Энгельсский технологический институт (филиал) федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Кафедра «Естественных и математических наук»

ФИЗИКА

Методические указания к
выполнению лабораторной работы

“ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ ”

для студентов направлений

09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»
09.03.04 «Программная инженерия»
15.03.02 «Технологические машины и оборудование»
15.03.05 «Конструкторско-технологическоеобеспечение машиностроительных производств»
18.03.01 «Химическая технология»
23.03.01 «Нефтегазовое дело»
29.03.05 «Конструирование изделий легкой промышленности»

очной и заочной формы обучения

Энгельс 2025

Цель работы: изучение законов динамики поступательного движения, определение коэффициента трения скольжения.

Приборы и принадлежности: горизонтальная доска с укрепленной на ней линейкой, стальной треугольник, квадратные пластинки из разных материалов.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Трение является одним из наиболее распространенных физических явлений. Силы взаимодействия, возникающие на поверхности соприкосновения тел при движении их относительно друг друга или относительно среды, окружающей тела, называются **силами трения**.

Сила трения всегда направлена против перемещения, поэтому на преодоление силы трения затрачивается энергия. Трение неизменно сопровождает работу любых механизмов, поэтому коэффициент полезного действия их всегда меньше единицы.

Трение всегда тормозит движение, поэтому на преодоление трения на транспорте и в промышленности тратится громадное количество топлива разных видов. Кроме того, трение твердых тел друг о друга вызывает большой износ трущихся поверхностей, т. е. большие потери различных материалов, вызывающие необходимость замены изношенных частей. С этой точки зрения наука и техника должны стремиться к максимальному уменьшению силы трения. Однако трение одновременно является и самым полезным явлением природы. Без трения было бы невозможно движение и торможение механизмов, без трения нельзя было бы скреплять детали болтами, гвоздями и т.д., было бы невозможно применение ременных передач. В этом случае необходимо увеличить трение. Таким образом, трение вредно в одних условиях и полезно в других. Чтобы правильно использовать трение в технике, нужно знать законы трения. По характеру взаимодействия тел трение может быть сухим (между твердыми телами) и жидкостными (между твердыми поверхностями, смазанными жидкостями или между слоями жидкости).

В данной работе рассматривается только сухое трение.

Сухое трение бывает трех видов:

- трение покоя
- трение скольжения
- трение качения.

Сила трения между сухими твердыми соприкасающимися поверхностями, возникающая при относительной скорости движения поверхностей, равной нулю, называется трением покоя – $F_{тр.\ 0}$. Чтобы тело начало скользить по поверхности другого тела, нужно приложить к телу $F_{внеш}$.

Максимальное значение силы трения покоя равно той силе, под действием которой тело начинает скользить.

Трение скольжения возникает, когда внешняя сила $F_{внеш}$ превышает максимальную силу трения покоя $F_{тр.\ 0}^{max}$. Тело начинает скользить и появляется **сила трения скольжения** - $F_{тр.\ с}$. При небольших относительных скоростях сила трения скольжения меньше, чем сила трения покоя, поэтому сдвинуть с места тяжелый предмет труднее, чем тянуть его по горизонтальной поверхности.

Трение скольжения между разнородными поверхностями меньше, чем между однородными, поэтому вкладыши подшипников скольжения и вал делают из разных материалов. Трение уменьшается также при увеличении твердости трущихся тел. Для уменьшения трения подшипники в часах делают из твердых камней: рубина или агата.

Трение качения $F_{тр.\ к}$ появляется тогда, когда, например, колесо катится по рельсу. Трение качения значительно меньше трения скольжения, поэтому большое применение находят подшипники качения, в которых трение скольжения оси во втулке заменяется трением качения шариков. Потеря на трение в шариковом подшипнике в 20-30 раз меньше, в подшипнике скольжения.

Для уменьшения силы трения широко применяются различные смазки. Смазка уменьшает трение в среднем в 6-10 раз. Причина уменьшения трения состоит в том, что твердые поверхности разделяются смазкой и перестают касаться друг друга. При этом скользят относительно друг друга отдельные слои жидкости. Трение между слоями жидкости – это внутреннее трение. Оно значительно меньше внешнего. Для смазки пригодны лишь достаточно вязкие жидкости, которые не выдавливаются из тонкого промежутка между трущимися поверхностями.

Происхождение сил трения весьма разнообразно. В зависимости от того, является ли трение внешним или внутренним, сухим или граничным, как обработаны поверхности, в каких условиях они находятся, возникновение сил трения объясняется разными физическими явлениями.

В случае сухого трения при грубой шероховатости поверхности основной причиной возникновения сил трения являются углубления и выступы этих поверхностей, частично входящие друг в друга. При движении одной поверхности по другой эти выступы разрушаются, вещество измельчается. На разрушение затрачивается некоторая работа, следовательно, при перемещении возникает сила, задерживающая движение.

При гладких поверхностях механизм трения другой. В этом случае касание твердых тел происходит лишь в отдельных точках, т.к. обработка не бывает идеальной. В местах касания создаются «мостики» реального контакта между телами, образующиеся на поверхности пленок, покрывающих тело. Материал этих в «пятнах прилипания» при относительном движении тел непрерывно срезается, и создаются новые точки контакта. При этом возникает сила сопротивления движению.

В глубоком вакууме (например, в космосе) металлы не покрываются окисными пленками, поэтому «мостики контакта» создаются из самих металлов. Разрушить их очень трудно и силы трения значительно возрастают.

Особый интерес представляет граничное трение. Некоторые вещества образуют на поверхности металла так называемый «молекулярный ворс». Удлинённые молекулы этих веществ, называемых поверхностно-активными, ориентируются перпендикулярно поверхности металла. Удерживаясь благодаря силам сцепления, молекулы стоят на поверхности металла как частокол. На первом слое молекул может отложится второй, молекулы которого ориентированы параллельно молекулам первого слоя.

При относительном движении тел молекулы не допускают непосредственного контакта между твердыми телами. Скольжение происходит между слоями ориентированных молекул. При этом сила трения значительно уменьшается.

Обсудим некоторые закономерности сухого трения. Рассмотрим лежащее на горизонтальной плоскости тело. В этом случае на тело действуют следующие силы:

$F_{\text{тяж}} = mg$ – сила тяжести – сила, с которой тело притягивается к Земле;

N – сила нормальной реакции опоры – сила, с которой поверхность, на которой лежит тело, действует на него (рис. 1).

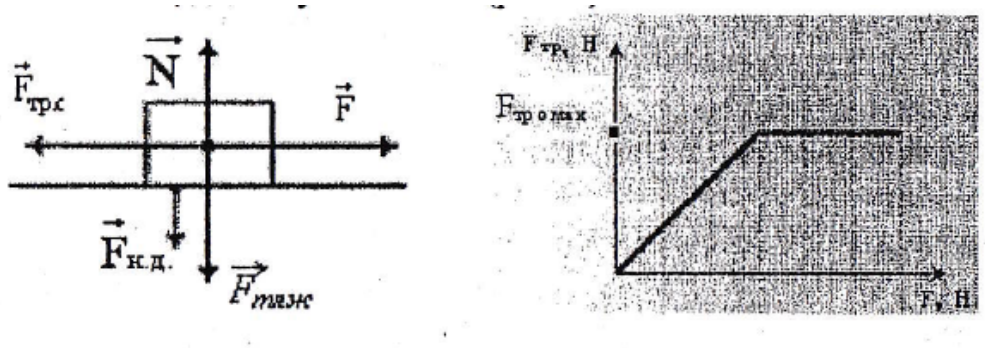

Рис. 1

Если к телу прикладывать внешнюю силу $F_{\text{тяги}}$, возрастающую от 0 до некоторого значения, то движение тела не возникает. Это свидетельствует о неоднозначности силы трения покоя; при попытке вывести тело из состояния покоя сила трения покоя изменяется от 0 до предельного значения $F_{\text{тр. 0}}^{max}$. Относительное движение тела возникает при условии:

$$F_{\text{тяги}} \geq F_{\text{тр.0}}^{max} \quad (1)$$

где $F_{\text{тр.0}}^{max}$ – предельная максимальная сила трения покоя.

При выполнении условия (1) тело начинает двигаться и появляется сила трения скольжения. При небольших относительных скоростях:

$$F_{\text{тр.с}} < F_{\text{тр.0}}^{max} \quad (2)$$

Законы сухого трения были впервые установлены Амонтоном, а позднее обобщены Кулоном. Закон **Амонтона-Кулона** можно сформулировать так: максимальная сила трения покоя, а также сила трения скольжения не зависят от площади соприкосновения тел и прямо пропорциональны величине силы нормального давления $F_{\text{н.д.}}$

$$F_{\text{тр.0}}^{max} = \mu_0 F_{\text{н.д.}} \qquad ($$

$$F_{\text{тр.с}} = \mu F_{\text{н.д.}} \qquad 3)$$

где $F_{\text{н.д.}}$ – сила нормального давления – сила, с которой тело действует на опору. Эта сила приложена к опоре и на тело не действует. По III закону Ньютона:

$$\vec{N} = -\vec{F}_{\text{н.д.}}$$

или в скалярной форме $N = F_{\text{н.д.}}$, тогда формулы (3) принимают вид:

$$F_{\text{тр.0}}^{max} = \mu_0 N \qquad ($$

$$F_{\text{тр.с}} = \mu N \qquad 4)$$

Безразмерный коэффициент пропорциональности μ_0 и μ называется **коэффициентом трения** (соответственно покоя и скольжения). Он зависит от материала трущихся поверхностей, их обработки и состояния (влажность, температура).

Из закона Амонтона-Кулона следует независимость силы трения от площади контакта трущихся тел. Физический смысл этого утверждения остается предметом дискуссии и в настоящее время.

Сила трения качения определяется по формуле:

$$F_{\text{тр}} = \lambda \frac{F_{\text{н.д.}}}{r} \qquad (5)$$

где r – радиус катка (цилиндра, колеса); $F_{\text{н.д.}}$ – сила, с которой каток прижимается к опоре; λ – коэффициент трения качения, имеющий размерность длины.

Коэффициент трения скольжения удобно определять, находя так называемый угол трения.

Если брусок поместить на наклонную доску, то при углах наклона к горизонту φ, меньших некоторого предельного угла φ_0, брусок будет удерживаться на доске силой трения покоя $F_{\text{тр.0}}$. Увеличивая угол наклона, можно добиться того, чтобы брусок начал скользить. Перед началом движения сила трения покоя достигает своей максимальной величины $F_{\text{тр.0}}^{max}$. Угол φ_0, при котором начинается скольжение, называется **углом трения**.

Коэффициент трения материала, из которого сделан брусок, по материалу доски (наклонной плоскости) можно определить, находя угол трения на опыте. Для определения коэффициента трения рассмотрим силы, действующие на брусок.

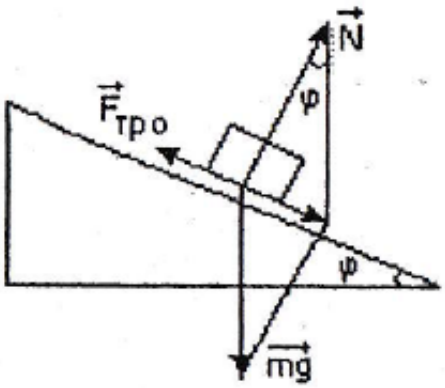

Рис. 2

На брусок действуют три силы. Со стороны Земли – сила тяжести $m\vec{g}$, со стороны доски – сила нормальной реакции $\vec{N}$ и сила трения покоя $\vec{F}_{\text{тр.0}}$ (рис. 2). Векторная сумма всех трех сил равна 0, и брусок покоится. Иначе говоря, равнодействующая сил $m\vec{g}$ и $\vec{N}$, которая стремится сдвинуть брусок, уравновешена силой трения покоя.

При увеличении угла наклона доски увеличивается равнодействующая сил $m\vec{g}$ и $\vec{N}$. При этом возрастает и сила трения покоя до тех пор, пока она не достигает своего максимального значения $\vec{F}_{\text{тр.0}}^{max}$. При дальнейшем увеличении угла наклона равновесие сил нарушится и брусок начнет скользить по доске. Угол наклона φ_0, при котором начнется скольжение,

зависит от коэффициента трения покоя между материалами бруска и доски. Условие равновесия тела:

$$m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{тр.с}} = 0 \quad (6)$$

В скалярной форме это уравнение принимает вид:

$$Ox: mgsin\varphi_0 - F_{\text{тр.с}} = 0 \text{ или } mgsin\varphi_0 = F_{\text{тр.с}}$$

$$O\text{y}: N - mgcos\varphi_0 = 0 \text{ или } mgcos\varphi_0 = N$$

Отсюда

$$\frac{mgsin\varphi_1}{mgcos\varphi_1} = \frac{F_{\text{тр.с}}}{N}, \frac{sin\varphi_0}{cos\varphi_0} = \frac{F_{\text{тр.с}}}{N} \rightarrow tg\varphi_0 = \frac{F_{\text{тр.с}}}{N} \quad (7)$$

По определению коэффициента трения скольжения (из формулы 4):

$$\mu = \frac{F_{\text{тр.с}}}{N} \quad (8)$$

Следовательно,

$$\mu = tg\varphi_0 \quad (9)$$

т.е. коэффициент трения скольжения равен тангенсу угла трения.

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА И ТЕОРИЯ МЕТОДА

Оригинальный метод определения коэффициента трения скольжения был предложен В. А. Желиговским. Установка состоит из горизонтальной доски, на которой двумя винтами укреплена линейка 1 (рис. 3). На доску кладется стальной треугольник 2 и квадратная пластинка 3 (сталь, латунь, текстолит, резина). Определяют коэффициент трения этих материалов по стали, из которой сделан треугольник.

В центре пластинки имеется отверстие, пользуясь которым можно отмечать ее положение на доске. Пластинку одной из сторон кладем к треугольнику: при перемещении треугольника вдоль линейки вправо, треугольник давит своей стороной на пластинку, стремясь отодвинуть ее. При этом пластинка начинает скользить по стороне треугольника.

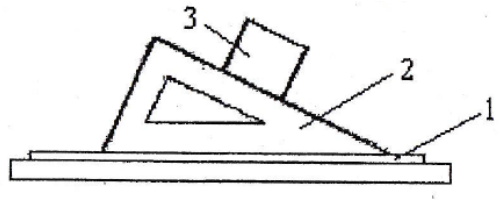

Рис. 3

Если бы пластинка скользила по треугольнику без трения, она отодвигалась бы по нормали к его стороне под действием его давления. Однако, между треугольником и боковой стороной пластинки возникает сила трения скольжения. Сила трения увлекает пластинку вправо, в результате чего траектория пластинки составляет некоторый угол φ с нормалью к треугольнику.

Для определения коэффициента трения найдем направление движения пластинки по доске. Для этого определяем силы, действующие на пластинку в горизонтальной плоскости.

Со стороны треугольника на пластинку действует сила $\vec{F}_1$ (рис. 4). Эта сила является равнодействующей силы нормальной реакции опоры $\vec{N}$ и силы трения скольжения $\vec{F}_{\text{тр.с}}$ треугольника о пластину. Траектория движения пластинки по доске совпадает с направлением движущей силы $\vec{F}_1$.

Кроме силы $\vec{F}_1$ на пластинку действует сила трения пластинки о доску $\vec{F}_2$, равная по величине и направленная противоположно силе $\vec{F}_1$. Однако, эта сила не может оказать влияния на траекторию движения пластинки. Она направлена во всех случаях противоположно силе $\vec{F}_1$. Таким образом, траектория движения пластинки определяется только соотношением силы трения скольжения $\vec{F}_{\text{тр.с}}$ и силы нормальной реакции опоры $\vec{N}$.

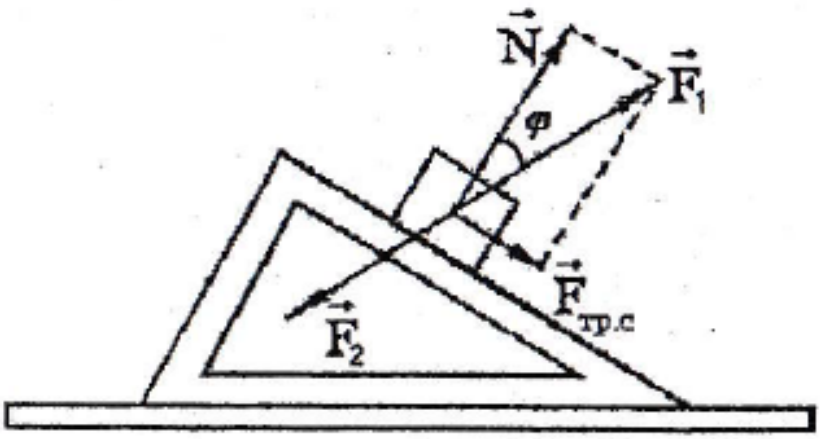

Рис. 4

Построив на опыте угол φ, найдем коэффициент трения скольжения $\mu_{\text{ск}}$ данной стороны пластинки по треугольнику (по стали).

Из определения коэффициента трения:

$$\mu_{\text{ск}} = \frac{F_{\text{тр}}}{N} \quad (10)$$

Из рис. 4 видно, что

$$\frac{F_{\text{тр}}}{N} = tg\varphi \quad (11)$$

Таким образом,

$$\mu_{\text{ск}} = tg\varphi \quad (12)$$

ИЗМЕРЕНИЕ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Предварительно на плоскости доски, лежащей горизонтально на столе, накладывают лист бумаги и прижимают его линейкой к доске. Кладут на

доску стальной треугольник вплотную к линейке в крайнем левом положении. На бумагу вплотную к треугольнику помещают пластинку, как это изображено на рис. 5.

В тетради записывают название того материала, из которого изготовлена пластинка при данном измерении. Ту же запись повторяют на листе, например, «латунь по стали».

Придерживая левой рукой пластинку и треугольник, отмечают карандашом на листе через отверстие начальное положение центра пластинки (точка L_1 на рис.5).

Плавно и равномерно передвигают треугольник вправо, прижимая его все время к линейке. Пластинке дают возможность свободно скользить по треугольнику.

Отмечают новое положение центра пластинки (точка L_2). Точки соединяют прямой и получают траекторию движения пластинки L_1L_2, с помощью чертежного треугольника проводят нормаль к стороне стального треугольника через точку L_1, затем через точку L_2 проводят линию L_2M, перпендикулярную к нормали L_1M.

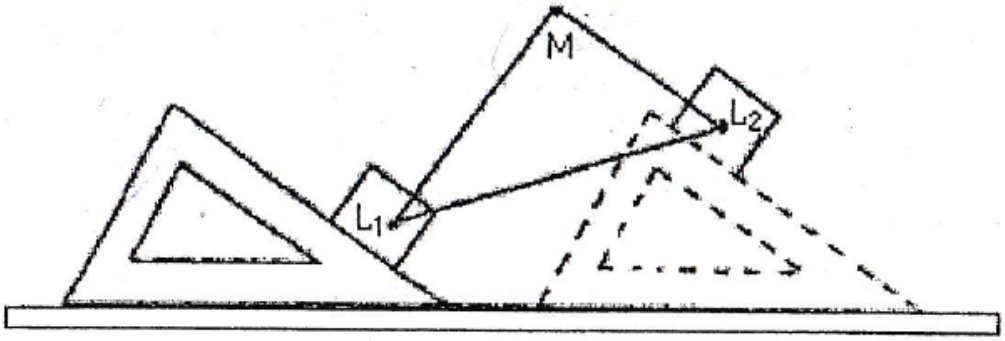

Рис. 5

Измеряют расстояние L_2M и L_1M с точностью до 1мм. Очевидно, что

$$tg\varphi = \frac{L_2\mathrm{M}}{L_1\mathrm{M}} \qquad (13)$$

Из формулы (12) следует, что коэффициент трения скольжения равен:

$$\mu_{\text{ск}} = \frac{L_2\mathrm{M}}{L_1\mathrm{M}} \qquad (14)$$

Такие измерения для данной пластинки проводят не менее трех раз. Построения выполняют на одном листе. Нужно только каждый раз брать разные начальные положения пластинки. Те же измерения повторяют для пластинок из других материалов. Результаты измерений оформляют в виде таблицы.

Сталь по стали (латунь по стали)				
№	L_2M	L_1M	$\mu_{\text{ск}}$	$M_{\text{ск сред}}$

1				
2				
3				
Текстолит по стали (пластик по стали)				
1				
2				
3				

Листы, на которых проводились измерения, показывают вместе с отчетом преподавателю.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие существуют виды трения? В чем проявляется трение?
2. Что такое трение покоя? Куда направлена сила трения покоя?
3. Когда возникает сила трения скольжения?
4. Как уменьшить силы трения? Что такое граничное трение?
5. В чем состоит закон Амонтона-Кулона?
6. Что такое угол трения? Какие силы действуют на брусок на наклонной плоскости?
7. Почему указанные на рис. 2 углы φ_0 равны между собой? Почему $tg\ \varphi_0$ равен отношению $F_{\text{тр.0}}/F_{\text{н.д.}}$?
8. Докажите, что $tg\ \varphi_0 = \mu$.
9. Опишите установку. Между какими поверхностями определяется коэффициент трения скольжения?
10. Почему трение пластинки о доску не влияет на результат опыта?
11. В каком порядке проводятся измерения?

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики: в 3 т./И.В. Савельев. М.: Наука, 1998. Т.1.

2. Яворский Б.М. Курс физики: в 3 т./Б.М. Яворский, А.А. Детлаф, Л.И. Милковская. М.: Высшая школа, 1999. Т.2.

3. Трофимова Т.И. Курс физики/Т.И. Трофимова. М.: Высшая школа, 2002.

4. Учебные анимированные клипаты по физики ЭТИ СГТУ [Электронный ресурс] http://tfi.sstu.ru/

5. http://www.sstu.ru/studentu/

6. http://techn.sstu.ru/Biblioteka/

7. http://techn.sstu.ru/new/SubjectFGOS/SpisokPredmetow.aspx