

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

Изучение и сравнение методов измерения коэффициентов сухого трения

Цель:

изучить, применить и сравнить различные методы измерения коэффициентов трения покоя, скольжения, качения.

Оборудование:

полоски офисной бумаги, полоска картона со скошенной кромкой, тетрадный лист «в клетку», линейка 30 см, нить, брусок с магнитной меткой, лабораторные грузы массой 101 г (3 шт.), штатив с держателем, наклонная плоскость со шкалой, секундомер с магнитными датчиками, динамометр, датчик силы, УИОД, металлический цилиндр, горизонтальный полуметровый неширокий лист толстого стекла.

Идея эксперимента

При движении твердого тела в газе, жидкости или по поверхности другого твердого тела возникает противодействующая движению сила трения, в последнем случае – сила сухого трения. Только сухому трению свойственны «режимы» трения покоя, скольжения, качения.

В данной работе предполагается подвергнуть взаимодействию силами трения покоя, скольжения и качения поверхности офисной бумаги, установить качественные и количественные закономерности сухого трения, измерить различными способами коэффициенты соответствующих типов сухого трения опытного материала и сравнить эти методы.

Теоретическая часть

Сила сухого трения возникает в местах соприкосновения твердых тел и препятствует движению одного тела по поверхности другого. Первая причина возникновения сил сухого трения – зацепление поверхностей тел их неровностями в местах соприкосновения. Вторая причина возникновения силы трения объясняется проявлением сил межмолекулярного взаимодействия соприкасающихся поверхностей, и обе причины – результат сложного электромагнитного взаимодействия молекул соприкасающихся поверхностей.

Сила трения покоя, свойственная только сухому трению, возникает всегда при попытке внешней силы вызвать скольжение тела, и пока тело «неподвижно сопротивляется» сила трения покоя равна по модулю и противоположна по направлению силе, приложенной к покоящемуся телу (Рис. 1):

$$\vec{F}_{тр.пок} = -\vec{F}. \quad (1)$$

Многочисленные опыты показывают, что *максимальное* значение силы трения покоя пропорционально модулю силы нормального давления тела на поверхность или равной ей по модулю и противоположной по направлению силе нормальной реакции опоры N :

$$F_{тр.пок.мах} = \mu_{пок} N, \quad (2)$$

где $\mu_{пок}$ – коэффициент трения покоя.

При скольжении одного тела по поверхности другого (Рис. 2) между телами действует *сила трения скольжения*, направленная в сторону, противоположенную направлению движения тела.

Многочисленные эксперименты показывают, что сила трения скольжения при движении тела с небольшой скоростью пропорциональна модулю силы нормального давления или равной ей по модулю силе нормальной реакции опоры:

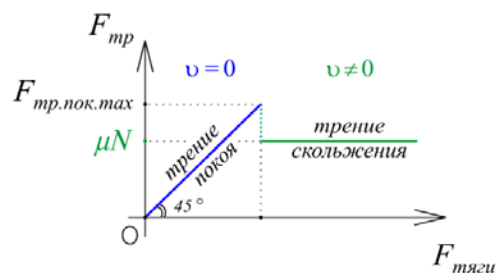


Рис. 1

$$F_{mp} = \mu N, \quad (3)$$

где μ – коэффициент силы трения скольжения.

Разительно меньше силы трения скольжения величина *силы трения качения*, действующая со стороны поверхности на катящееся по ней тело цилиндрической или шарообразной формы. Сила трения качения обусловлена не только вышеупомянутыми причинами, но и возникновением препятствующих движению сил упругой или пластичной деформации катящегося тела и поверхности в области их соприкосновения. Величина силы трения качения при движении тела с небольшой скоростью также пропорциональна модулю силы нормального давления или равной ей по модулю силе нормальной реакции опоры:

$$F_{mp.кac} = \mu_{кac} N, \quad (4)$$

где $\mu_{кac}$ – коэффициент силы трения качения.

Для измерения коэффициентов различных типов сухого трения существует много способов, рассмотрим некоторые из них. К телу, например бруску, расположенному на горизонтальной поверхности, при помощи динамометра прикладывают горизонтально направленную силу. Пока брусок неподвижен, динамометр показывает значение силы трения покоя (1), которое примет максимальное значение перед моментом «срыва с места», при этом значение *коэффициента трения покоя* можно определить по формуле (2), но для тела на покоящейся горизонтальной поверхности выполняется $N = P$, где P – вес тела, который можно измерить с помощью динамометра.

При дальнейшем скольжении бруска с постоянной скоростью под действием горизонтально направленной силы F согласно первому закону Ньютона будет выполняться:

$$\vec{F}_{mp} = -\vec{F}, \quad (5)$$

численное значение силы F и, следовательно, величину силы трения скольжения покажет указатель динамометра, и значение *коэффициента трения скольжения* найти по формуле (3) не составит труда.

В другом методе необходимо наклонить поверхность так, чтобы брусок соскальзывал с неё. В произвольном случае скольжения под действием равнодействующей трех сил брусок будет скользить с постоянным ускорением, которое можно вычислить из кинематического уравнения равноускоренного движения без начальной скорости ($v_0 = 0$):

$$s = \frac{at^2}{2}, \quad (6)$$

а силу трения – из второго закона Ньютона:

$$\vec{F}_{mp} + \vec{N} + m\vec{g} = m\vec{a}. \quad (7)$$

При решении этого уравнения, спроецированного на оси X и Y (Рис. 3), с учетом выражения (3) получим общее решение для коэффициента трения скольжения:

$$\mu = \frac{g \sin \alpha - a}{g \cos \alpha}. \quad (8)$$

Частным и примечательным случаем, является такой наклон поверхности, при котором брусок будет соскальзывать с постоянной скоростью ($v = \text{const}$, $a = 0$), и выражение (8) для коэффициента трения скольжения упростится до известной формулы метода равномерного соскальзывания:

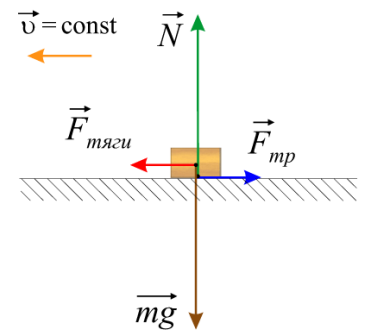


Рис. 2

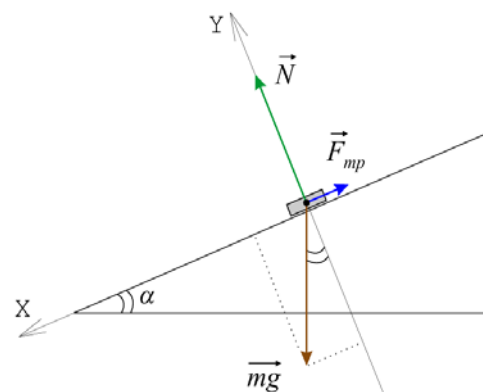


Рис. 3

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha . \quad (9)$$

В методе равноускоренного соскальзывания без начальной скорости ($a = \operatorname{const}$, $v_0 = 0$) преобразование выражения (8) с учетом выражения (6) дает следующую формулу для вычисления коэффициента трения скольжения:

$$\mu = \frac{\sin \alpha - \frac{2s}{gt^2}}{\cos \alpha}, \quad (10)$$

значения $\sin \alpha$ и $\cos \alpha$ наклона поверхности можно найти из отношений сторон прямоугольного треугольника, нарисовать который не составит труда (Рис. 4).

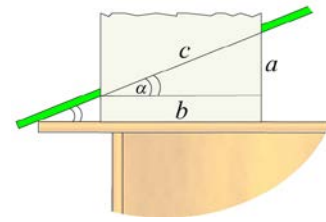


Рис. 4

Другой метод определения коэффициента трения скольжения основан на законе сохранения энергии, и состоит в следующем: если к зафиксированному на горизонтальной поверхности динамометру (Рис. 5) при помощи нити прицепить брусок, растянуть пружину динамометра на некоторое удлинение x , затем отпустить брусок, то сила упругости F пружины жесткостью k

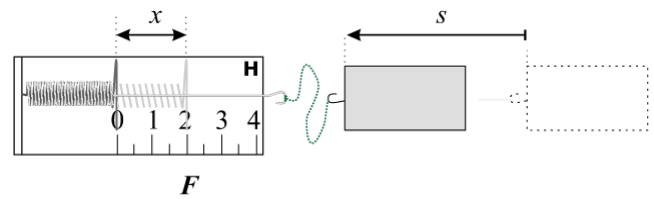


Рис. 5

$$F = kx \quad (11)$$

приведет брусок в движение. Очевидно, что вся потенциальная энергия растянутой пружины к моменту остановки бруска будет необратимо исчерпана отрицательной работой силы трения. Согласно закону сохранения энергии можно утверждать:

$$\frac{kx^2}{2} = F_{\text{тр}} s, \quad (12)$$

а с учетом выражения (3) получим:

$$\frac{kx^2}{2} = \mu N s. \quad (13)$$

Так как поверхность горизонтальна и неподвижна, заменим N на вес бруска P , значение которого можно измерить динамометром, и получим из соотношения (13) окончательное выражение для коэффициента трения скольжения данным методом:

$$\mu = \frac{xP}{2Fs}. \quad (14)$$

Коэффициент силы трения качения измерить экспериментально сложнее из-за её малой величины. Один из методов основан на законе сохранения энергии: тело, например цилиндр, скатывается с горки высотой h и преодолевает к моменту остановки по горизонтальной поверхности путь s . Пренебрегая потерей полной механической энергии на склоне горки Δs , можно утверждать:

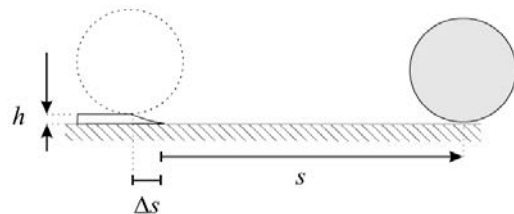


Рис. 6

$$mgh = F_{\text{тр.кач}} s. \quad (15)$$

Совместно решая это уравнение и выражение (4), с учетом $N = P = mg$ в данном случае, получим выражение для вычисления коэффициента трения качения данным методом:

$$\mu = \frac{h}{s}. \quad (16)$$

Сила сухого трения сопровождает нас повсюду. Иногда мы пытаемся избавиться от неё, иногда, наоборот, стремимся её увеличить. Благодаря этой силе мы можем, перемещаться по земле пешком или на транспорте, непринужденно облокотиться о стену, расставить на столе посуду, развести огонь, сшить костюм, завязать шнурки, послушать звучание смычковых музыкальных инструментов...

Экспериментальное изучение силы сухого трения важно потому, что теоретическое её исследование едва ли возможно, поскольку сила трения является результатом сложения огромного количества межмолекулярных сил, действующих на границе контакта двух тел. Сложность происходящих при этом процессов делает невозможным полное описание силы трения на языке классической механики. Но, тем не менее, можно и нужно изучать данное явление и экспериментально выявлять различные эмпирические закономерности, которым подчиняется сухое трение.

Экспериментальная часть

Во всех заданиях работы, в качестве изучаемого материала трущихся поверхностей, предлагается использовать самый доступный стандартизированный материал – офисную бумагу, полосками которой предварительно облицованы и движущиеся тела – брусок и цилиндр, и неподвижная поверхность – стол и наклонная плоскость.

Задание 1: получите графическую зависимость от времени силы трения покоя и силы трения скольжения при скольжении по горизонтальной поверхности из состояния покоя.

В задании используются цифровые средства измерения, мониторинга и обработки результатов физического эксперимента. А) переключите датчик силы в режим 10 Н, закрепите его вертикально на штативе, подключите к УИОДу; б) включите УИОД, откройте в УИОДе окно показаний, обнулите в УИОДе показания датчика силы без нагрузки; в) нагрузите брусок тремя лабораторными грузами, подвесьте на крюк датчика силы, измерьте и запишите вес нагруженного бруска; г) установите в УИОДе продолжительность эксперимента 5 секунд, частоту дискретизации – 10 раз в секунду; откройте окно для наблюдения графической зависимости, д) положите брусок с грузами в начало бумажной полоски, закрепленной на столе, снимите датчик силы, приведите его в зацепление с бруском при помощи нити; е) запустите в УИОДе эксперимент, и сразу начните тянуть, увеличивая силу со стороны вашей руки так, чтобы брусок из состояния покоя перешел в состояние равномерного движения; ж) сопоставляя движение исследуемого тела и отображающийся график, проанализируйте ситуацию, объясните его вид.

Проведите 3-4 успешных «Запуска», не удаляйте их. Удачный на ваш взгляд график *читаемо* с обозначением осей, значений, единиц измерений перечертите в отчет. Сделайте вывод.

Задание 2: вычислите коэффициент трения покоя и коэффициент трения скольжения методом равномерного скольжения по горизонтальной поверхности из состояния покоя.

По результатам *Задания 1*, принимая $N = P$, вычислите значения коэффициента трения покоя $\mu_{\text{пок}}$ по формуле (2) и значение коэффициента трения скольжения μ по формуле (3) Оценку погрешностей прямых и косвенного измерения не производить. Сделайте вывод.

№	P , Н	$F_{\text{тр.пок}_{\text{max}}}$, Н	$F_{\text{тр}}$, Н	$\mu_{\text{пок}}$	$\mu_{\text{пок.ср}}$	μ	$\mu_{\text{ср}}$
1							
2							
3							

Задание 3: определите коэффициент трения скольжения методом с использованием закона сохранения энергии.

Расположите динамометр в начале бумажной полосы, закрепленной на горизонтальной поверхности стола (Рис.5). Положите на бумажную полосу динамометр, с помощью нити сцепите его с бруском. Прижимая динамометр к столу, отведите брусок так, чтобы пружина

растянулась. Зафиксируйте брусок, прижимая к столу, отметьте карандашом его первоначальное положение. Запишите показания динамометра F , измерьте удлинение пружины x . Отпустите брусок, отметьте положение бруска после остановки, измерьте пройденный бруском путь s . Если нить осталась натянутой после остановки бруска или произошло столкновение, повторите эксперимент, изменив усилие со стороны динамометра. Проведите эксперимент с ненагруженным бруском и с бруском, нагруженным одним, двумя, тремя лабораторными грузами. В каждом случае измеряйте и записывайте общий вес бруска, измеренный динамометром. Проведите не менее четырех запусков. Коэффициент трения скольжения μ вычислите по формуле (14). Вычислите среднеарифметическое значение коэффициента трения. Сделайте вывод.

* Результаты оформите с учетом погрешностей прямых и косвенных измерений, для этого произведите оценку абсолютной погрешности Δx прямого измерения величины x (здесь – s и Δs , x и Δx , F и ΔF , P и ΔP), согласно правилу для измерительного инструмента со шкалой:

$$\Delta x = \text{цена деления},$$

где Δx включает полцены деления абсолютной инструментальной погрешности и полцены деления абсолютной погрешности отсчета.

Вычислите относительную погрешность ε_μ косвенного измерения (вычисления) величины μ (здесь – коэффициента трения ε_μ) с помощью выражения, полученного на основании вида расчетной формулы (здесь выражение для относительной погрешности ε_μ имеет вид:

$$\varepsilon_\mu = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta P}{P} + \frac{\Delta s}{s}.$$

Вычислите абсолютную погрешность косвенного измерения (вычисления) $\Delta \mu$ по общей формуле:

$$\Delta \mu = \mu \varepsilon_\mu,$$

(здесь $\Delta \mu = \mu \varepsilon_\mu$). В записи результата количество цифр после запятой у приближенной измеренной или вычисленной величины и её абсолютной погрешности должно быть одинаковым.

№	$P, \text{ Н}$	$F_{\text{упр}}, \text{ Н}$	$x, \text{ м}$	$s, \text{ м}$	μ	$\mu_{\text{ср}}$
1	$P \pm \Delta P$	$F \pm \Delta F$	$(x_{(\text{см})} \pm \Delta x_{(\text{см})}) \cdot 10^{-2}$	$(s_{(\text{см})} \pm \Delta s_{(\text{см})}) \cdot 10^{-2}$	$\mu \pm \Delta \mu$	$\mu_{\text{ср}} \pm \Delta \mu_{\text{ср}}$
:	$.. \pm \Delta ..$	$.. \pm \Delta ..$	$.. \pm \Delta ..$	$.. \pm \Delta ..$	$.. \pm \Delta ..$	
4						

Задание 4: определите коэффициент трения скольжения методом равномерного соскальзывания с наклонной плоскости.

Искомая величина в данном методе найдется по формуле (9). Установите наклонную плоскость под углом к столу при помощи штатива. Изменяя высоту держателя, найдите такое положение, при котором брусок будет скользить по наклонной плоскости с минимальной, но постоянной скоростью (Рис. 3). Для определения $\text{tg} \alpha$ наклона выполните построение треугольника на тетрадном листе (Рис. 4). Вычислите коэффициент трения скольжения по формуле:

$$\mu = \text{tg} \alpha = \frac{a}{b}.$$

Результаты оформите с учетом погрешностей прямых и косвенного измерений и требований к записи результатов (см. * в Задании 3).

Согласно расчетной формуле этого метода выражение относительной погрешности вычисления коэффициента трения скольжения имеет вид:

$$\varepsilon_\mu = \varepsilon_{\text{tg} \alpha} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}.$$

Вычислите абсолютную погрешность косвенного измерения коэффициента трения скольжения:

$$\Delta\mu = \mu\varepsilon_{\mu}$$

$a, \text{ см}$	$b, \text{ см}$	$\text{tg}\alpha$	μ
$.. \pm \Delta ..$	$.. \pm \Delta ..$	$.. \pm \Delta ..$	

Сделайте вывод.

Задание 5: определите коэффициент трения скольжения методом равноускоренного соскальзывания с наклонной плоскости.

Используя установку предыдущего задания, приподнимите держатель наклонной плоскости так, чтобы брусок, расположенный в крайнем верхнем положении, мог скользить из состояния покоя с возрастающей скоростью (Рис. 3).

В данном эксперименте предполагается измерять время движения автоматическим цифровым секундомером, включение-выключение которого осуществляют магнитные датчики в моменты поочередного прохождения мимо них магнитной метки, расположенной на боковом штифте бруска. Чтобы соблюсти условие равноускоренного движения без начальной скорости необходимо расположить первый магнитный датчик как можно ближе к магнитной метке бруска «за миллиметр до срабатывания», второй датчик для большей точности опыта – как можно дальше от первого, но в пределах подопытного материала. Расстояние между центрами датчиков, будет соответствовать пройденному пути, который несложно определить по прикрепленной измерительной линейке. В данном методе коэффициент трения вычисляется по формуле (10), значения $\sin\alpha$ и $\cos\alpha$ наклона плоскости определяются аналогично предыдущему заданию.

Проведите четыре измерения, изменяя высоту держателя плоскости с шагом 1,5-2 см от положения равномерного скольжения. Добивайтесь скольжения с минимальным трением о бортик.

Оценку погрешностей прямых и косвенного измерения не производите. Сделайте вывод.

№	Наклон плоскости					$g, \text{ м/с}^2$	$s, \text{ м}$	$t, \text{ с}$	μ	μ_{cp}
	$a, \text{ см}$	$b, \text{ см}$	$c, \text{ см}$	$\sin\alpha$	$\cos\alpha$					
1	9,80	:
:										
4										

Задание 6: определите коэффициент трения качения методом с использованием закона сохранения энергии.

Эксперимент проводится на отдельном столе, на котором установлен и горизонтально выверен (с использованием шарика от подшипника) лист толстого стекла длиной 40-50 см. Изучаемым типом бумаги выстилается плоская поверхность этого стеклянного столика, и оборачивается поверхность гладкого алюминиевого цилиндра, способного плавно катиться по бумажной полосе.

Расположите цилиндр (Рис. 6) на верхней грани скошенного кромки картонной полоски толщиной h , расположенной в начале бумажной полосы, и без начальной скорости опустите цилиндр. Цилиндр до остановки преодолет по горизонтальному участку путь s . Измерьте высоту «горки» h , выполните пять удачных запусков цилиндра, в каждом случае измерьте путь s_1, s_2, s_3, s_4, s_5 , вычислите среднеарифметическое значение пути $s = s_{cp}$, вычислите коэффициент трения качения по формуле (16).

Оценку погрешностей прямых и косвенного измерений не производите. Сделайте вывод.

№	$h, \text{ мм}$	$s_n, \text{ мм}$	$s, \text{ мм}$	$\mu_{кач}$
1				
:				

Задание 7: придумайте свой метод определения коэффициента трения.

Предложите способ определения коэффициента трения для следующих пар поверхностей: а) подошва вашей обуви – пол кабинета; б) пластиковый брусок – стена кабинета. Не производя оценки погрешностей измерений, вычислите значение μ скольжения в каждом случае. Сделайте вывод.

Заключительный вывод

Сформулируйте общий вывод, раскрывающий цель работы. Выделите достоинства и недостатки изученных методов определения коэффициентов трения покоя, скольжения, качения.

Контрольные вопросы

1. Какие виды сухого трения существуют?
2. При каких условиях появляются силы трения?
3. Каковы причины возникновения сил трения покоя, скольжения, качения? Чем они отличаются?
4. От чего зависят модуль и направление силы трения покоя?
5. В каких пределах может изменяться сила трения покоя?
6. Зависит ли сила сухого трения от площади соприкасающихся поверхностей?
7. Может ли сила трения увеличить скорость тела? Поясните.
8. Приведите примеры практического использования сил трения покоя, скольжения, качения.
9. Докажите, что при равномерном соскальзывании с наклонной плоскости коэффициент трения скольжения $\mu = \operatorname{tg} \alpha$.
10. Выведите формулу вычисления коэффициента трения скольжения при равноускоренном соскальзывании с наклонной плоскости без начальной скорости (формула (10)).
11. В каких условиях или технических устройствах целесообразно заменить силу трения скольжения на силу трения качения, и наоборот?
12. В каких ситуациях или технических устройствах смена трения покоя на трение скольжения нежелательно, и наоборот?

Приложение: требования к оформлению эксперимента в отчете лабораторной работы.

1. Запишите название задания полностью.
2. Запишите расчетную формулу(ы) задания.
3. Выпишите с пояснениями все используемые в формуле(ах) величины.
4. По возможности схематически изобразите стадии эксперимента.
5. Если в задании требуется выполнить оценку погрешностей, запишите выражение для вычисления абсолютной погрешности Δx , измеряемой величины x , с учетом значений абсолютной инструментальной погрешностей и абсолютной погрешности отсчета, или среднеарифметическое отклонений от среднего значения измеряемой величины.
6. Запишите значение используемой табличной величины s (константы), равнозначное точности измеренных величин, и значения её абсолютной погрешности $\Delta s, s$ (s с точностью до половины отброшенного разряда).
7. Запишите формулу для расчёта относительной погрешности ε_y , косвенно измеряемой (вычисляемой) величины y , оставьте место для вычисления этого значения после соответствующих измерений.
8. Запишите формулу для расчёта абсолютной погрешности Δy косвенного измерения величины y , оставьте место для вычисления этого значения.
9. Нарисуйте и заполните таблицу. Заносите в таблицу приближенные значения табличных, измеренных, вычисленных величин через « \pm » с их абсолютными погрешностями, с одинаковым числом знаков после запятой, не превышающим два, дольный или кратный десятичный множитель вынесите за скобки, например, $(12,10 \pm 0,05) \cdot 10^{-3} \text{ кг}$
10. В конце каждого задания в объеме нескольких предложений сделайте вывод: охарактеризуйте проведенный эксперимент с точки зрения практической значимости метода и результатов исследования, отметьте достоинства и недостатки экспериментальной базы, установки; по возможности отразите свои замечания и предложения.

