. различные слои жидкости движутся с разными скоростями, в жидкости возникает градиент скорости и, как следствие, сила сопротивления движению тела.

При малых скоростях движения тела в вязкой среде сила сопротивления \vec{F}_{c} пропорциональна скорости тела \vec{v} :

$$\vec{F}_{\rm c} = -b\vec{v},\tag{1}$$

где b – коэффициент сопротивления среды.

Величина силы сопротивления также зависит от природы жидкости или газа, формы и размеров тела и внешних условий (температура, давление). Например, для шара радиусом r коэффициент сопротивления $b=6\pi\eta r$, тогда уравнение (1) приобретает вид:

$$F_{\rm c} = 6\pi\eta r v. \tag{2}$$

Физическая величина η, входящая в формулу (2), называется коэффициентом внутреннего трения, или коэффициентом динамической вязкости, или просто вязкостью (динамической вязкостью). Как следует из формулы (2), коэффициент динамической вязкости η в системе СИ имеет размерность Па·с.

Силу сопротивления, определяемую выражением (2), часто называют силой Стокса. Она справедлива только для так называемого ламинарного обтека-

ния шара жидкостью, когда движение шара происходит без образования завихрений. Условие ламинарного обтекания следующее:

$$Re < 1, \tag{3}$$

где Re $=\frac{\sigma vr}{\eta}$ — так называемое число (критерий) Рейнольдса; σ — плотность вязкой среды.

Вязкость жидких смазочных материалов (масел) является одной из их основных триботехнических характеристик и важным параметром, влияющим на работу узла трения в гидродинамическом режиме. Вязкость жидкостей зависит от их природы и внешних факторов (температуры и давления).

Температура очень сильно влияет на вязкость жидких смазочных материалов, которая может снизиться в несколько раз при нагревании всего на 10 градусов (рис. 1).

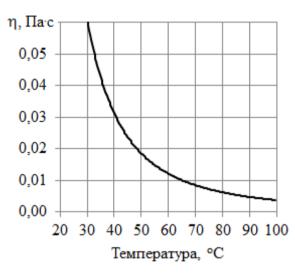


Рис. 1. Пример температурной зависимости вязкости (смазочный материал – масло индустриальное)

В небольшом диапазоне температур T, не превышающих 100 °C, изменение коэффициента динамической вязкости можно описать приближенной формулой

$$\eta_2 = \eta_1 e^{-\beta(T_2 - T_1)}.$$
(4)

Для наиболее распространенных минеральных масел в диапазоне температур 20...100 °C коэффициент $\beta \approx 0.03...0.06$. Меньшие значения коэффициента β имеют маловязкие масла, большие — высоковязкие.

Вязкость силиконовых масел зависит от температуры гораздо слабее, для них в том же температурном диапазоне $\beta \approx 0.02$.

При температурах не более $100\ ^{\circ}\mathrm{C}$ можно воспользоваться другой приближенной формулой

$$\eta_t = \eta_{50} \left(\frac{50}{t}\right)^m,\tag{5}$$

где η_{50} — коэффициент вязкости при 50 °C; t — температура в °C. Для минеральных масел коэффициент $m\approx 1,5...2,5$ в диапазоне температур 20...50 °C и $m\approx 2...3$ в диапазоне 50...100 °C.

Зависимость динамической вязкости от давления p обычно выражают формулой

$$\eta_p = \eta_0 e^{\alpha p},$$

где η_0 – коэффициент вязкости при нормальном атмосферном давлении, пьезо-коэффициент $\alpha = (1,5...2,5)\cdot 10^{-2}$ МПа⁻¹ для минеральных масел и $\alpha = (2,5...3,5)\cdot 10^{-2}$ МПа⁻¹ для синтетических.

Наряду с коэффициентом динамической вязкости в технике применяется коэффициент кинематической вязкости (кинематическая вязкость) v, равный отношению динамической вязкости к плотности вязкой среды:

$$v = \eta/\sigma. \tag{6}$$

Размерность кинематической вязкости в системе $CИ - M^2/c$.

Приборы для измерения вязкости называются *вискозиметрами*. Они бывают капиллярными, ротационными, с движущимся шариком и других типов.

Принцип действия *капиллярных вискозиметров* основан на измерении времени протекания заданного объёма исследуемой жидкости или газа через капилляр при известной разности давлений на его концах. Принцип действия *ротационных вискозиметров* основан на измерении момента сопротивления относительному вращению двух соосных тел (например, цилиндров, конусов, дисков), пространство между которыми заполнено исследуемой жидкостью.

Принцип действия вискозиметров с движущимся (падающим) шариком основан на формуле Стокса, устанавливающей зависимость силы сопротивления $F_{\rm c}$ от вязкости η (см. формулу 2). Вязкость определяют по времени прохождения шариком заданного расстояния, чаще всего при его падении в вязкой среде под действием силы тяжести.

Описание метода измерений и экспериментальной установки

Рассмотрим метод Стокса для измерения коэффициента динамической вязкости жидкости применительно к данной лабораторной работе.

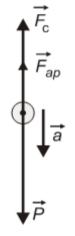


Рис. 2. Силы, действующие на шарик

Для вывода расчетной формулы для коэффициента динамической вязкости рассмотрим движение шарика массой m и радиусом r, погружающегося в жидкости (рис. 2).

На шарик действуют силы: сила тяжести \vec{P} , выталкивающая сила (сила Архимеда) \vec{F}_{ap} и сила сопротивления $\vec{F_c}$. Согласно второму закону Ньютона, уравнение движения шарика в проекции на направление движения имеет вид

$$ma = P - F_{ap} - F_c, (7)$$

где a — ускорение шарика.

Особенностью этого уравнения является присутствие в правой части силы сопротивления $F_{\rm c}$, зависящей от скорости движения. Так как величина $P-F_{an}={\rm const.}$, а сила

сопротивления растет с увеличением скорости, то модуль ускорения шарика будет уменьшаться от начального значения до нуля и (начиная с некоторого момента времени) шарик начнет погружаться с постоянной, «установившейся» скоростью. В этом случае уравнение (7) принимает вид

$$P - F_{ap} - F_c = 0. (8)$$

Сила тяжести и сила Архимеда равны соответственно

$$P = mg = \rho gV, \qquad F_{ap} = \sigma gV, \tag{9}$$

где g — ускорение свободного падения; ρ — плотность материала шарика; $V=\frac{4}{3}\pi r^3$ — объем шарика; σ — плотность жидкости. Тогда из уравнения (8) с учетом формул (9) имеем

$$\frac{4}{3}\pi r^3 g(\rho - \sigma) - 6\pi \eta r v = 0. \tag{10}$$

Полагая в формуле (10) радиус шарика r = d/2, где d — диаметр шарика, для расчета коэффициента вязкости получим следующее выражение:

$$\eta = \frac{(\rho - \sigma)gd^2}{18v}.\tag{11}$$

При равномерном движении шарика его установившаяся скорость v = S/t, где t – время прохождения шариком пути S, поэтому выражение (11) примет вид

$$\eta = \frac{(\rho - \sigma)gd^2t}{18S} \,. \tag{12}$$

Уравнение (12) справедливо для движения шарика в неограниченном пространстве.

Вискозиметр, используемый в данной работе, представляет собой стеклянный цилиндрический сосуд 1 (рис. 3), укрепленный на жестком штативе. Сосуд заполнен исследуемой вязкой жидкостью, в которой движется шарик. Движение шарика по оси сосуда 1 обеспечивает центрирующий конус 4.

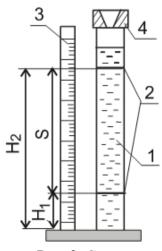


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

При погружении шарика вдоль оси цилиндрического сосуда 1, имеющего внутренний диаметр D=36 мм, необходимо учитывать влияние стенок сосуда. С учетом поправок на конечный размер сосуда формула (12) примет вид

$$\eta = \frac{(\rho - \sigma)gd^2t}{18S\left(1 + 2A\frac{d}{D}\right)}.$$
 (13)

Таким образом, коэффициент динамической вязкости η может быть рассчитан по формуле (13), если при известных значениях плотности жидкости и материала шарика по результатам эксперимента определить время t, за которое шарик диаметром d

проходит путь S. Пройденный путь определяется по шкале 3. Для этого на поверхности цилиндра установлены две горизонтальные метки 2 на расстояниях H_1 и H_2 от дна сосуда. Тогда $S = H_2 - H_1$. Время погружения шарика t измеряется секундомером с точностью 0,2 с. Диаметр шарика d измеряется пять раз микрометром с точностью 0,01 мм.

Порядок выполнения работы

- 1. Измерить расстояние S между метками 2 (см. рис. 3) на поверхности сосуда. Результат измерения занести в таблицу.
- 2. Выбрать один из предложенных для эксперимента шариков и измерить его диаметр в пяти различных направлениях. Результаты измерений занести в таблицу.
- 3. Опустить шарик в центрирующий конус сосуда и измерить время его движения между метками на поверхности сосуда. Полученное значение времени занести в таблицу.
 - 4. Повторить пп. 2 и 3 для второго, третьего, четвертого и пятого шариков.

$\sigma = 0.85$ ·	$\sigma = 0.85 \cdot 10^3 \text{kg/m}^3$		$\rho = 2$,	7·10 ³ кг/м ³	S =		
№ шарика	d	<i>l</i> , мм	< <i>d</i> >, мм	t, c	η, Па∙с	Δη	$(\Delta\eta)^2$
1	1 2 3 4 5						
2	1 2 3 4 5						
и т. д.							

Обработка результатов эксперимента

- 1. Рассчитать среднее значение диаметра <*d*> каждого шарика и полученные значения занести в таблицу.
- 2. Для каждого опыта по формуле (13) по среднему значению диаметра <*d>* рассчитать значение коэффициента вязкости в системе СИ. Результаты занести в таблицу.
- 3. Рассчитать среднее значение коэффициента вязкости $\langle \eta \rangle$, доверительный интервал Δ_{η} и относительную погрешность эксперимента E (см. прилож. 1).
- 4. Проверить правомерность применения формулы (2) с помощью критерия Рейнольдса формулы (3).
 - 5. Рассчитать коэффициент кинематической вязкости по формуле (6).

Результат работы

1. Записать значение коэффициента динамической вязкости в виде

$$\eta = \langle \eta \rangle \pm \Delta_{\eta} \operatorname{\Pia\cdot c}, \qquad E = \dots \%.$$

2. Записать значение коэффициента кинематической вязкости:

$$v = \dots M^2/c$$
.

Контрольные вопросы

- 1. Объясните сущность метода Стокса для определения коэффициента вязкости жидкости.
- 2. Что называется динамической вязкостью (коэффициентом динамической вязкости) жидкости? От чего она зависит? В каких единицах она измеряется?
- 3. Что такое коэффициент кинематической вязкости? Как он связан с коэффициентом динамической вязкости? В каких единицах он измеряется?
- 4. Одинаковы ли температурные зависимости динамической и кинематической вязкостей жидкости?
- 5. Приведите примеры узлов трения, в которых вязкость смазочного материала имеет первостепенное значение и в которых ее роль не главная.
- 6. В технической документации на смазочные материалы принято указывать вязкость при температуре 40 °C. Оцените по формулам (4) и (5) динамическую вязкость используемого в данной лабораторной работе масла при t=40 °C, приняв $\beta\approx 0.04$ и $m\approx 2.5$. Оцените также кинематическую вязкость этого масла при температуре 40 °C.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ В КОНТАКТЕ ГИБКОЙ ЛЕНТЫ СО СТАЛЬНЫМ ШКИВОМ

Цель работы: определение коэффициента трения гибкой ленты по металлическому шкиву.

Приборы и принадлежности: прибор для определения коэффициента трения, разновесы.

Теоретическое введение

Природа внешнего трения. Сила внешнего трения возникает на границе раздела соприкасающихся тел при смещении одного из них по поверхности другого. Силу трения можно разделить на две составляющие: молекулярную и механическую. Молекулярная составляющая представляет собой сопротивление сдвигу, вызванное силами притяжения между молекулами контактирующих тел. Механическая составляющая возникает в результате сопротивления деформированию микронеровностей на поверхностях контактирующих тел при их взаимном смещении. Как молекулярная, так и механическая составляющие силы трения формируются на фактической площади контакта (ФПК), образующейся в результате деформации микронеровностей контактирующих поверхностей. Фактическая площадь контакта обычно составляет малую часть от номинальной (геометрической) площади и зависит от нормальной нагрузки, формы шероховатых поверхностей и физико-механических характеристик материалов: модуля упругости, предела текучести и др.

Работа, затрачиваемая на преодоление сил трения, переходит во внутреннюю энергию тел. Диссипация энергии приводит к нагреванию поверхностей, их окислению и другим изменениям, вызывающим, в свою очередь, изменение силы трения.

По кинематическим признакам различают трение покоя и трение движения, которое, в свою очередь, делится на трение скольжения и трение качения. В зависимости от наличия смазки и характера ее влияния различают следующие разновидности трения: трение без смазочного материала и трение со смазочным материалом (при граничной смазке, жидкостной смазке, твердой смазке и газовой смазке). При трении без смазочного материала смазка отсутствует, поверхности покрыты окисными пленками и адсорбированными слоями молекул воды, газа и других веществ. При граничной смазке поверхности разделены тонким слоем смазки, обычно толщиной в несколько слоев молекул.

Таким образом, сила трения

$$F = F_{\text{MOЛ}} + F_{\text{MEX}} = \tau A_r = (\tau_{\text{MOЛ}} + \tau_{\text{MEX}}) A_r, \tag{1}$$

где τ , $\tau_{\text{мол}}$ и $\tau_{\text{мех}}$ — полная удельная сила трения, ее молекулярная и механическая составляющие; A_r — фактическая площадь контакта.

Коэффициент трения скольжения – отношение силы трения к нормальной силе, прижимающей контактирующие тела друг к другу:

$$f = \frac{F}{N} = \frac{F}{\sigma_n A_r} = \frac{\tau}{\sigma_n} = \frac{\tau_{\text{MOЛ}}}{\sigma_n} + \frac{\tau_{\text{MEX}}}{\sigma_n} = f_{\text{MОЛ}} + f_{\text{MEX}}, \qquad (2)$$

где σ_n — среднее фактическое давление в контакте; $f_{\text{мол}}$ и $f_{\text{мех}}$ — молекулярная и механическая составляющие коэффициента трения.

Молекулярная составляющая удельной силы трения является линейной функцией фактического давления в контакте:

$$\tau_{\text{мол}} = \tau_0 + \beta \sigma_n, \tag{3}$$

где τ_0 и β – константы для данной пары трения.

Из формул (2) и (3) следует, что

$$f_{\text{мол}} = \frac{\tau_0}{\sigma_n} + \beta. \tag{4}$$

Механическая составляющая силы трения зависит от деформации выступов шероховатости контактирующих поверхностей и является сложной функцией нагрузки, геометрических и физико-механических характеристик контактирующих поверхностей. Учитывая, что в условиях контактирования гладких поверхностей молекулярная составляющая значительно выше, чем механическая, последней можно пренебречь. Однако такое приближение не всегда приемлемо, особенно в случае трения полимеров.

В инженерных расчетах в целях их упрощения коэффициент трения часто считают постоянной величиной, что возможно, согласно формуле (4), если $\frac{\tau_0}{\sigma_n} \ll \beta$ или если $\sigma_n = \text{const.}$

Трение в контакте гибкой ленты с цилиндрическим шкивом. В машиностроении и приборостроении для передачи движения от ведущего звена к ведомому широко используют гибкие элементы (клиновые и плоские ремни и т. п.) Передача движения осуществляется за счет силы трения между гибким элементом и рабочей поверхностью шкива (барабана, блока, и т. п.). Другим примером достаточно распространенной конструкции, где используется трение между гибкой лентой и вращающимся шкивом, является ленточный тормоз. Для расчета силы трения в вышеупомянутых конструкциях используют формулу, выведенную Леонардом Эйлером.

Л. Эйлер, считая коэффициент трения постоянным, вывел формулу, связывающую силы натяжения в набегающей и сбегающей ветвях гибкого элемента (ленты, нити), скользящего по цилиндрическому шкиву. Рассматривая равновесие элемента гибкой ленты (рис. 1), можно записать:

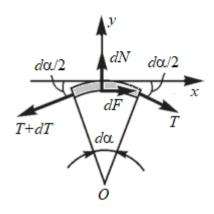


Рис. 1. Равновесие элемента гибкой нити

$$dF - dT\cos\left(\frac{d\alpha}{2}\right) = 0;$$

$$dN - 2T\sin\left(\frac{d\alpha}{2}\right) - dT\sin\left(\frac{d\alpha}{2}\right) = 0. \quad (5)$$

Поскольку $\cos\left(\frac{d\alpha}{2}\right)\approx 1$ и $\sin\left(\frac{d\alpha}{2}\right)\approx \frac{d\alpha}{2}$, то, пренебрегая бесконечно малыми величинами 2-го порядка малости, получим:

$$\begin{cases}
dF = dT; \\
dN = Td\alpha.
\end{cases}$$
(6)

Учитывая, что сила трения dF = f dN, из уравнений (6) получаем дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными:

$$\frac{dT}{T} = f d\alpha. (7)$$

Уравнение (7) решается простым интегрированием обеих частей:

$$\int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = f \int_0^{\alpha_k} d\alpha.$$

В результате получаем формулу Эйлера:

$$T_2 = T_1 e^{f\alpha_k}, (8)$$

где T_1 и T_2 – силы натяжения в ветвях гибкой ленты; α_k – угол охвата шкива гибкой лентой.

Формула Эйлера успешно применяется для расчета канатных, ременных передач, сил натяжения в текстильных нитях, транспортерных лентах и т. д. Эту формулу можно использовать для вычисления коэффициента трения в контакте гибкого элемента со шкивом. Для этого в данной работе используется лабораторная установка, известная как маятник Обербека.

Описание экспериментальной установки и методики эксперимента

Лабораторная установка показана на рис. 2.

Втулка 1 с двумя шкивами разных радиусов R и r и крестовиной маятника, образованной стержнями 2 с грузами 3 на концах, закреплена на оси, которая вращается в подшипниках. На шкив большего радиуса R намотана нить 4, перекинутая через блок 5. К концу нити 4 привязан подвес с гирями 6 общей массой m. Шкив малого радиуса r охватывается гибкой лентой 7. Одним концом лента 7 жестко крепится к основанию установки, к другому концу ленты 7 подвешен груз 8 массой m_1 . Вертикальное положение подвеса с гирями 6 фиксируется с помощью линейки 9.

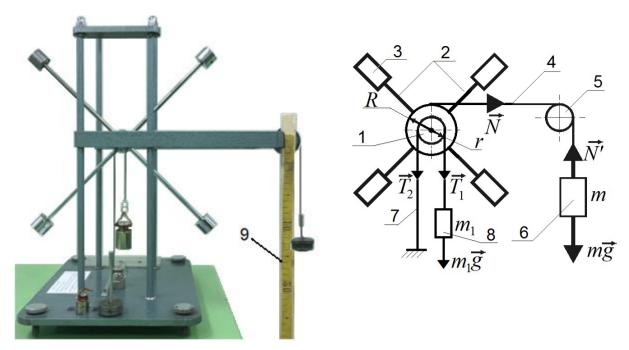


Рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки и схема маятника

Схематически контакт гибкой ленты со шкивом, вращающимся с угловой скоростью ω , показан на рис. 3. Соотношение сил натяжения ленты T_1 и T_2 определяется формулой (8). В описываемой установке $\alpha = \pi$.

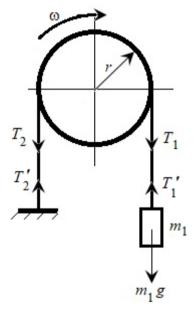


Рис. 3. Схема контакта гибкой ленты со шкивом

Поскольку груз m_1 неподвижен, очевидно, что $T_1 = T_1' = m_1 g$. Тогда для момента трения в контакте ленты со шкивом можно записать

$$M_{\rm Tp} = r(T_2 - T_1) = m_1 gr(e^{f\alpha} - 1).$$

Выражая из этого уравнения коэффициент трения, получим

$$f = \frac{1}{\alpha} \ln \left(1 + \frac{M_{\rm Tp}}{m_1 g r} \right). \tag{9}$$

Таким образом, коэффициент трения f можно рассчитать, определив экспериментально момент трения в контакте ленты со шкивом. Для этого воспользуемся фундаментальным законом сохранения энергии. В этом случае методика проведения экспериментов следующая. Вращая маятник, нить 4

наматывают на шкив радиуса R, поднимая при этом груз m в верхнее (исходное) положение, которое фиксируют по линейке 9. После освобождения маятника груз m начинает опускаться, раскручивая маятник. Когда груз m опустится в крайнее нижнее положение, которое определяется длиной нити, маятник продолжит по инерции вращаться, нить намотается на шкив радиусом R и груз m снова поднимется на некоторую высоту, меньшую первоначальной. Конечное положение маятника также фиксируют по линейке 9 (см. рис. 2). Очевидно, что

часть первоначального запаса энергии тратится на преодоление трения в подшипниках оси маятника и в контакте ленты со шкивом. Зная начальное и конечное положения маятника, можно оценить потери энергии и рассчитать момент трения и коэффициент трения ленты по шкиву.

Считая, что практически все потери энергии обусловлены трением в контакте ленты со шкивом и в подшипниках оси маятника, можно записать

$$mgh_1 - mgh_2 = M_{\text{comp}}\varphi, \tag{10}$$

где h_1 — расстояние по вертикали, на которое опускается груз m из первоначального положения; $h_2 < h_1$ — расстояние по вертикали, на которое поднимается груз после достижения им нижнего положения; $M_{\rm conp} = M_{\rm Tp} + M_0$ — суммарный момент сопротивления, $M_{\rm Tp}$ и M_0 — соответственно моменты трения в контакте ленты со шкивом и в подшипниках оси маятника; $\varphi = (h_1 + h_2)/R$ — полный угол поворота маятника. Из уравнения (10) получаем для момента сопротивления

$$M_{\rm conp} = mgR \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2}. \tag{11}$$

Момент трения в подшипниках оси маятника M_0 рассчитывается по формуле (11) в отсутствии трения ленты по шкиву при массе груза $m_1 = 0$. Затем эксперимент повторяется несколько раз при различных значениях массы груза на ленте m_1 . Значения коэффициента трения в контакте ленты со шкивом рассчитываются по формуле (9), где $M_{\rm Tp} = M_{\rm conp} - M_0$ с последующим усреднением результата.

Порядок выполнения работы

Упражнение 1. Определение момента трения M_0 в подшипниках оси маятника

- 1. Ознакомиться с установкой и указаниями к ней.
- 2. Намотать нить на шкив с большим радиусом R так, чтобы основание подвеса находилось на расстоянии h_{\max} от пола (величина h_{\max} задается преподавателем из интервала 80...100 см).

Значения радиусов шкивов R и r и высоты h_{max} занести в табл. 1.

Таблица 1

R, mm	r, MM	$h_{\mathrm{max}},\mathrm{cm}$	h_0 , см

- 3. Отпустив подвес, размотать нить *полностью* так, чтобы подвес опустился в нижнее положение h_0 . Значение h_0 занести в табл. 1.
 - 4. Значение высоты $h_1 = h_{\text{max}} h_0$ занести в табл. 2.
- 5. Поместить на подвес гири из комплекта установки так, чтобы суммарная масса подвеса с гирями m составляла порядка 150 г. Величину массы m занести в табл. 2.

Таблица 2

No॒		m E h. ov	h_2 , см				$M_{*} = M_{*}$ II.
опыта	m , Γ	h_1 , см	1	2	3	Cp.	$M_0 = M_{ m conp},$ Нм
1							
2							
3							

- 6. Намотать нить на шкив большего радиуса так, чтобы подвес с гирями массой m занял положение h_{\max} . Отпустив подвес с гирями, дать ему возможность опуститься до нижнего положения h_0 и затем подняться на высоту h_{\min} , визуально зафиксировав ее значение. Значение высоты $h_2 = h_{\min} h_0$ занести в табл. 2.
 - 7. Повторить опыт (см. п. 6) еще два раза.
- 8. Выполнить пп. 5, 6 и 7 при других значениях массы подвеса с гирями m (порядка 200 и 250 г).

Упражнение 2. Определение момента трения M_{mp} в контакте ленты со шкивом и коэффициента трения

- 1. Подвесить к ленте 7 груз m_1 массой 50 г и выполнить пп. 5, 6, 7 и 8 упражнения 1. Результаты записать в табл. 3.
 - 2. Выполнить опыт с грузами $m_1 = 100$ и 150 г.

Таблица 3

Матери	Материалы ленты и шкива											
No	m_1 , Γ	т, г	h_1 ,		h_2 ,	СМ	I	$M_{\text{сопр}}$,	M_{Tp} ,	f	Δf	$(\Delta f)^2$
опыта	<i>m</i> 1, 1	<i>m</i> , 1	CM	1	2	3	Cp.	Н∙м	Н∙м	J	Δ)	(4))
1												
2	50											
3												
4												
5	100											
6												
7												
8	150											
9												

Обработка результатов экспериментов

- 1. Рассчитать среднее значение h_2 для каждой строки табл. 2.
- 2. Рассчитать по формуле (11) значения $M_0 = M_{\text{сопр}}$ для каждой строки табл. 2.
 - 3. Рассчитать среднее значение h_2 для каждой строки табл. 3.
 - 4. Рассчитать значение M_{conp} по формуле (11) для каждой строки табл. 3.

5. Рассчитать момент трения по формуле

$$M_{\rm TD} = M_{\rm comp} - M_0$$

где M_0 (взятое из табл. 2) и $M_{\text{сопр}}$ соответствуют одному и тому же значению массы подвеса с гирями m. Результаты расчетов записать в табл. 3.

- 6. Рассчитать значения коэффициента трения f по формуле (9) для каждой строки табл. 3.
- 7. Рассчитать среднее значение коэффициента трения < f>, доверительный интервал Δ_f и относительную погрешность эксперимента E (см. прилож. 1).

Результат работы

1. Записать значение коэффициента трения в виде

$$f = \langle f \rangle \pm \Delta_f;$$
 $E = \dots \%.$

2. Сравнить экспериментально определенное значение коэффициента трения с табличным (см. прилож. 2) и сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

- 1. Что такое внешнее трение? В чем его отличие от внутреннего?
- 2. Как различаются виды трения по кинематическому признаку? Какой вид трения вы исследовали в данной лабораторной работе?
- 3. Какова природа молекулярной и механической составляющих силы трения? Какая составляющая, по вашему мнению, преобладает в данной лабораторной работе?
 - 4. От каких факторов зависит коэффициент трения скольжения?
- 5. Поясните сущность метода определения коэффициента трения, используемого в данной лабораторной работе.
- 6. Какие величины экспериментально измеряют в ходе данной лабораторной работы для вычисления коэффициента трения? Как обрабатываются результаты измерения?
- 7. Почему в ременных передачах часто используют ремень клиновидной, а не плоской формы?
- 8. Известно, что с помощью каната, намотанного на кнехт (круглая металлическая тумба на палубе судна или на причале для крепления тросов), можно удержать гораздо больший груз, чем просто держа его на весу за привязанный к нему канат. Используя результаты, полученные в данной лабораторной работе, оцените, сможете ли вы таким образом удержать груз массой 100 кг?

СПИСОК ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Демкин Н.Б. Физические основы трения и износа машин. Калинин: КГУ, 1981. 115 с.
- 2. Крагельский И.В., Добычин Н.М., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
- 3. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин / В.Д. Зозуля [и др.]. Киев: Наук. думка, 1990. 264 с.
- 4. Пенкин Н.С., Пенкин А.Н., Сербин В.М. Основы трибологии и триботехники: учебное пособие. М.: Машиностроение, 2008. 206 с.
- 5. Доценко А.И., Буяновский И.А. Основы триботехники: учебник. М.: ИНФРА-М, 2014. 336 с.
- 7. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. М.: Физматлит, 2007. 368 с.
- 8. Горленко А.О., Горленко О.А., Проскурин А.С. Триботехнология: учебное пособие для академического бакалавриата. М.: Юрайт, 2017. 187 с.
- 9. Горленко О.А., Тихомиров В.П., Бишутин Г.А. Прикладная механика: триботехнические показатели качества машин: учебное пособие для академического бакалавриата. М.: Юрайт, 2017. 264 с.

приложения

Приложение 1

Обработка результатов измерения

Пусть в результате эксперимента получено n значений измеряемой величины $u: u_1, u_2, ..., u_n$.

Обработка результатов измерения включает в себя этапы:

1. Рассчитывается среднее значение измеряемой величины:

$$\langle u \rangle = \frac{\sum_{i=1}^{n} u_i}{n} = \frac{u_1 + u_2 + \dots + u_n}{n}.$$

2. Рассчитывается абсолютная погрешность каждого измерения:

$$\Delta u_i = |u_i - \langle u \rangle|$$
.

3. Рассчитывается квадрат абсолютной погрешности каждого измерения $(\Delta u_i)^2$. Рассчитывается их сумма:

$$\sum_{i=1}^{n} (\Delta u_i)^2 = (\Delta u_1)^2 + (\Delta u_2)^2 + \dots + (\Delta u_n)^2.$$

4. Рассчитывается доверительный интервал:

$$\Delta_{u} = t_{\alpha,n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\Delta u_{i})^{2}}{n(n-1)}},$$

где $t_{\alpha,n}$ — коэффициент Стьюдента, значение которого определяется по таблице в зависимости от числа опытов n и доверительной вероятности α .

Чем выше вероятность α , тем больше будет доверительный интервал.

Рекомендуется брать $\alpha = 0.95$.

Таблица значений коэффициента Стьюдента

α	3	4	5	6	7	8	9	10	15
0,70	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
0,95	4,3	3,2	2,8	2,6	2,4	2,4	2,3	2,3	2,1
0,99	9,9	5,8	4,6	4,0	3,7	3,5	3,4	3,3	3,0

5. Рассчитывается относительная погрешность измерения:

$$E = \frac{\Delta_u}{\langle u \rangle} \cdot 100 \%.$$

Результат измерения нужно представить в виде

$$u = \langle u \rangle \pm \Delta_u$$
, $E = \dots \%$,

где < u > - среднее значение измеряемой величины; Δ_u — доверительный интервал; E — относительная погрешность измерения.

Справочные данные

Таблица 1. Ориентировочные значения коэффициентов трения скольжения

	-	Моториони	Коэффициент трения f			
$N_{\underline{0}}$	Узел трения	Материалы	Без смазочного	Со смазочным		
		пары трения	материала	материалом		
		Сталь – сталь	0,15	0,04		
1	Торморо конономила	Сталь – чугун	0,25	_		
1	Тормоза колодочные	Сталь — бронза	0,16	0,12		
		Сталь – дерево	0,100,20	_		
2	Тормоза дисковые	Сталь – сталь	0,18	0,04		
	тормоза дисковые	Сталь – чугун	0,16	0,10		
		Сталь – чугун	0,150,20	0,10		
	Тормоза ленточные,	Сталь – кожа	0,200,35	_		
3	фрикционные передачи	Сталь – тканая лента	0,320,40	_		
	ит. π.	Чугун – капроновый	0,180,22	_		
		канат				
		Сталь – сталь	0,17	0,130,16		
4	Муфты сцепления	Сталь – неметалли-	0,200,30	0,140,17		
		ческий материал				
		Сталь – сталь	0,20,5	_		
	Подшипники	Сталь – ПТФЭ	0,050,3	_		
5	скольжения	(фторопласт)				
	скольжения	Сталь – бронзографит	0,10,4	_		
		Сталь – бронза	_	0,010,1		
6	Камневые опоры	Сталь – рубин	0,230,58	0,100,15		
U	Камневые опоры	Сталь – лейкосапфир	0,200,35	0,100,17		

Таблица 2. Ориентировочные значения коэффициентов трения качения

	Tuotinga 2. opiienin	1.1	принитов трения н	1
№	Узел трения	Материалы	<i>k</i> , мм	f_{\Pip}
	-	пары трения		V 1
		Сталь – сталь	0,05	
		Закаленная сталь –	0,008	
1	Цилиндр – плоскость	закаленная сталь		
		Дерево – дерево	0,50,6	
		Сталь – дерево	0,40,5	
	Подшипник качения:			
	шариковый радиальный			0,00150,002
2	шариковый упорный			0,00250,0035
	роликовый радиальный			0,0020,004
	роликовый упорный			0,0050,008
2	Колесо – дорожное	Пневм. шина – асфальт		0,010,02
3	покрытие	Пневм. шина – грунт		0,0230,033

Обозначения: $f_{\text{пр}}$ — приведенный коэффициент трения: $f_{\text{пр}} = M_{\text{тр}}/(r_{\text{в}}N)$; $M_{\text{тр}}$ — момент трения; $r_{\text{в}}$ — радиус вала (колеса); N — нормальная нагрузка на подшипник (колесо).

Примечание. Значения коэффициентов трения, представленные в табл. 1 и 2, следует рассматривать как сугубо ориентировочные. В зависимости от конкретной конструкции узла трения, материалов пары трения и условий эксплуатации реальные значения могут отличаться от приведенных в несколько раз.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1. Определение коэффициента трения качения методом наклонного маятника	3
Лабораторная работа № 2. Определение коэффициента трения нитеобразных материалов	10
Лабораторная работа № 3. Определение коэффициента трения качения	16
Лабораторная работа № 4. Определение коэффициента статического трения и параметров молекулярной составляющей удельной силы трения на микротрибометре	23
Лабораторная работа № 5. Определение коэффициента трения в подшипнике качения	29
Лабораторная работа № 6. Определение коэффициента вязкости жидкого смазочного материала методом Стокса	36
Лабораторная работа № 7. Определение коэффициента трения в контакте гибкой ленты со стальным шкивом	42
Список дополнительной литературы	49
Приложения	50
Приложение 1	50
Приложение 2	51

Александр Федорович Гусев Владимир Васильевич Измайлов Марина Вячеславовна Новоселова

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ. ТРИБОЛОГИЯ

Учебно-методическое пособие

Корректор С.В. Борисов		
Подписано в печать		
Формат		Бумага писчая
Физ. печ. л.	Усл. печ. л.	Учизд. л.
Тираж экз.	Заказ №	C –

Редакционно-издательский центр Тверского государственного технического университета 170026, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, д. 22