

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Физика»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ
СКОЛЬЖЕНИЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Методические указания к лабораторной работе по физике
для студентов инженерно-технических специальностей

Электронный учебный материал

УДК 531.38 (075.8)
ББК 22.213я7
И 98

Авторы:

А.К. Есман, Г.Л. Зыков, С.В. Попко, И.А. Климович, П.Г. Кужир, А.А. Иванов, В.А. Потачиц

Рецензент:

Ю.В. Развин

Белорусский национальный технический университет
пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.(017) 292-77-52 факс (017) 292-91-37
E-mail: ak_esman@bntu.by;
Регистрационный № БНТУ/ФЭС57-65.2015

© БНТУ, 2015

© Есман А.К., Зыков Г.Л., Попко С.В., Климович И.А., Кужир П.Г., Иванов А.А., Потачиц В.А., 2015

В работе рассмотрена история развития знаний о трении скольжения, приводятся различные механизмы, объясняющие возникновение трения покоя и скольжения. На примерах показана роль трения в различных физических процессах, описана методика измерения коэффициента трения скольжения для различных материалов.

Методические указания предназначены для самостоятельной подготовки студентов к выполнению лабораторной работы.

Цель работы:

- а) изучить силу трения скольжения при движении твердых тел;
- б) определить величину коэффициента трения скольжения для поверхностей различных материалов.

Приборы и принадлежности: прибор для изучения законов механики, электронный секундомер, набор материалов.

Трение – один из видов взаимодействия тел. Оно возникает при соприкосновении двух тел. Трение, как и все другие виды взаимодействия, подчиняется третьему закону Ньютона: если на одно из тел действует сила трения, то такая же по модулю, но направленная в противоположную сторону сила действует и на второе тело. Силы трения, как и упругие силы, имеют *электромагнитную* природу. Они возникают вследствие взаимодействия между атомами и молекулами соприкасающихся тел.

Виды трения

1. **Внешнее (сухое) трение.** Оно возникает в зоне контакта поверхностей твердых тел при отсутствии между ними жидкой или газообразной прослойки. Сила внешнего (сухого) трения всегда направлена по касательной к соприкасающимся поверхностям.

2. **Вязкое трение.** Оно возникает при движении твердого тела в жидкой или газообразной среде или при перемещении одного слоя среды относительно другого. Сухое и вязкое трение имеют разную природу и отличаются по свойствам.

3. **Трение покоя** – трение при отсутствии относительного перемещения соприкасающихся тел. Сила трения покоя всегда равна по величине внешней силе и направлена в противоположную сторону. Сила трения покоя не может превышать некоторого максимального значения $(F_{\text{тр}})_{\text{max}}$. Если внешняя сила больше $(F_{\text{тр}})_{\text{max}}$, возникает *относительное проскальзывание*.

Сила трения, которая действует между проскальзывающими поверхностями, называется **силой трения скольжения**.

Сила трения скольжения

С трением мы сталкиваемся на каждом шагу. Вернее было бы сказать, что без трения мы и шагу ступить не можем. Но несмотря на ту большую роль, которую играет трение в нашей жизни, до сих пор не создана достаточно полная картина возникновения трения, и вопрос этот остается неясным. Это связано даже не с тем, что трение имеет сложную природу, а скорее с тем, что опыты с трением очень чувствительны к обработке поверхности и поэтому трудно воспроизводимы.

Первые исследования трения, о которых мы знаем, были проведены Леонардо да Винчи примерно 450 лет назад. Он измерял силу трения, действующую на деревянные параллелепипеды, скользящие по доске, причем, ставя бруски на разные грани, определял зависимость силы трения от площади опоры. Но работы Леонардо да Винчи не были опубликованы. Они стали известны уже после того, как классические законы трения были в 17-18 в.в. вновь открыты французскими учеными Амонтоном и Кулоном.

Вот эти законы: 1) сила трения $F_{\text{тр}}$ прямо пропорциональна силе N нормального давления тела на поверхность, по которой движется тело: $F_{\text{тр}} = \mu N$, где μ – безразмерный коэффициент, называемый коэффициентом трения; 2) сила трения не зависит от площади контакта между поверхностями; 3) коэффициент трения зависит от свойств трущихся поверхностей; 4) сила трения не зависит от скорости движения тела.

Триста лет исследований трения подтвердили правильность трех первых законов, предложенных Амонтоном и Кулоном. Неверным оказался лишь последний – четвертый.

Механизм трения весьма сложен. Из-за неровностей поверхностей они соприкасаются только в отдельных точках на вершинах выступов. Здесь молекулы соприкасающихся тел подходят на расстояния, соизмеримые с расстоянием между молекулами в самих телах, и сцепляются. Образуется прочная связь, которая при движении рвется и возникает вновь. В результате возникают колебания молекул. На эти колебания и тратится энергия.

Площадь действительного контакта составляет обычно от одного до двух тысяч квадратных микронов. Она практически не зависит от размеров тела и определяется природой поверхностей, их обработкой, температурой и силой нормального давления. Если на тело надавить, то выступы сминаются, и площадь действительного контакта увеличивается. Увеличивается и сила трения.

При значительной шероховатости поверхностей большую роль в увеличении силы трения начинает играть механическое зацепление между «холмами». Они при движении сминаются, и при этом тоже возникают колебания молекул. Пока поверхности «грубые», число контактов невелико, а после хорошей полировки оно возрастает. Можно привести еще пример увеличения трения с улучшением поверхности. Если взять два металлических бруска с чистыми полированными

поверхностями, то они слипаются. Трение здесь становится очень большим, так как площадь действительного контакта велика. Силы молекулярного сцепления, которые ответственны за трение, превращают два бруска в монолит!

Рассмотренная нами модель трения довольно груба. Мы не останавливались здесь на диффузии молекул, то есть на проникновении молекул одного тела в другое, на роли электрических зарядов, возникающих на соприкасающихся поверхностях, на роли и механизме действия смазки. Эти вопросы во многом неясны, а объяснения спорны. Можно только удивляться тому, что при такой сложности трение описывается столь простым законом: $F_{\text{тр}} = \mu N$. И хотя коэффициент трения μ не

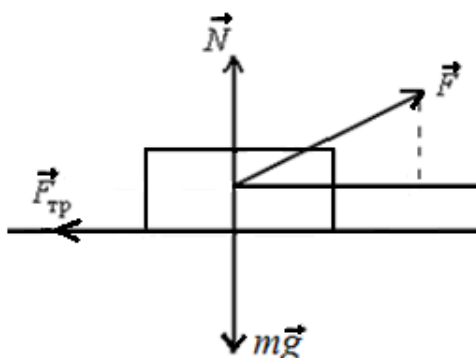


Рисунок 1 – Силы, приложенные к телу, находящемуся на горизонтальной плоскости

очень постоянен и несколько меняется от одной точки поверхности к другой, для многих поверхностей, с которыми мы часто сталкиваемся в технике, можно делать достаточно хорошие оценки ожидаемой силы трения.

Сухое трение имеет одну существенную особенность: трение покоя. Если в жидкости или газе трение возникает только при движении тела и тело можно сдвинуть, приложив к нему даже очень маленькую силу, то при сухом трении тело

начинает двигаться только тогда, когда проекция приложенной к нему силы F на плоскость, касательную к поверхности, на которой лежит тело, станет больше некоторой величины (рисунок 1). Пока тело не начало скользить, действующая на него сила трения равна касательной составляющей приложенной силы и направлена в противоположную сторону. При увеличении приложенной силы сила трения тоже возрастает, пока не достигнет максимальной величины, равной μN , при которой начинается скольжение. Дальше сила трения уже не меняется.

Часто об этом забывают при решении задач. На вопрос «какая сила трения действует на стол массой 30 кг, стоящий на полу, если коэффициент трения равен 0,4», большинство уверенно отвечает: « ~ 120 Н», что неверно. Сила трения равна нулю, иначе стол поехал бы в сторону действия силы трения, так как других горизонтальных сил нет.

Итак, если тело покоится, то для того, чтобы сдвинуть его с места, к телу нужно приложить силу, большую максимально возможной силы трения покоя, которое обусловлено прочностью молекулярных связей. А как обстоит дело, если тело уже движется? Какую силу нужно приложить для того, чтобы тело начало двигаться еще и в другом направлении? Оказывается, сколь угодно малую. Связано это как раз с тем, что сила трения не может быть больше максимальной силы трения покоя.

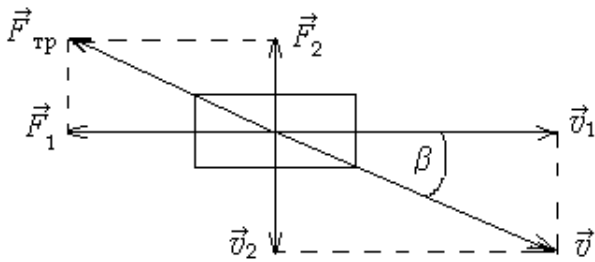


Рисунок 2 – Силы, приложенные к бруску, движущемуся с постоянной скоростью на горизонтальной плоскости (вид сверху)

Возьмем брусок, находящийся на горизонтальной плоскости и движущийся с постоянной скоростью v_1 (рисунок 2). Приложив к бруску боковую силу, перпендикулярную к v_1 , его можно заставить двигаться еще и в этом направлении с постоянной скоростью v_2 . Сила трения при этом будет равна μN и направлена противоположно скорости v движения бруска относительно плоскости ($v = v_1 + v_2$).

Разложим силу трения на две составляющие по направлениям скоростей v_1 и v_2 :

$$F_1 = F_{\text{тр}} \cos \beta, \quad F_2 = F_{\text{тр}} \sin \beta,$$

где β – угол между векторами v_1 и v , а $\text{tg} \beta = v_2/v_1$.

Составляющая F_1 силы трения уравнивает силу, приложенную к бруску вдоль v_1 , а составляющая F_2 – «боковую» силу, приложенную к бруску. Так как

$$\sin \beta = \frac{\text{tg} \beta}{\sqrt{1 + \text{tg}^2 \beta}},$$

то

$$F_2 = F_{\text{тр}} \frac{\frac{v_2}{v_1}}{\sqrt{1 + \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2}} = F_{\text{тр}} \frac{v_2}{\sqrt{v_1^2 + v_2^2}}.$$

Если $v_2 \ll v_1$, то угол β мал и $\sin \beta \approx \text{tg} \beta$.

В этом случае $F_2 = F_{\text{тр}} \text{tg} \beta = \mu N \frac{v_2}{v_1}$, и составляющая силы трения, препятствующая движению

бруска «вбок», оказывается пропорциональной скорости этого движения. Картина получается такая, как при малых скоростях при жидком трении. А это означает, что брусок, движущийся в некотором направлении, можно заставить двигаться еще и в перпендикулярном направлении сколь угодно малой силой.

Явление, о котором идет речь, совсем нередкое и встречается довольно часто. Например, известно, что при резком торможении электродвигателя ремень передачи часто соскальзывает со шкивов. Происходит это потому, что при торможении двигателя ремень начинает проскальзывать относительно шкивов, и достаточно небольшой силы, чтобы сдвинуть ремень вбок. Так как обычно имеется небольшой перекося в установке шкивов и ремня, то такой силой является составляющая силы натяжения ремня. Вот еще примеры. Когда хотят вытащить гвоздь из стенки без помощи клещей, его сгибают и тащат, поворачивая одновременно вокруг оси. По той же причине при резком торможении автомобиль теряет управление: машину «заносит». Колеса скользят по дороге, а боковая сила возникает за счет неровностей дороги.

Остановимся теперь на последнем законе Амонтона-Кулона: сила трения не зависит от скорости тела. Это не совсем так.

Вопрос о зависимости силы трения от скорости имеет очень важное практическое значение. И хотя эксперименты здесь имеют много специфических трудностей, они окупаются использованием полученных сведений, например, в теории резания металлов, в расчетах движения пули и снарядов в стволе и т.д.

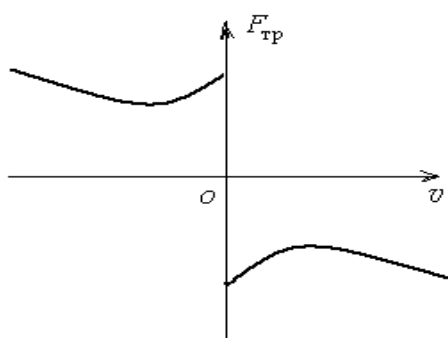


Рисунок 3 – Качественный график зависимости силы трения $F_{тр}$ пули в стволе от ее скорости v

Обычно считают, что для того, чтобы сдвинуть тело с места, к нему нужно приложить бóльшую силу, чем для того, чтобы тащить тело. В большинстве случаев это связано с загрязненными поверхностями трущихся тел. Например, для чистых металлов такого скачка силы трения не наблюдается. Опыты с движением пули в стволе показали, что с увеличением скорости пули величина силы трения сначала быстро убывает, затем она уменьшается все медленнее, а при

скоростях, больших 100 м/с, начинает возрастать. График зависимости силы трения от скорости показан на рисунке 3.

Грубо это можно объяснить тем, что в месте контакта выделяется много тепла. При скоростях порядка 100 м/с температура в месте контакта может достигать нескольких тысяч градусов, и между поверхностями образуется слой расплавленного металла. Трение становится жидким. При больших же скоростях жидкое трение пропорционально квадрату скорости.

Интересно, что примерно такую же зависимость от скорости имеет сила трения смычка о струну. Именно поэтому мы можем слушать игру на смычковых инструментах – скрипке, виолончели, альте.

При равномерном движении смычка струна увлекается им и натягивается. Вместе с натяжением струны увеличивается сила трения между смычком и струной. Когда величина силы трения становится максимально возможной, струна начинает проскальзывать относительно смычка. Если бы сила трения не зависела от относительной скорости смычка и струны, то, очевидно, отклонение струны от положения равновесия не изменялось бы (рисунок 4).

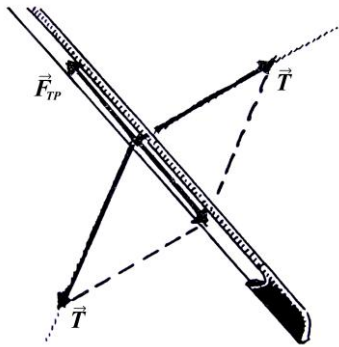


Рисунок 4 – Сила трения $F_{тр}$ смычка о струну

Но при проскальзывании трение уменьшается. Поэтому струна начинает двигаться к положению равновесия. При этом относительная скорость струны увеличивается, а это еще уменьшает силу трения. Когда же струна, совершив колебание, движется в обратном направлении, ее скорость относительно смычка уменьшается, и смычок опять захватывает струну. Все повторяется. Так возбуждаются колебания струны. Эти колебания незатухающие, так как энергия, «потерянная»

струной при ее движении, каждый раз восполняется работой силы трения, подтягивающей струну до положения, при котором струна срывается.

Этим можно и закончить рассмотрение сухого трения – явления, природу которого мы еще не понимаем достаточно хорошо, но умеем описывать с помощью законов, выполняющихся с удовлетворительной точностью. Это дает нам возможность объяснять многие физические явления и делать расчеты, необходимые при постройке машин.

Опыт 1. Определение коэффициента трения скольжения

При движении тела массой m по наклонной плоскости, образующей угол α с горизонтом, модуль силы трения скольжения

$$F_{\text{тр}} = \mu N = \mu mg \cos \alpha,$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

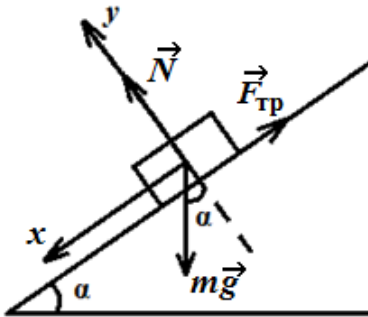


Рисунок 5 – Движение тела по наклонной плоскости вниз

По второму закону Ньютона в направлении движения вдоль оси x (рисунок 5) можно записать

$$mg \sin \alpha - F_{\text{тр}} = ma,$$

$$F_{\text{ск}} = \mu N = \mu mg \cos \alpha$$

$$\text{или } mg \sin \alpha - \mu mg \cos \alpha = ma,$$

т.е. модуль ускорения тела $a = g \sin \alpha - \mu g \cos \alpha$.

Следовательно, коэффициент трения скольжения

$$\mu = \frac{g \sin \alpha - a}{g \cos \alpha}.$$

При равномерном движении тела по наклонной плоскости $a = 0$. В этом случае коэффициент трения скольжения $\mu = \tan \alpha$.

Цель опыта: Овладение экспериментальным методом исследования факторов, влияющих на значение силы трения, формирование умений определять коэффициент трения покоя и коэффициент трения скольжения.

Оборудование: прибор для изучения законов механики с принадлежностями, секундомер, оптоэлектрические датчики.

Проведение опыта.

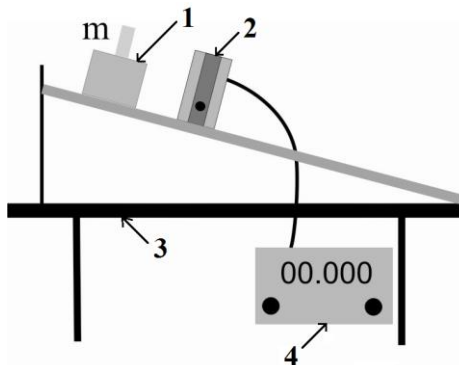


Рисунок 6 – Схема установки для выполнения опыта 1: 1 – тело, 2 – оптоэлектрический датчик, 3 – стол, 4 – секундомер

1. Установка для выполнения опыта схематически изображена на рисунке 6.
2. Приподнимите подъемным механизмом конец основания прибора на максимально возможную высоту. Вторую половину основания прибора установите горизонтально.
3. Вставьте стержень с флажком в отверстие расположенное на боковой грани тела с различными поверхностями трения, а второй стержень – в отверстие на верхней грани тела.
4. Измерьте длину d флажка бокового стержня.
5. Взвешиванием определите массу m тела вместе со стержнями и среднюю массу $\langle m_0 \rangle$ одной шайбы.
6. Установите тело на наклонной поверхности желоба и убедитесь, что оно может свободно перемещаться по направляющим желоба.
7. Положите на тело некоторое количество шайб, и освободите тело. Если тело не движется, уменьшите число шайб и вновь проверьте движение системы. Повторяйте это действие до тех пор, пока тело не начнет двигаться.
8. Установите оптический датчик на наклонной части основания таким образом, чтобы его основание (магнит) соприкасалось с металлической линейкой на верхней стороне основания прибора. Убедитесь, что флажок бокового стержня проходит через створ оптического датчика.
9. Подсоедините оптический датчик к гнезду 1 секундомера, установите прибор в режим (ONE).
10. Устанавливая тело в одно и то же исходное положение, несколько раз измерьте промежуток времени, в течение которого флажок двигался в створе оптического датчика (прошел путь, равный собственной длине), после освобождения тела (см. рисунок 6).
11. Рассчитайте модуль скорости v тела в тот момент, когда флажок проходит через створ датчика при различных положениях датчика и убедитесь в том, что тело движется равномерно. Если тело двигалось равноускоренно, и значения модулей скорости, полученные при различных положениях датчика значительно отличаются друг от друга, рассчитайте модуль ускорения тела ($a = \frac{2d}{\Delta t^2}$, где d – длина флажка, Δt – промежуток времени, в течение которого флажок двигался в створе оптического датчика).

12. Повторите измерения для других поверхностей трения и при других значениях массы m тела.

13. Используя результаты измерений и вычислений, рассчитайте коэффициент трения скольжения для различных поверхностей трения:

- по формуле $\mu = \operatorname{tg} \alpha$, если движение было равномерным;
- по формуле $\mu = \frac{g \sin \alpha - a}{g \cos \alpha}$, при равноускоренном движении тела.

Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу 1.

Таблица 1

d	m	$\langle m_0 \rangle$	$m + \langle m_0 \rangle$	Δt	v	a	μ

В результате выполнения опытов студенты должны знать и понимать причины возникновения трения, виды трения, факторы, влияющие на числовое значение силы трения; уметь экспериментально измерять коэффициент трения скольжения при поступательном движении тела.

Опыт 2. Изучение закономерностей движения системы связанных тел

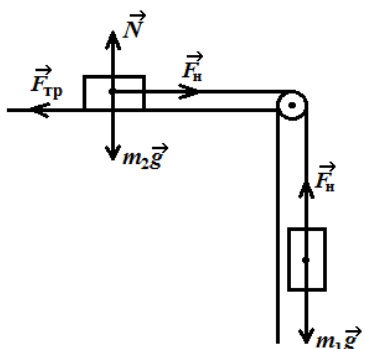


Рисунок 7 – Движение тела по наклонной плоскости вниз

$(m_1 + m_2)a = (m_1 - \mu m_2)g$. Если тело движется равноускоренно, то

$$\mu = \frac{m_1}{m_2} - \frac{(m_1 + m_2)a}{m_2 g}.$$

При равномерном движении $\mu = \frac{m_1}{m_2}$.

Цель опыта: Обеспечить овладение экспериментальным методом проверки соотношения между ускорением движения системы двух связанных тел, ее массой и внешними силами, действующими на систему.

Оборудование: прибор для изучения законов механики с принадлежностями, секундомер, оптоэлектрические датчики (см. рисунок 8).

Проведение опыта.

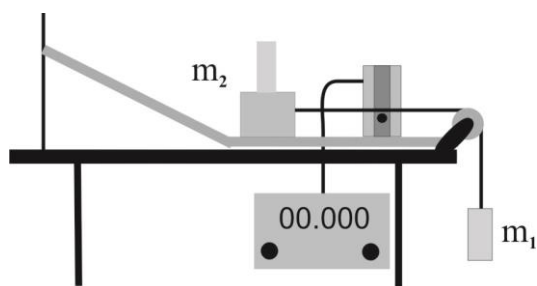


Рисунок 8 – Схема установки для выполнения опыта 2

стержень, и запишите данные в таблицу 2.

При движении по горизонтальной поверхности тела массой m_2 , связанного нитью, перекинутой через неподвижный блок (рисунок 7), с грузом массой m_1 модуль ускорения системы тел на направление движение согласно второму закону Ньютона $(m_1 + m_2)a = m_1g - F_{\text{тр}}$, где $F_{\text{тр}}$ – модуль силы трения скольжения. При движении тела по горизонтальной поверхности $F_{\text{тр}} = \mu m_2g$, где μ – коэффициент трения скольжения. Следовательно,

1. Установка для выполнения опыта схематически изображена на рисунке 8.

2. Установите основание прибора горизонтально. Вставьте первый стержень в отверстие, расположенное на верхней грани тела с различными поверхностями трения, а стержень с флажком – в отверстие на боковой грани тела.

3. Измерьте длину d флажка на боковом

4. Взвешиванием определите массу m_2 тела вместе со стержнями, среднюю массу $\langle m_0 \rangle$ одной шайбы и массу подставки m_3 для размещения шайб ($m_1 = m_3 + n \langle m_0 \rangle$, где n – число разновесов помещенных на подставку).

5. Установите тело на поверхности желоба и убедитесь, что выступ на поверхности тела может свободно перемещаться по направляющим желоба. Перекиньте шнур, соединяющий тело и подставку для шайб через блок.

6. Положите на подставку несколько шайб, и освободите тело. Если тело не движется, увеличьте число шайб на подставке, и вновь проверьте характер движения системы. Повторяйте это действие до тех пор, пока система не начнет двигаться равномерно.

7. Установите оптический датчик таким образом, чтобы магнит на его основании касался металлической линейки, закрепленной на верхней стороне основания прибора. Убедитесь, что флажок бокового стержня проходит через створ оптического датчика.

8. Подсоедините оптический датчик к гнезду 1 секундомера, установите прибор в режим (ONE).

9. Устанавливая тело в одно и то же исходное положение, несколько раз измерьте промежутки времени Δt , в течение которого флажок двигался в створе оптического датчика (прошел путь, равный собственной длине), после освобождения тела.

10. Рассчитайте модуль скорости v системы в тот момент, когда флажок, проходит через створ датчика и убедитесь в том, что тело движется равномерно.

11. Повторите измерения для других поверхностей трения.

12. Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу 2.

Таблица 2

d	m_2	$\langle m_0 \rangle$	m_1	$m_1 + m_2$	Δt	v	μ

13. Используя результаты измерений и вычислений, рассчитайте коэффициент трения

скольжения для различных поверхностей трения, по формуле $\mu = \frac{m_1}{m_2}$.

Дополнительное задание: Проведите аналогичные измерения и вычисления при равноускоренном движении тела. Устанавливая тело в одно и то же исходное положение, несколько раз измерьте промежуток времени, в течение которого флажок двигался в створе оптического датчика. Рассчитайте модуль ускорения тела по формуле $a = \frac{2d}{\Delta t^2}$ и коэффициент трения скольжения для различных поверхностей трения, по формуле

$$\mu = \frac{m_1}{m_2} - \frac{(m_1 + m_2)a}{m_2 g}.$$

Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу 3.

Таблица 3

d	m_2	$\langle m_0 \rangle$	m_1	$m_1 + m_2$	Δt	a	μ

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте законы Амонтона-Кулона.
2. Что такое трение покоя?
3. Причины возникновения трения скольжения.
4. Покажите, что тело, скользящее в некотором направлении можно заставить двигаться еще и в перпендикулярном направлении сколь угодно малой силой.
5. Как зависит сила трения скольжения от скорости движения?
6. Почему равномерно движущийся смычок заставляет колебаться струну с различной частотой?

Литература

1. Савельев, И.В. Курс физики, том 1/ И.В. Савельев. – М.: Наука, 2001 г.
2. Наркевич, И.И. Физика для ВТУЗов / И.И.Наркевич и др. – Минск: Высшэйшая школа, 1992 г.
3. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. – М.: Высшая школа, 1998 г.
4. Слободецкий, И.Ш. Сухое трение / И.Ш. Слободецкий. – М.: Наука, 1969 г.