



Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Московский государственный
технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный
исследовательский университет)»

Факультет: «Фундаментальные науки»
Кафедра «Физика»

Савинов С.А.

Лабораторная работа М-117

Определение коэффициента трения скольжения

Методическое руководство

Определение коэффициента трения скольжения

1. Цель лабораторной работы

Изучить закон сухого трения и ознакомиться с методами определения коэффициента трения скольжения.

2. Задачи лабораторной работы

Провести экспериментальную работу по оценке кинематических параметров равноускоренного движения тела по наклонной плоскости. На основании экспериментальных данных провести расчет коэффициента трения скольжения.

3. Экспериментальное оборудование, приборы и принадлежности

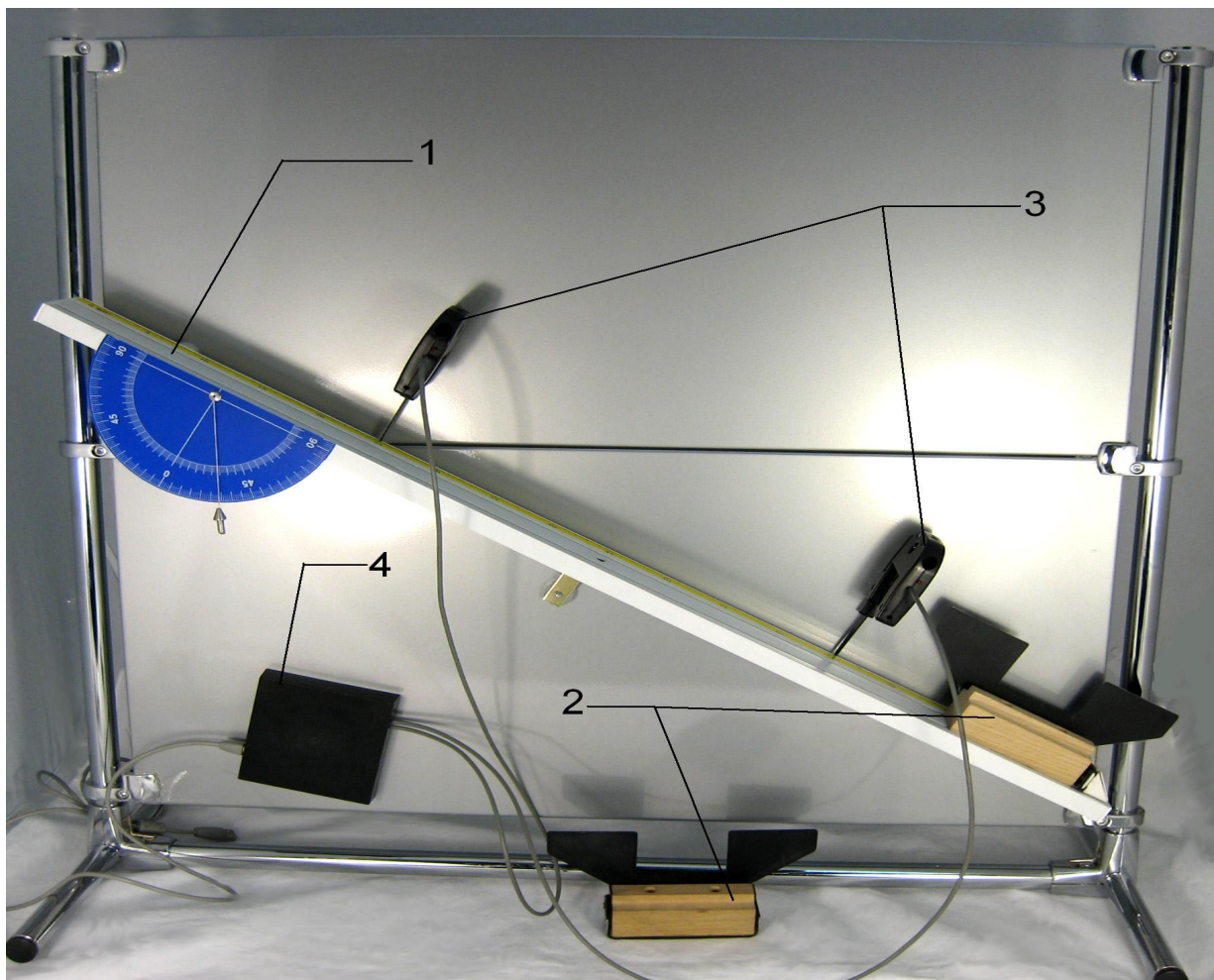


Рис.1

Лабораторный стенд (рис.1) включает наклонную направляющую скамью 1 с прикрепленной к ней измерительной линейкой, движущееся тело 2 (2 шт.), оптоэлектрические датчики 3 (2 шт.) с модулем сбора сигналов 4, а также транспортер для измерения угла наклона направляющей скамьи.

К приборам и принадлежностям относится компьютер с необходимым программным обеспечением.

4. Теоретическая часть

Среди возможных сил, препятствующих движению, можно выделить одну, наиболее часто встречающуюся: силу сухого трения. Сила сухого трения представляется двумя видами: силой трения покоя, силой трения скольжения.

Сила сухого трения возникает между соприкасающимися телами и направлена по касательной к поверхности соприкосновения тел против направления движения или против силы, пытающейся вовлечь тела в движение. Необходимым условием возникновения силы сухого трения является наличие давления одного тела на поверхность другого (рис. 2 а, б, в).

Сила давления тела на опору называется весом тела. По третьему закону Ньютона ответом опоры на действие силы давления является сила реакции опоры $\vec{F}_{реакции}$, которую принято представлять суммой силы нормальной реакции опоры и силы сухого трения:

$$\vec{F}_{реакции} = \vec{N} + \vec{F}_{тр}. \quad (1)$$

Если соприкасающиеся тела неподвижны относительно друг друга, то возникающую силу сухого трения называют силой трения покоя, а при относительном перемещении тел – силой трения скольжения. Скольжение тел относительно друг друга начинается только после того, как внешняя касательная к поверхности соприкосновения тел сила (тангенциальная сила) превзойдет по размеру силу трения покоя. Таким образом, сила трения покоя изменяется от нуля до некоторого максимального значения и равна внешней силе (или ее проекции), действующей в противоположном направлении.

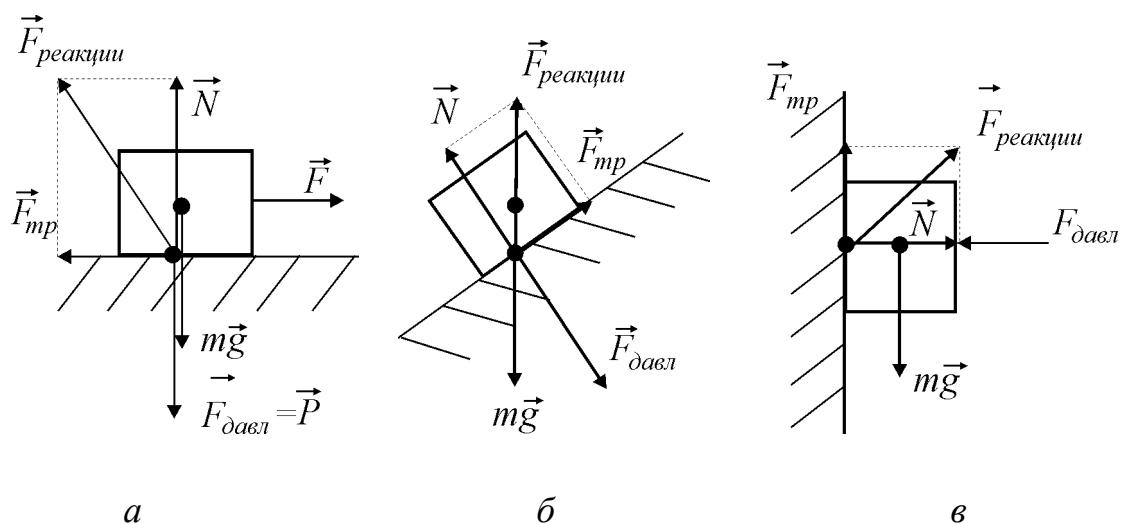


Рис.2

Сила трения зависит от силы давления, или прижимающей силы, материала тел и состояния поверхностей соприкосновения. У шероховатых поверхностей трение покоя больше, чем у отшлифованных.

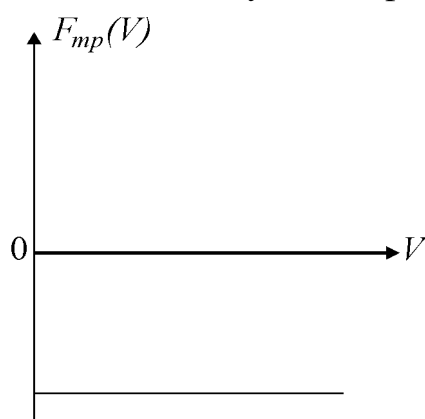


Рис.3. График зависимости проекции силы трения на направление движения от скорости для полированных металлических поверхностей

Когда внешняя сила (тангенциальная сила) превысит размер максимальной силы трения покоя, начнется скольжение одного тела вдоль поверхности соприкосновения с другим телом. В этом случае сила трения будет направлена против вектора скорости. Ее числовое значение для хорошо отполированных металлических поверхностей при небольших скоростях практически не зависит от скорости и равно максимальной силе трения покоя. График зависимости силы трения от скорости имеет вид, изображенный на рис. 3.

Независимость силы трения от скорости соблюдается лишь при не очень больших скоростях, не для всех тел и не при всех качествах обработки поверхностей. Для других случаев график зависимости силы трения между твердыми поверхностями от скорости имеет вид, показанный на рис. 4.

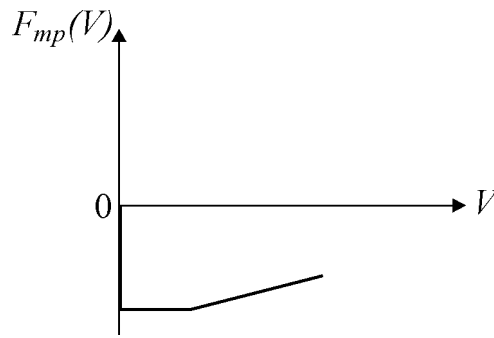


Рис.4. График зависимости проекции силы трения на направление движения от скорости для произвольных твердых поверхностей

Возникновение сухого трения обусловлено взаимодействием молекул, атомов и электронов, находящихся в поверхностных слоях трущихся друг о друга тел, т. е. в конечном счете, электромагнитным взаимодействием.

Французские физики Г.Амонтон и Ш.Кулон опытным путем установили закон трения: сила трения скольжения $\vec{F}_{тр}$ пропорциональна силе нормального давления $\vec{F}_{дав}$ тела на опору:

$$\vec{F}_{тр} = -\mu \cdot |F_{дав}| \cdot \frac{\vec{V}}{|\vec{V}|}, \quad (2)$$

где μ - коэффициент трения, зависящий от свойств соприкасающихся тел и состояния их трущихся поверхностей.

В соответствии с III законом Ньютона $\vec{F}_{дав} = -\vec{N}$, следовательно, расчет силы трения можно производить по формуле:

$$\vec{F}_{тр} = -\mu |\vec{N}| \frac{\vec{V}}{|\vec{V}|} \quad (3)$$

Модуль силы трения скольжения определяется:

$$|\vec{F}_{тр}| = \mu |\vec{N}| \quad (4)$$

Значение коэффициента трения скольжения μ можно получить, решив задачу о движении тела по наклонной плоскости с углом наклона α (рис. 5).

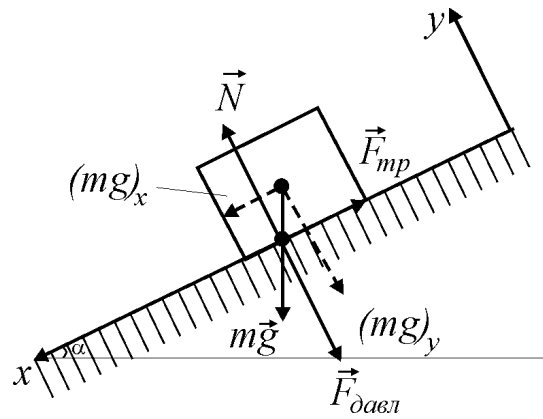


Рис.5. Схема действия сил и выбора координатных осей системы отсчета для решения задачи о соскальзывании тела с наклонной плоскости

Тело, находясь на наклонной плоскости, приходит в движение, когда проекция результирующей всех действующих на тело сил на ось x будет больше 0. В случае решения задачи со схемой действующих сил, указанной на рис. 4, движение тела начинается, когда проекция силы тяжести $(mg)_x$ будет больше размера силы трения F_{mp} . Следовательно, в случае равенства проекции силы тяжести на x -ось $(mg)_x$ и силы трения тело будет либо покоиться, либо двигаться с постоянной скоростью. Тогда

$$0 = (mg)_x - F_{mp} \quad (5)$$

или

$$mg \sin \alpha = \mu N \quad (6)$$

В проекции на ось y

$$0 = -mg \cos \alpha + N \quad (7)$$

При этом

$$N = mg \cos \alpha \quad (8)$$

Тогда подстановка значения N из (8) в уравнение (6) дает:

$$mg \sin \alpha = \mu mg \cos \alpha, \quad (9)$$

следовательно,

$$\mu = \tan \alpha. \quad (10)$$

Отсюда следует, что коэффициент трения равен тангенсу угла наклона плоскости к горизонту, при котором начинается соскальзывание тела с наклонной плоскости.

Однако установить с достаточной точностью коэффициент трения скольжения μ по экспериментальному значению предельного угла начала соскальзывания тела с наклонной плоскости довольно сложно. Поэтому в данной лабораторной работе используют метод экспериментальной оценки коэффициента трения скольжения при движении тела по наклонной плоскости с ускорением.

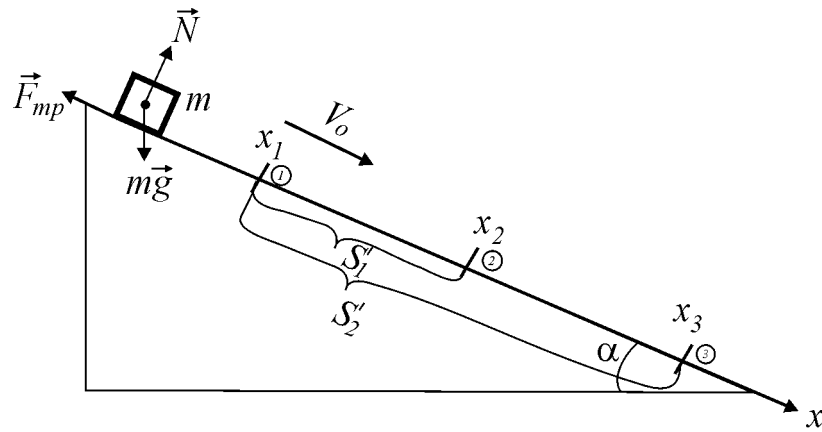


Рис.6

Тело, пущенное с вершины наклонной плоскости, перемещается по закону равноускоренного движения

$$x = x_0 + V_0 t + \frac{at^2}{2}, \quad (11)$$

Если на пути его движения на фиксированных расстояниях поместить оптические датчики, то времена прохождений телом соответствующих координат должны быть согласованы друг с другом в соответствии с формулой (11). Используя численный алгоритм квадратичной аппроксимации экспериментальных точек, можно найти величину ускорения a .

По значению рассчитанного ускорения, используя закон движения тела (II закон Ньютона), можно определить коэффициент трения μ . Для этого запишем II закон Ньютона для тела m (см. рис. 6):

$$\vec{F}_{mp} + \vec{N} + m\vec{g} = m\vec{a}. \quad (12)$$

Выразим это уравнение в проекциях на оси x и y :

$$x: -F_{mp} + mg \sin \alpha = ma, \quad (13)$$

$$y: N - mg \cos \alpha = 0. \quad (14)$$

Сила трения тогда будет

$$F_{mp} = \mu \cdot N = \mu \cdot mg \cos \alpha. \quad (15)$$

Подставляя F_{mp} в уравнения проекции на ось x (13), получим

$$-\mu mg \cos \alpha + mg \sin \alpha = ma. \quad (16)$$

Отсюда можно записать расчетную формулу для определения коэффициента трения μ :

$$\mu = \frac{g \sin \alpha - a}{g \cos \alpha} \quad (17).$$

Анализ выражения (17) показывает, что для определения коэффициента трения необходимо знать угол наклона плоскости α и ускорение тела a .

5. Описание лабораторной установки

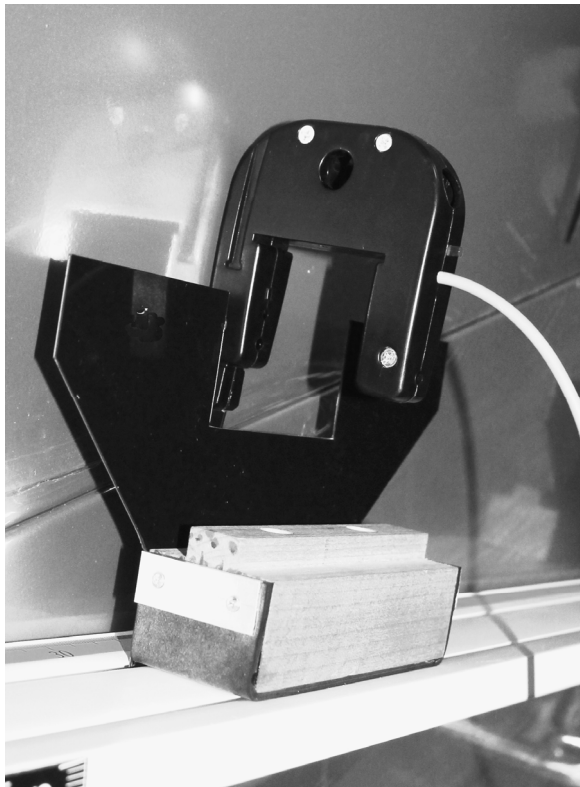


Рис. 7

Тело, скользящее по наклонной плоскости, имеет «флажок» сложной формы (см. рис. 7), который состоит из двух выступов длиной 70 мм («непрозрачные» области флажка), разделенных промежутком длиной также 70 мм («прозрачная область флажка»). При движении тела выступы флажка перекрывают и открывают оптическую ось датчика, при этом на диаграмме состояния оптодатчика появляются вертикальные отрезки («фронты»).

Передний фронт импульса оптоэлектрического датчика связан с началом перекрытия оптической оси кромкой флажка, а задний фронт – с уходом непрозрачного элемента с оптической оси. Фактически при этом брусок перемещается дополнительно на

длину ℓ . Таким образом, при последовательном пересечении флажком описанной формы оптической оси датчика фиксируются моменты времени ($t_1 - t_4$) прохождения телом 4 точек наклонной плоскости с координатами: $x_1, x_1+\ell, x_1+2\ell, x_1+3\ell$ ($\ell=0.07\text{м}$). Аналогичным образом при движении флажка мимо второго датчика появляются еще 4 момента времени (t_5, t_6, t_7, t_8), соответствующие следующим координатам тела: $x_2, x_2+\ell, x_2+2\ell, x_2+3\ell$. Координаты точек и моменты времени их прохождения служат экспериментальными точками для построения зависимости координаты тела от времени и аппроксимации ее кривой второго порядка вида (11). Значения координат рассмотренных выше точек необходимо ввести в программу, что выполняется при заполнении таблицы окна «Обработка».

6. Порядок проведения лабораторной работы





1. Соберите лабораторную установку и подберите угол наклона скамьи, обеспечивающий ускоренное движение бруска по наклонной плоскости и не слишком большую скорость в конце пути. Разместите оптоэлектрические датчики на пути перемещения бруска вдоль наклонной

плоскости достаточно далеко друг от друга, например, на отметках 25 см и 65 см.

2. С помощью соединительного кабеля подключите к компьютеру модуль сбора сигналов, к которому присоединены датчики.
3. Внесите в Таблицу 1 данные о положениях датчиков, номере бруска, угле наклона α наклонной плоскости (измерить транспортиром), длине прозрачной и непрозрачной частей флажка бруска (ℓ).

Таблица 1

№ бруска	α , град	ℓ , мм	x_1 , мм	$x_1+\ell$, мм	$x_1+2\ell$, мм	$x_1+3\ell$, мм	x_2 , мм	$x_2+\ell$, мм	$x_2+2\ell$, мм	$x_2+3\ell$, мм
1		70								
2		70								

4. После включения компьютера запустите программу «Практикум по физике». На панели устройств выберите соответствующий сценарий проведения эксперимента (Alt+C) .
5. Установите брусок в верхнее положение на наклонной плоскости.
6. Запустите измерения (Ctrl+S)  и сразу, непосредственно вслед за запуском, приведите в движение тело на наклонной плоскости (из верхнего положения без начальной скорости).
7. После завершения движения бруска остановите измерения (Ctrl+T) .
8. Откройте окно «Обработка» . Перейдите на вкладку «исходные данные» и введите значение начальной координаты первого (по ходу движения бруска) датчика Y_0 ($Y_0 = x_1$).
9. Проведите обработку полученных данных в соответствии со сценарием:
 - ✓ Перейдите на рабочее окно датчика. В случае необходимости выделите область импульсов перекрытий датчиков флажками тележки для ее детального просмотра с увеличенным масштабом (Alt+левая кнопка мыши);
 - ✓ Установите зеленый маркер (правая кнопка мыши) на левый фронт первого импульса срабатывания датчика (тем самым этот момент времени будет выбран в качестве начального). Жёлтый маркер (левая кнопка мыши) установите на правый фронт импульса.
 - ✓ Нажимая на кнопку «плюс» в правом верхнем углу рабочего окна датчика, добавьте значение времени в таблицу. Одновременно на экран вызывается окно обработки данных.
 - ✓ Перемещая желтый курсор по фронтам срабатывания датчика, вводите, нажимая кнопку «плюс», соответствующие значения временных интервалов.
 - ✓ Пользуясь таблицей 1, введите в третий столбец таблицы значения координат бруска в отмеченные во втором столбце моменты времени.
 - ✓ Перейдите на вкладку «график» окна «обработка», где по экспериментальным точкам строится график перемещения тела как функции от времени $S(t)$.


- ✓ В левом верхнем углу экрана выберите из выпадающего списка аппроксимирующую функцию вида $Y=A \cdot X^2+B \cdot X+Y_0$ и выполните аппроксимацию кривой квадратичной зависимостью, нажав кнопку  на панели инструментов в окне «Обработка».
 - ✓ Полученную оценку ускорения, равного удвоенному коэффициенту при квадратичной степени ($\frac{a}{2}t^2$), внесите в Таблицу 2 и добавьте оценку ускорения в «Статистику» (для этого нажмите кнопку с изображением звездочки в верхней строке окна «График»).
10. Повторите эксперимент по пп. 5-9 еще четыре раза.
11. Возьмите брусок 2 с другим материалом опорной поверхности скольжения, подберите необходимый угол наклона скамьи и повторите для него измерения по пп. 5-9. Результаты измерений запишите в Таблицу 2.

Таблица 2

№ бруска	a_1 , м/с ²	a_2 , м/с ²	a_3 , м/с ²	a_4 , м/с ²	a_5 , м/с ²	$\langle a \rangle$, м/с ²	μ	$\Delta \mu$
1								
2								

7. Обработка результатов измерений

- Используя полученные результаты, определите средние значения ускорения $\langle a \rangle$ для каждого бруска. Средние значения и среднеквадратичные отклонения коэффициентов полинома рассчитываются в таблице «Статистика».
- Определите коэффициент трения μ для каждого бруска.
- Используя правила оценки погрешностей косвенных измерений, определите погрешности оценок коэффициента трения $\Delta \mu$ для каждого бруска. Сравните полученные результаты.
- Запишите для каждого бруска окончательный результат работы в виде $\mu = \langle \mu \rangle \pm \Delta \mu$, $\delta \mu = \dots \%$,
где вместо $\langle \mu \rangle$ и $\Delta \mu$ следует подставить полученные Вами численные значения этих величин, а $\delta \mu$ указывает относительную погрешность Ваших измерений.

8. Указания по технике безопасности

- Перед выполнением работы получите инструктаж у лаборанта.
- Соблюдайте общие правила техники безопасности работы в лаборатории "Физика".

9. Контрольные вопросы

1. Что называется силой сухого трения? Какими видами сил представлена сила сухого трения?
2. Нарисуйте схемы действия сил на движущиеся тела, в которых присутствуют силы сухого трения.
3. Нарисуйте графики зависимости проекции силы сухого трения на направление движения.
4. Напишите выражение для определения силы трения скольжения.
5. Перечислите факторы, влияющие на размер коэффициента трения скольжения.
6. Выведите формулу для определения предельного угла наклона плоскости к горизонту, при котором начинает соскальзывать тело с наклонной плоскости.
7. Выведите основную расчетную формулу в данной лабораторной работе, по которой экспериментально, путем косвенных измерений производится оценка размера коэффициента трения скольжения.
8. Опишите устройство лабораторной установки.
9. Расскажите о порядке выполнения лабораторной работы и проведении измерений.
10. Дайте оценку случайной погрешности результата косвенного измерения коэффициента трения скольжения.