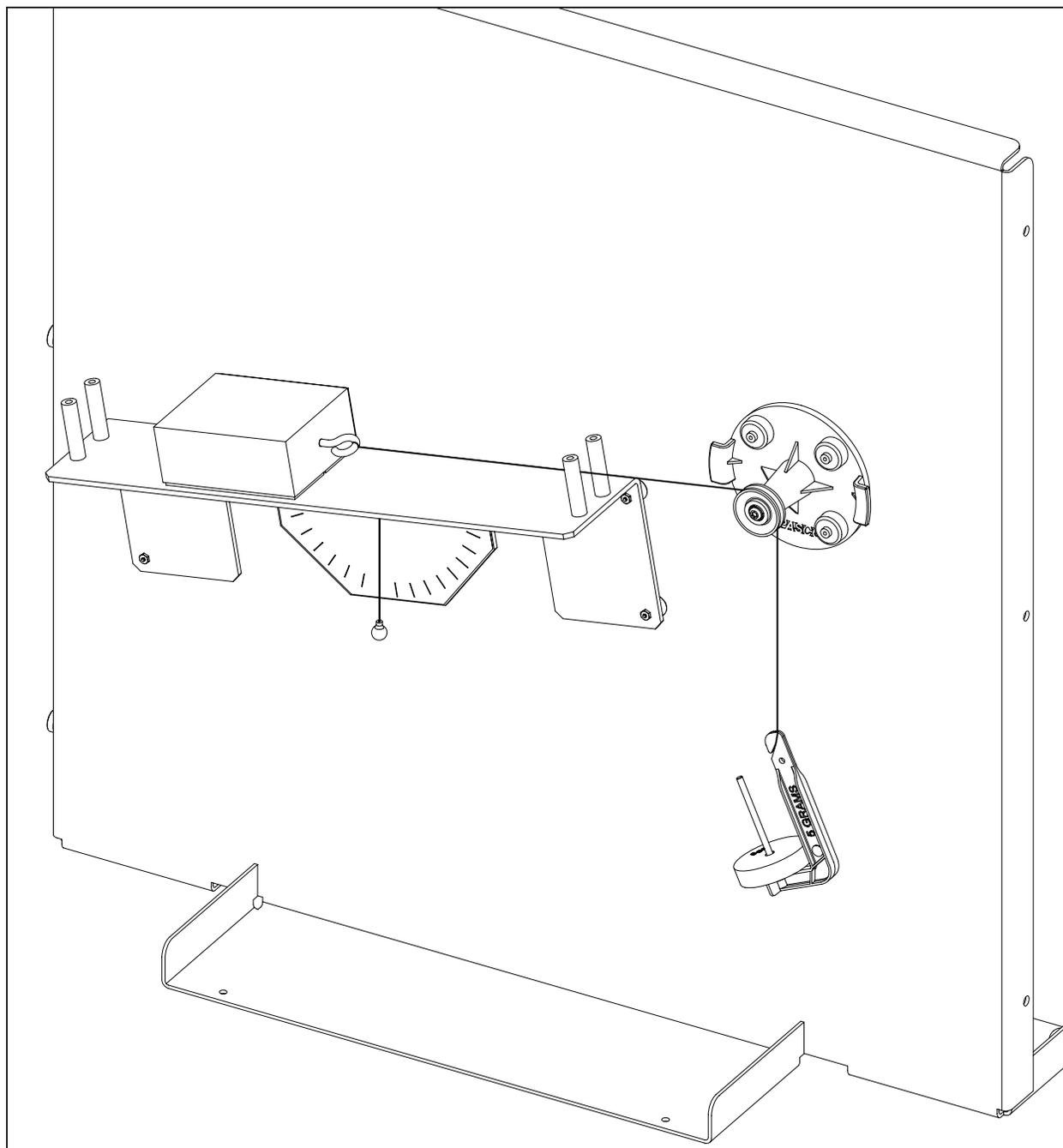




PASCO Mechanics
Набор для изучения основ статики
Артикул ME-9502



На титульной странице представлена иллюстрация бруска для изучения трения на наклонной плоскости (из набора для изучения основ статики PASCO) с подвешенным грузом (из набора грузов и подвесов PASCO, артикул ME-8979). Груз удерживается нитью, протянутой через малый подвижный блок. Большая часть компонентов набора крепится к входящей в комплект поставки доске магнитами. Данное руководство включает в себя описание 15 готовых экспериментов, позволяющих лучше освоить фундаментальные законы статики.

Содержание

Вводная часть	1
Оборудование	1
Рекомендуемое оборудование	3
Комплект принадлежностей	4
Комплект физических устройств	5
Информация о руководстве	10
ЭКСПЕРИМЕНТЫ	
1 Закон Гука – измерение сил	11
2 Сложение сил – результирующая и уравнивающая сила	13
3 Разложение сил на составляющие	17
4 Крутящий момент – параллельные силы	21
5А Центр массы	25
5В Равновесие физических тел	29
6 Крутящий момент – непараллельные силы	33
7 Наклонная плоскость	37
8 Трение скольжения и трение покоя	41
9 Простое гармоническое колебание – груз на нити	47
10 Простое гармоническое колебание – обычный маятник	53
11А Простое гармоническое колебание – физический маятник	57
11В Минимальный период колебаний физического маятника	63
11С Простое гармоническое колебание – балка на пружине	67
12 Простейшие механизмы – рычаг	73
13 Простейшие механизмы – наклонная плоскость	77
14 Простейшие механизмы – подвижный блок	81
15 Действие сил на «стрелу»	83
Техническая поддержка, гарантия и авторское право	85

Набор для изучения основ статики

Артикул ME-9502

Вводная часть

Изучение механики часто начинается с законов динамики Ньютона. Первый закон описывает условия, при которых предмет сохраняет состояние движения. Если действующая на предмет суммарная сила равна 0, то ускорение предмета также равно 0.

$$\text{Если } \Sigma F = 0, a = 0$$

Второй закон описывает, что происходит с предметом, если суммарная сила не равна 0. Ускорение прямо пропорционально суммарной силе. Его направление совпадает с направлением вектора результирующей силы. Ускорение обратно пропорционально массе:

$$a = \frac{F_{\text{суммарная}}}{m}$$

Большая часть материала, изученного в рамках вводного курса, связана с тем, как именно силы взаимодействуют с физическими телами. Набор для изучения основ статики призван помочь вам в изучении природы сил при отсутствии ускорения. Другими словами, в том случае, когда сумма векторов всех действующих на тело сил равна нулю.

Первой причиной, по которой изучается случай отсутствия ускорения, является тот факт, что измерения системы без ускорения выполнять проще, чем системы с ускорением. Изучая многочисленные способы действия сил на тело без последующего их ускорения, можно многое узнать о векторной природе сил. Вторая причина заключается в том, что в нашей повседневной жизни главным образом встречаются системы, не испытывающие ускорения.

Оборудование

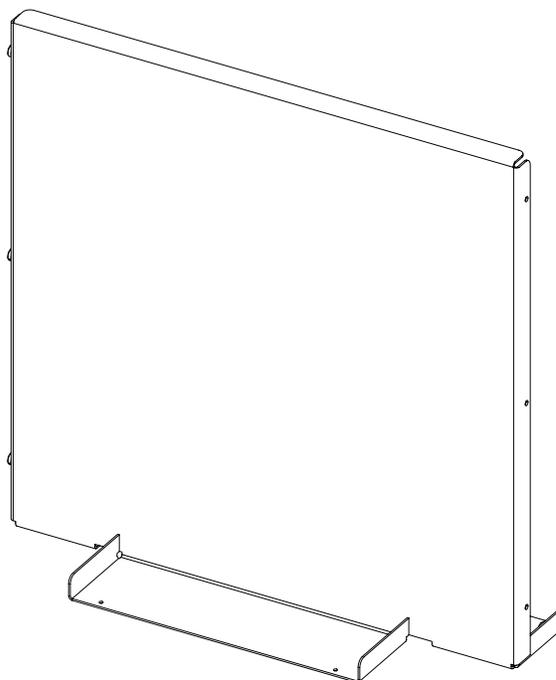
Набор для изучения основ статики, артикул ME-9502, включает в себя доску, комплект принадлежностей, комплект физических устройств, набор грузов и подвесов.

Артикул ME-9503: доска для изучения основ статики

Доска представляет собой лист металла размерами 45 x 45 см. С обеих сторон к листу прикреплены доска для маркеров белого цвета.

В основании доски предусмотрены резиновые амортизаторы. На доске можно писать легко стираемыми маркерами. Такие маркеры приобретаются в магазинах канцелярских товаров, а сделанные ими надписи легко стираются тряпкой или специальным ластиком для письменных досок.

К доске крепятся и удерживаются магнитами следующие компоненты: пружинные весы, малые и большой подвижные блоки, балансиры, колесо «Сила», колесо «Крутящий момент», наклонную плоскость, вспомогательный блок. Если доска не используется, компоненты можно хранить на её обратной стороне. Все компоненты, которые можно закрепить на доске, кроме наклонной плоскости, имеют в основании резиновое кольцо, которое защищает и доску, и сам компонент. Диаметр круглого магнитного основания равен 6,5 см.

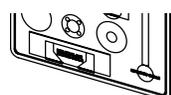
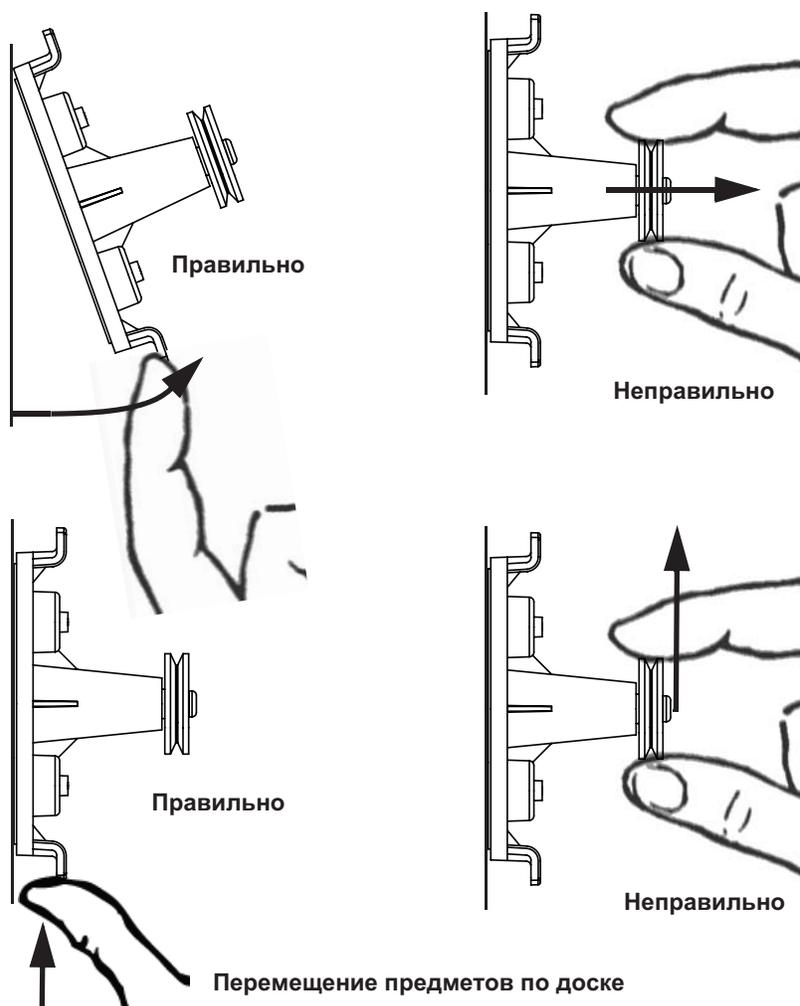


доска для изучения основ статики

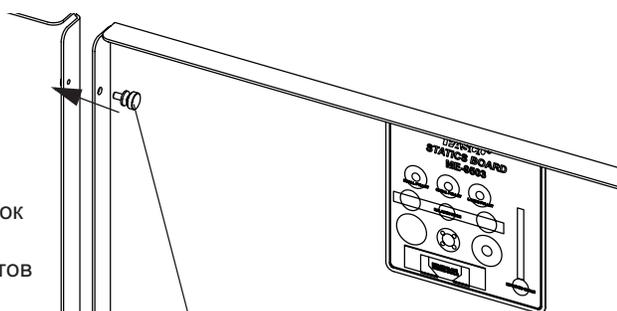
Важная информация

Перемещая по доске или снимая с неё предметы из набора, держите их за магнитное основание. Это позволит уменьшить механическое воздействие.

Вторую доску (поставляется отдельно) можно соединить с первой доской с помощью трёх входящих в комплект поставки винтов. Чтобы соединить доски, извлеките винты из резьбовых отверстий в боковой части первой доски. Соедините края обеих досок. Выставьте отверстия и соедините обе доски винтами.



соединение двух досок с помощью соединительных винтов



соединительные винты



доска для изучения основ статики: вид сзади

ME-9504 Комплект принадлежностей

Позиция	Кол-во	Позиция	Кол-во
Узел крепления нити	3	Винт-«барашек» 6-32 на 5/8" для зажима верёвки	2
Индикатор крутящего момента	6	Винт-«барашек» 4-40 на 1/2" для угломера на баланси́ре	2
Катушка нейлоновой нити	1	Винт-«барашек» 6-32 на 1/4" для опорной части баланси́ра	1
Зажим верёвки	2	Шайба, наружный диаметр 0,285 дюйма для угломера на баланси́ре	2
Индикатор угла	2	Грузик отвеса, медь (для наклонной плоскости)	1

ME-9505 Комплект компонентов

Позиция	Кол-во	Позиция	Кол-во
Подвижный блок большой	1	Вспомогательный блок	1
Подвижный блок малый	2	Тележка	1
Динамометр	1	Колесо «Крутящий момент»	1
Балансир	1	Наклонная плоскость	1
Колесо «Сила»	1	Брусok для изучения трения	1
Сдвоенный подвижный блок	1	Асимметричная пластина	1

ME-8979 Набор грузов и подвесов

Компоненты набора используются в большей части экспериментов по статике. В набор входят: 4 подвеса, контейнер для хранения, 27 грузов, вес которых варьируется от 0,5г до 100г. Грузы выполнены из меди, алюминия и поликарбоната.



артикул ME-8979, набор грузов и подвесов

Рекомендуемое оборудование*

Тензодатчик и усилитель тензодатчика

Тензодатчик 5 Н, артикул PS-2201, можно использовать для измерения силы. Значения силы можно регистрировать, выводить на дисплей и анализировать при подключении через усилитель к интерфейсу PASCO или портативному регистратору данных.



тензодатчик 5 Н, артикул PS-2201

Усилитель	Артикул
Усилитель тензодатчика PASPORT	PS-2198
Сдвоенный усилитель тензодатчика	PS-2205
Усилитель тензодатчика ScienceWorkshop	CI-6464

*Более подробная информация по тензодатчикам PASCO, усилителям тензодатчиков, портативным регистраторам данных и программному обеспечению для сбора данных приводится в каталоге PASCO или на сайте www.pasco.com.

Секундомер (артикул ME-1234)

Секундомер PASCO оснащён ЖК-дисплеем с двумя режимами индикации. Его точность равна 0,01 секунды в диапазоне не более 3599,99 секунд, и 1 секунда в диапазоне не более 359 999 секунд. В памяти можно сохранить до 9 значений времени события.



секундомер

Весы

Используйте весы OHAUS Scout Pro Balance 2000 г (артикул SE-8757A) или OHAUS Cent-O-Gram Balance (артикул SE-8725).



весы

**Динамометр (артикул ME-8924A)**

Пружинные весы (входящие в комплект компонентов, артикул ME-9505) также можно приобрести и отдельно как запасные или дополнительные весы для экспериментов с измерением нескольких сил

Комплект принадлежностей (артикул ME-9504)

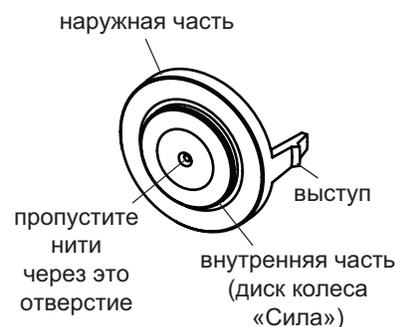
Данный комплект состоит из позиций, которые используются с изделиями из комплекта компонентов. Например, узел крепления нити вставляется в центр колеса «Сила», а индикатор крутящего момента – в колесо «Крутящий момент». Жажим для верёвки применяется на вспомогательном блоке. Такие позиции, как индикатор угла, винты-«барашки», шайбы и медные грузики поставляются как запасные компоненты.

Узел крепления нити

Вставив узел в центр колеса «Сила», вы сможете использовать собранное устройство для изучения векторов сил. Узел состоит из двух частей: прозрачная внутренняя часть из пластика (диск колеса «Сила»), который свободно двигается в центре наружной части с центральным отверстием и двумя выступами, благодаря которым вставляемый в колесо узел защёлкивается и удерживается на месте (эти две части по отдельности не использовать).

Первоначальная установка

Отрежьте три нити по 38 см. Пропустите нити через отверстие в узле. Край нитей свяжите вместе (например, в простой узел) так, чтобы нить не вытаскивалась обратно.

**String Tie Assembly****Индикатор крутящего момента**

Обратите внимание: индикатор крутящего момента имеет защёлку, которая вставляется в колесо «Крутящий момент». Остальные три индикатора являются запасными.

Первоначальная установка

К каждому из трёх индикаторов крутящего момента привяжите нить длиной 30 см.



Комплект компонентов (ME-9505)

Динамометр

В основании динамометра предусмотрено 4 сильных магнита. Трубка имеет три маркировки: Ньютоны, унции и миллиметры. Ослабив гайку-«барашек», можно поднять и опустить верхний крюк, чтобы выставить красный диск в один уровень с нулевой отметкой на трубке.

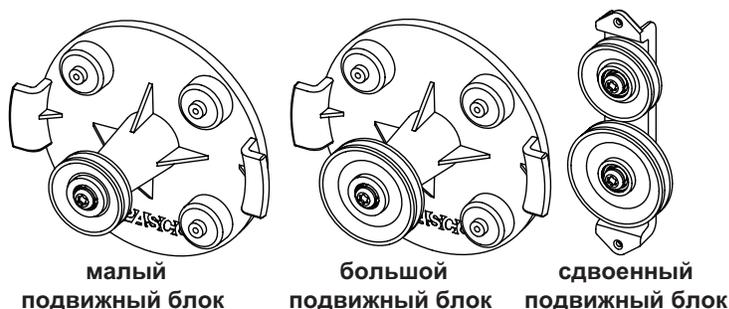
Чтобы выставить на весах нуль, сначала закрепите их на доске. На нижний крюк ничего не вешайте. Открутите гайку-«барашек» (несколько оборотов). Вращая верхний крюк по часовой стрелке (слева направо), опускайте диск индикатора, вращая его против часовой стрелки, поднимайте. Выставив диск в один уровень с нулевой отметкой, затяните гайку, удерживающую крюк.

Передвигая динамометр по доске, удерживайте их за выступы в основании. Выставьте весы в нужное положение (прикладывая к ним тянущее или толкающее усилие). Чтобы снять весы с доски, отожмите один или оба выступа в основании.

Большой и малый подвижные блоки, сдвоенный подвижный блок

Набор для изучения основ статики поставляется в комплекте с двумя малыми подвижными блоками и одним большим подвижным блоком. Блоки крепятся к доске магнитными основаниями. В комплект поставки изделия также входит сдвоенный подвижный блок, не имеющий магнитного основания.

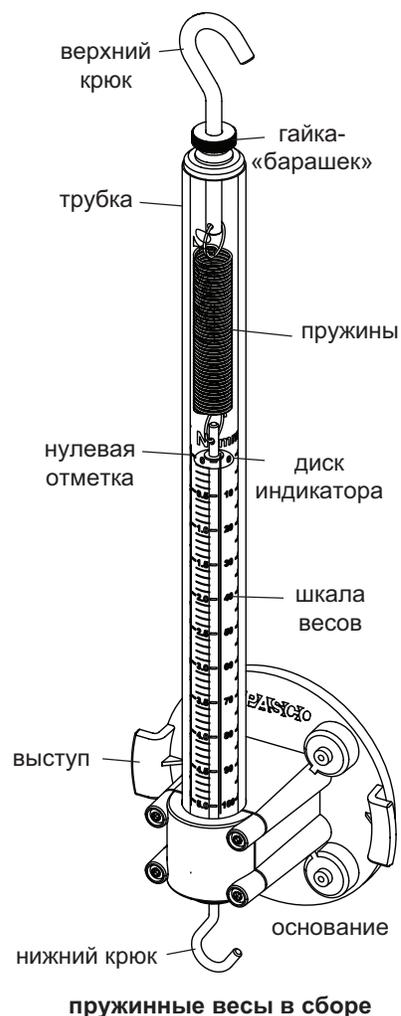
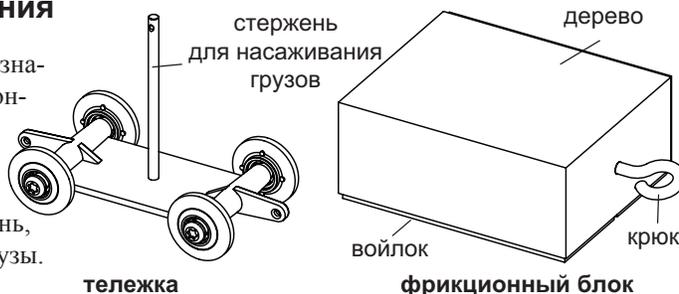
Сдвоенный подвижный блок предназначен для экспериментов с применением систем, состоящих из нескольких блоков. Удерживающую нить можно привязать к любому краю сдвоенного подвижного блока.



Все блоки оснащены шариковыми подшипниками с малым коэффициентом трения. Внешний диаметр малых блоков составляет 2,41 см, внутренний равен 1,65 см. Внешний диаметр больших подвижных блоков составляет 2,79 см, а внутренний равен 2,28 см.

Тележка и брусок для изучения трения

Тележка и брусок для изучения трения предназначены для экспериментов с применением наклонной плоскости. В каждом колесе тележки предусмотрены шариковые подшипники с малым коэффициентом трения. В центре тележки предусмотрен металлический стержень, на который насаживаются дополнительные грузы. Нить можно привязать с любого края.



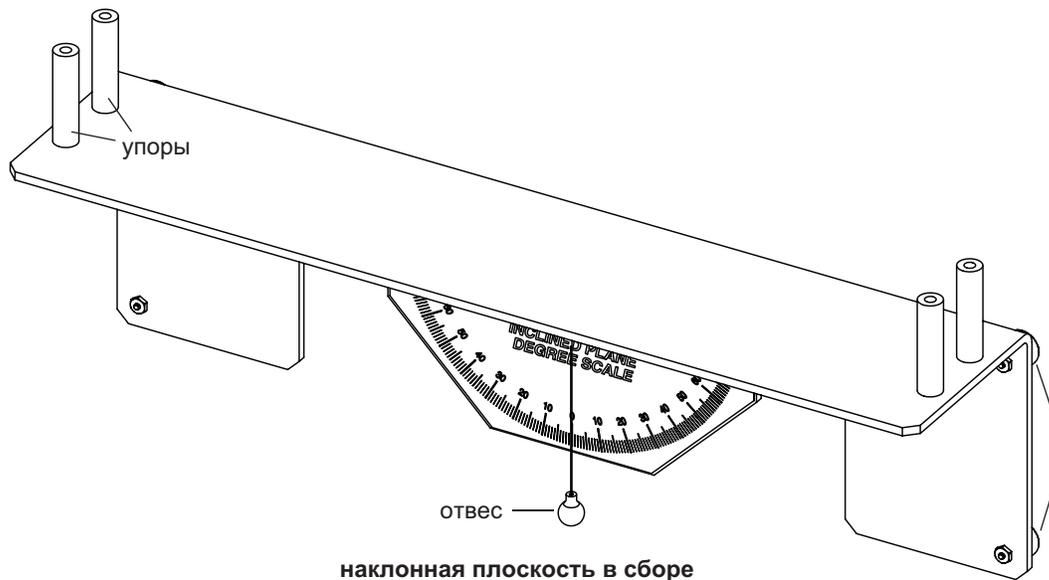
пружинные весы в сборе

Наклонная плоскость

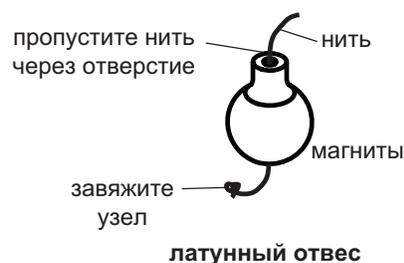
С обратной стороны наклонной плоскости предусмотрено 4 сильных магнита, которые удерживают её на доске.

ОСТОРОЖНО: магниты наклонной плоскости не имеют защитного покрытия. Закрепляя наклонную плоскость на доске, крепко удерживайте её, чтобы не повредить магниты возможным их ударением о поверхность доски.

Наклонная плоскость имеет упоры и градусную шкалу с подвешенным латунным грузиком (отвесом) для определения угла наклона.



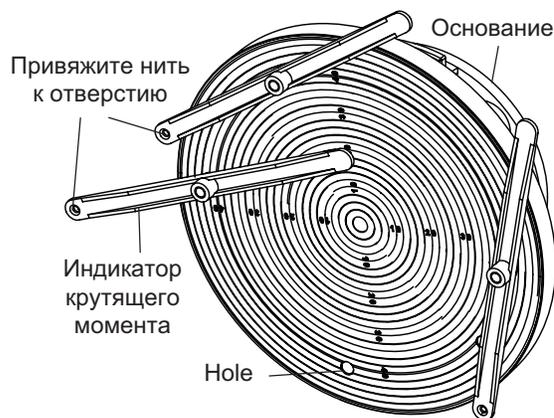
Комплект принадлежностей (артикул ME-9504) включает в себя запасной латунный отвес. Для замены отвеса воспользуйтесь крестообразной отвёрткой и открутите винт с обратной стороны градусной шкалы. Снимите старую нить и возьмите новую нить длиной 4 см. Один край нити пропустите через отверстие в отвесе, сделайте двойной узел, чтобы нить нельзя было вытащить обратно. Другой край нити пропустите через небольшое отверстие в верхней части градусной шкалы. Длину нити подберите так, чтобы отвес мог свободно качаться. Далее намотайте край нити на находящийся с обратной стороны винт. Затяните винт, который будет удерживать нить.



Колесо «Крутящий момент» и индикатор крутящего момента

Колесо «Крутящий момент» имеет диск с маркировкой (радиус диска 5 см). На диске предусмотрены концентрические окружности на расстоянии 2 мм друг от друга. Диск свободно вращается на шариковом подшипнике и имеет пять отверстий для фиксации индикатора крутящего момента. Индикатор вставляется в отверстие и тоже вращается свободно. К отверстию с края каждого индикатора привязывается нить длиной 30 см.

Чтобы снять индикатор, крепко держите его опорную часть, нажмите на край защёлки с обратной стороны диска.



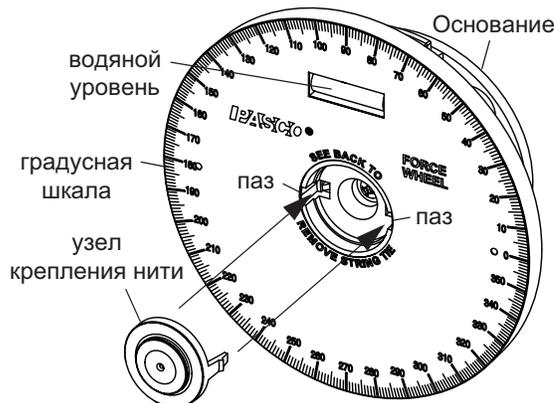
Колесо «Крутящий момент»
Индикатор крутящего момента

Колесо «Сила» и узел крепления нити

Колесо «Сила» имеет диск (радиус 5 см) с градусной шкалой 360°. Для выставления колеса применяется водяной уровень. В отличие от колеса «Крутящий момент» колесо «Сила» не вращается свободно, зато вращается диск, что и позволяет выставить колесо. После выставления колесо остаётся в этом положении до тех пор, пока не будет смещено.

НАПОМИНАНИЕ: перед тем, как вставить узел крепления нити в колесо «Сила», не забудьте протянуть три нити через отверстие в центре.

Узел крепления нити вставляется в центр колеса «Сила». Выровняйте выступы и пазы в отверстии в центре колеса «Сила». Вставляя, крепко нажмите на узел, чтобы оба выступа вошли в пазы и зафиксировались на позициях. Обратите внимание, что поверхность наружной части узла находится чуть ниже поверхности колеса «Сила» (она немного «утоплена» в колесо), а поверхность внутренней части находится заподлицо с ней.



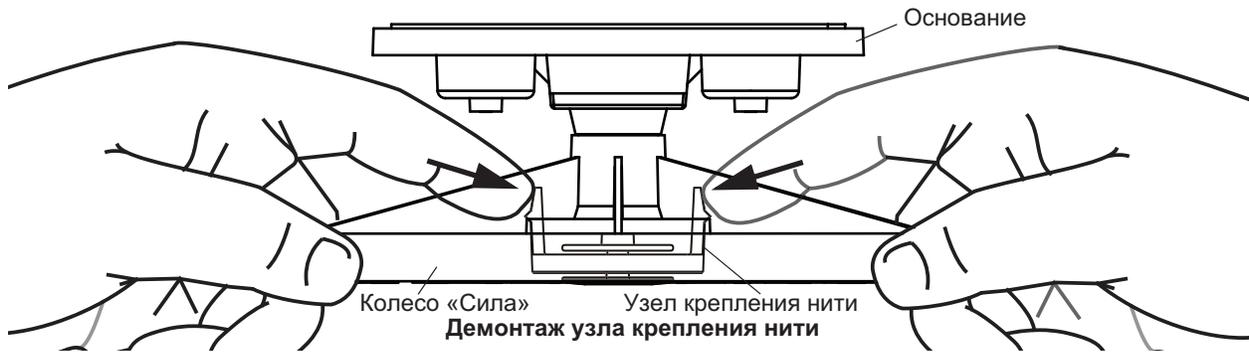
колесо «Сила» (в сборе)
узел крепления нити (в сборе)

Демонтаж узла крепления нити

Если вам необходимо демонтировать узел крепления нити (например, для замены нити), снимите колесо с доски. Внизу на диске приводятся инструкции, как демонтировать узел.

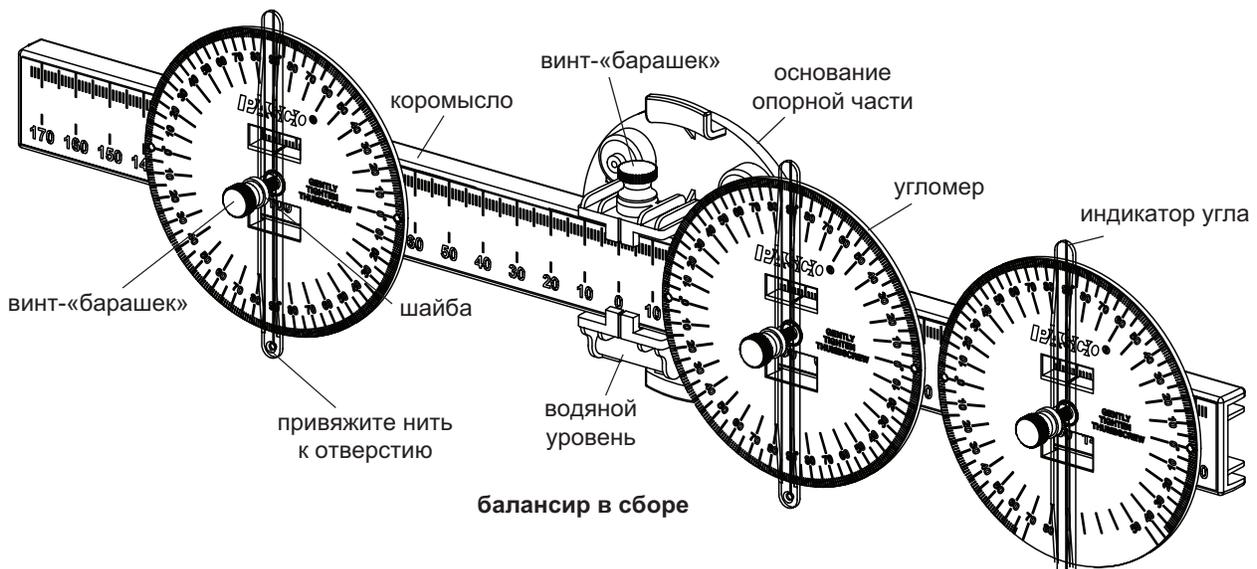


(представьте, что диск колеса «Сила» является *прозрачным*, и вы можете видеть узел крепления нити). Удерживая колесо, как показано на иллюстрации, надавите пальцами на пластмассовые выступы, чтобы узел «выскочил» из колеса.



Балансир (в сборе)

Балансир состоит из коромысла, опорной части и трёх угломеров, надеваемых на коромысло. На каждом угломере предусмотрен прозрачный индикатор угла. На опорной части имеется водяной уровень для выставления коромысла.



Отрегулируйте коромысло, ослабив винт-«барашек» сверху опорной части и сдвигая коромысло влево или вправо. Чтобы передвинуть угломер по коромыслу, сначала ослабьте винты-«барашки» в центре. Обратите внимание, что три угломера используются не во всех экспериментах.

Снятие показаний со шкалы

Зафиксируйте положение угломера относительно срединной точки – показания можно снять через два прямоугольных «окошка». В нижнем «окошке» видно положение с точностью до сантиметра, в верхнем – с точностью до миллиметра. На нижнем краю верхнего «окошка» имеется индикаторная линия. Пример: нижнее «окошко» показывает положение между 50 мм и 60 мм. Верхнее «окошко» показывает положение 55 мм.



Вспомогательный блок

Вспомогательный блок выполняет несколько функций. Его можно использовать в качестве опоры для тензодатчика 5 Н, артикул PS-2201. На блоке также предусмотрен стержень, на который можно подвесить асимметричную пластину, а на входящем в комплект зажиме верёвки можно закрепить нить. Винт-«барашек» тензодатчика «улавливается» резиновым кольцом круглого сечения, которое не даёт винту выпасть.

Установка тензодатчика

Для набора для изучения основ статики вы можете использовать тензодатчик 5 Н (приобретается отдельно). С его помощью можно измерять силу аналогично тому, как она измеряется динамометром. Калиброванный тензодатчик можно использовать для калибровки динамометра. Сначала пропустите нить через зажим, зажим установите в положение LOAD. Край тензодатчика с маркировкой FIXED прикрепите к винту-«барашку» и установите на вспомогательный блок.

Использование зажима

Зажим соединяется с вспомогательным блоком и нитью. Используйте зажим для соединения нити с тензодатчиком (см. иллюстрацию выше), который устанавливается на вспомогательный блок.

Наиболее оптимальный вариант – закрепить нить в зажиме, а зажим установить на вспомогательный блок или тензодатчик. Зажим состоит из двух неразборных частей. Возьмите зажим, как показано на иллюстрации «А», оставив открытым отверстие, через которое будет пропущена верёвка. Верёвка вставляется в плоский край зажима (не в заострённый край). Снова пропустите верёвку через зажим, как показано на иллюстрациях «В» и «С». Закрепите зажим на вспомогательном блоке или тензодатчике – для этого вкрутите в отверстие зажима винт-«барашек» и затяните его.

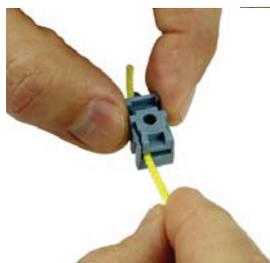
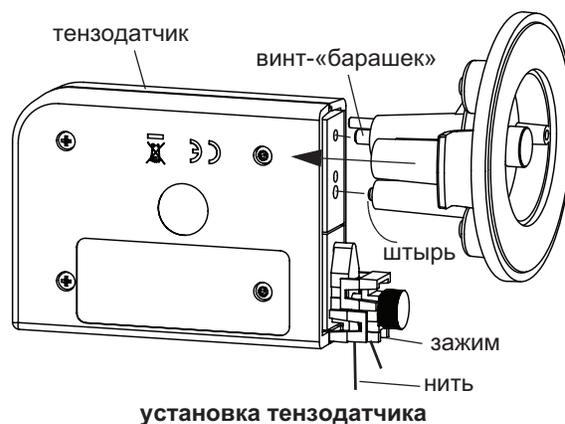
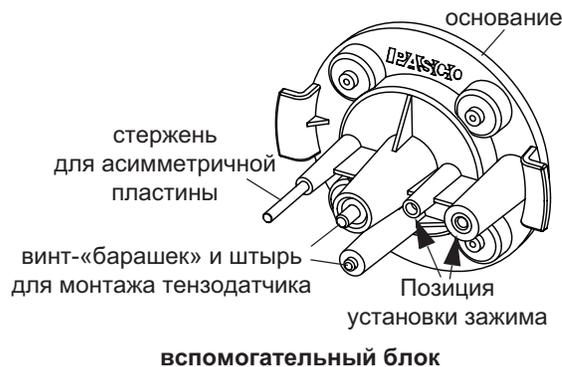


Иллюстрация А: держите зажим, «разделив» его на две части

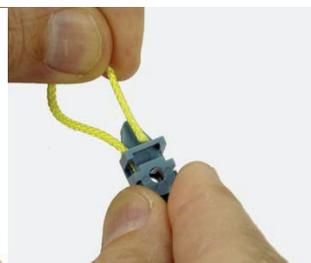


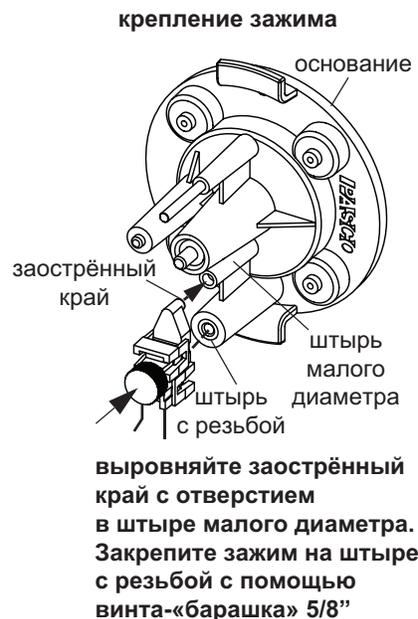
Иллюстрация В: повторно пропустите верёвку через зажим



Иллюстрация С: верёвка проходит вокруг отверстия для винта-«барашка»

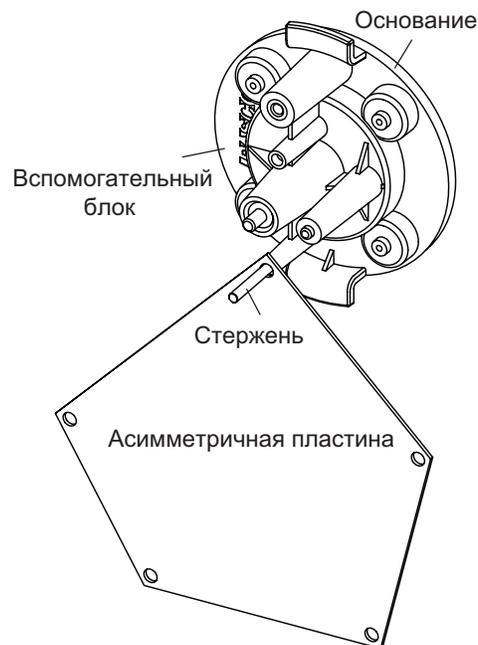


Иллюстрация D: теперь зажим можно закреплять на вспомогательном блоке или тензодатчике



Асимметричная пластина

Асимметричная пластина представляет собой пятиугольник, в каждом углу которого выполнено отверстие. На вспомогательном блоке предусмотрен тонкий металлический штырь, на который подвешивается пластина – пластина будет качаться на нём, пока не достигнет состояния равновесия.



Подвесьте асимметричную пластину

Информация о Руководстве

Набор ME-9502 является учебным пособием для изучения фундаментальных основ статической механики. Сначала эксперименты дают представление о силе как о векторной величине и уже на основе этой концепции способствуют пониманию равновесия физического тела под действием разных сил и крутящих моментов. В программу обучения входят эксперименты для демонстрации простого гармонического движения с маятником и системой, состоящей из пружин и грузов.

Эксперименты разделены на три категории: Базовые эксперименты, Эксперименты повышенной сложности, Простейшие механизмы.

В Базовых экспериментах представлена основная информация для введения в статическую механику. В рамках экспериментов изучаются такие понятия, как вектор силы, крутящие моменты, центр масс.

Эксперименты повышенной сложности позволяют обучающимся комбинировать уже полученные базовые знания для понимания такого явления, как статическое равновесие. В рамках этих же экспериментов изучаются трение и простое гармоническое движение.

Эксперименты категории **Простейшие механизмы** дают обучающимся возможность исследовать практическое применение уже изученных базовых знаний и ознакомиться с новыми важными концепциями. На основании знаний статического равновесия и сохранения энергии изучаются такие простейшие механизмы, как рычаги, наклонные плоскости и системы подвижных блоков.

Для некоторых экспериментов кроме оборудования из набора для изучения основ статики понадобится ряд обычных предметов: карандаши, линейки, угломеры, бумага, секундомер, весы. В начале описания каждого эксперимента приводится список необходимого оборудования, по которому вы можете проверять наличие нужных предметов.

ПРИМЕЧАНИЕ: векторные величины выделены жирным шрифтом, например, **F**, **W**, **F1**. Обычный шрифт указывает на значение векторной величины. В связи с тем, что в данных экспериментах не затрагивается векторный «характер» крутящего момента, для его обозначения жирный шрифт не применяется.

Эксперимент 1: Закон Гука – измерение силы

Необходимое оборудование

Доска
Набор грузов и подвесов

Пружинные весы
Нить

Вводная часть

В практическом смысле сила есть не что иное, как толкающее или тянущее усилие. Сила также является векторной величиной, имеющей величину и направление. Приложить и измерить силу можно несколькими способами. Например, можно подвесить груз известной массы и определить силу на основании того предположения, что сила притяжения тянет груз вниз к центру Земли. Эта сила равна $F = mg$, где m является известной массой, а g – гравитационным ускорением ($9,8 \text{ м/с}^2$). Значение g может быть выражено и как $9,8 \text{ Н/кг}$. Другой способ – потянуть пружину. При этом пружина будет растягиваться, и длина, на которую она растянется, будет прямо пропорциональна прикладываемой силе. Пружину можно откалибровать, чтобы далее производить измерения неизвестных сил. В данном эксперименте вы будете использовать известную силу, связанную с гравитацией, которая оказывает тянущее усилие на калиброванные грузы. Кроме этого вы изучите свойства пружинных весов.

Закон Гука

Закон Гука описывает связь между значением силы и длиной, на которую растягивается «идеальная» пружина. Согласно этому закону сила и длина прямопропорциональны. Другими словами, при делении силы на удлинение получается постоянная k , которая называется коэффициентом жесткости пружины.

Подготовка оборудования

Закрепите динамометр на доске так, чтобы пружина висела вертикально. За нижний крюк ничего не подвешивайте. Индикатор должен быть выровнен с нулевой отметкой. Чтобы установить весы на нуль, ослабьте гайку-«барашек» в верхней части весов. Чтобы опустить индикатор, вращайте верхний крюк по часовой стрелке, чтобы поднять, вращайте против часовой стрелки. Выровняв индикатор с нулевой отметкой, затяните гайку.

Процедура

1. К нижнему крюку привяжите нить. Привяжите нить к подвесу.
2. Добавляйте к подвесу грузы, пока индикатор не дойдёт до отметки 10 мм. Массу подберите так, чтобы индикатор подошёл максимально близко к этой отметке. Определите погрешность измерения. Если добавить или убрать 0,5 г, заметны ли изменения? Что произойдёт, если добавить или убрать 1 г или 2 г?
3. Запишите общее значение массы грузов, включая вес подвеса. Результат и погрешность внесите в таблицу.
4. Добавляйте грузы, пока индикатор не дойдёт до отметки 20 мм. В таблицу внесите общую массу грузов и погрешность.
5. Повторяйте действия, каждый раз смещая индикатор на 10 мм вниз, пока он не дойдёт до отметки 80 мм. В таблицу внесите общую массу грузов и погрешность.

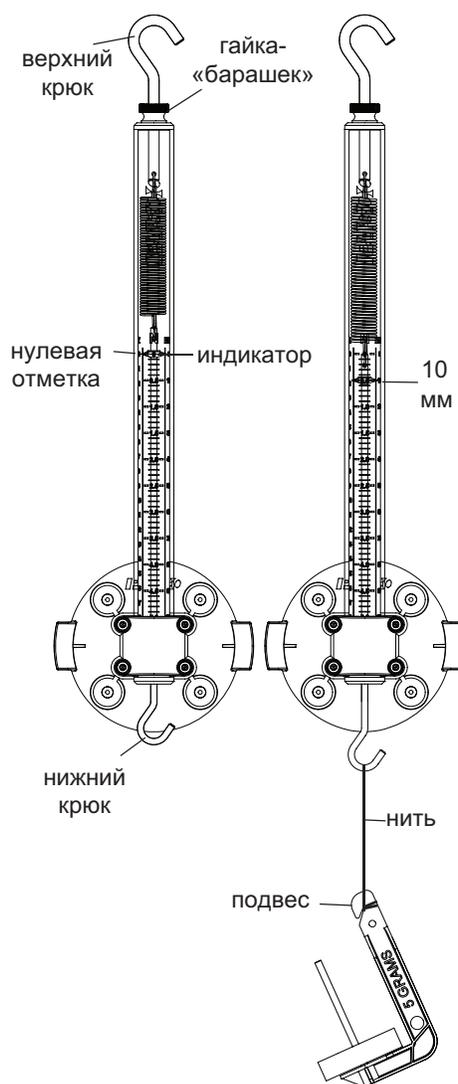


Иллюстрация 1.1: подготовка оборудования и процедура

Таблица данных

Растягивание пружины, мм	Масса, кг	Погрешность	Вес (Н)
0,010 м (10 мм)			
0,020 м (20 мм)			
0,030 м (30 мм)			
0,040 м (40 мм)			
0,050 м (50 мм)			
0,060 м (60 мм)			
0,070 м (70 мм)			
0,080 м (80 мм)			

Расчёты

- С помощью формулы $F = mg$, где m – это масса, а g – гравитационное ускорение, рассчитайте вес (Ньютон) в каждом опыте. Значения веса внесите в таблицу. Чтобы получить корректное значение силы в Ньютонах, преобразуйте значение массы в килограммы.
- На листе бумаги в клетку постройте график зависимости длины растягивания пружины (m) от веса (Ньютон). Для длины растягивания пружины выберите ось «X».
- Проведите линию, которая наиболее точно соответствует вашим данным на графике. Наклон линии этого графика будет являться соотношением силы, растягивающей пружину, и длины, на которую пружина растягивается (сила / длина). Другими словами, наклон будет представлять собой коэффициент жесткости пружины динамометра.
- Определите коэффициент жесткости пружины динамометра по составленному вами графику и запишите полученный результат. Не забудьте указать единицы измерения (Ньютоны на метр).

Константа пружины = _____.

Использование пружинных весов для измерения силы

- Подвесьте к пружинным весам груз 160 г (0,16 кг). Рассчитайте вес, используя формулу $F = mg$. Снимите показания силы в Ньютонах с пружинных весов.

Вес = _____. Показания пружинных весов = _____.

- Насколько сопоставимы показания весов с фактическим весом?

- Рассчитайте разницу в процентах: $\left| \frac{\text{Вес} - \text{Показания}}{\text{Вес}} \right| \times 100$

Разница в процентах = _____.

Вопросы

- Согласно Закону Гука соотношение между силой и растяжением пружины является линейным. Если бы Закон Гука не действовал, можно ли было успешно использовать пружину для измерения сил? Если да, то как?
- Каким образом можно использовать Закон Гука для калибровки пружины, которая будет применяться для измерения сил?
- Проходит ли линия наибольшего соответствия (на вашем графике) через нуль? Если нет, что это значит?

Эксперимент 2: Сложение сил – результирующая и уравнивающая сила

Необходимое оборудование

Доска
Колесо «Сила»
Набор грузов и подвесов

Пружинные весы
Большой и малый подвижные блоки
Нить

Теоретическая часть

На иллюстрации 2.1 лица «А» и «В» оказывают тянущее усилие на застрявшую в грязи машину (сила обозначена как F_A и F_B). Эти силы направлены к одной точке, каждая имеет направление (оно показано стрелкой вектора) и значение, которое пропорционально длине стрелки. Значение силы не зависит от длины буксировочного троса.

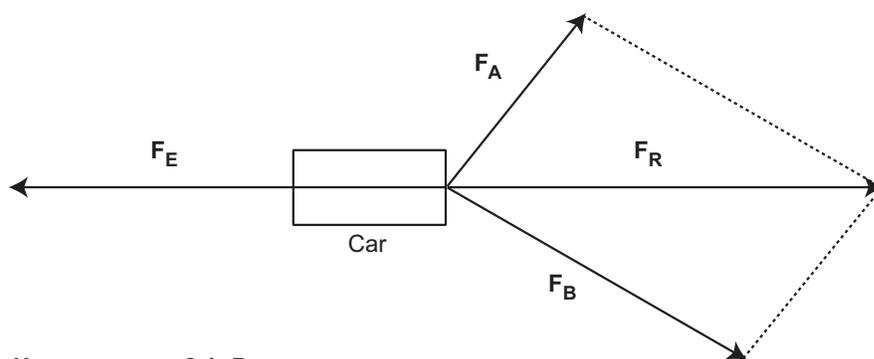


Иллюстрация 2.1: Результирующая и уравнивающая сила

Значение общей силы, которую прикладывают оба человека, можно определить, сложив векторы F_A и F_B . В данном примере используется метод параллелограмма. Диагональ параллелограмма называется результирующей силой F_R . Она показывает направление и значение комбинации сил F_A и F_B .

В связи с тем, что машина не двигается, суммарная сила должна быть равна 0. Сила трения между машиной и грязью является эквивалентом результирующей силы F_R . Эквивалент противодействующей силы – уравнивающая сила F_E . Данная сила имеет то же значение, что и результирующая сила F_R , но противоположное направление.

Подготовка оборудования

Закрепите на доске пружинные весы и колесо «Сила», как показано на иллюстрации. Вращайте колесо до тех пор, пока оно не будет выставлено по водяному уровню. Одну нить от диска (внутренняя часть узла крепления нити) в центре колеса «Сила» привяжите к нижнему крюку пружинных весов. Вторую нить привяжите к подвесу. Третью нить пусть висит свободно. На подвес повесьте груз 80 г (0,080 кг).

Отрегулируйте пружинные весы так, чтобы диск находился в центре колеса. Подвес с висящим на нём грузом прикладывает направленную вниз силу, $F_g = mg$ (сила, вызванная гравитацией, где m – общая масса подвеса и груза). Когда диск находится в центре, система находится в равновесии, значит, направленная вниз сила, должна быть уравновешена равной силой, но с противоположным направлением, то есть уравнивающей силой F_E . В данном случае уравнивающая сила F_E прикладывается динамометром.

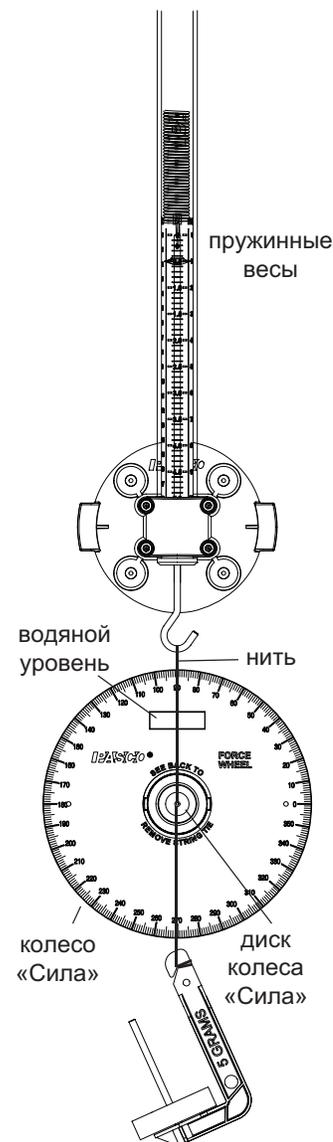
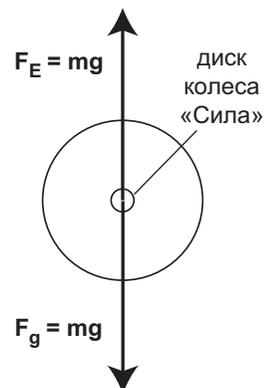


Иллюстрация 2.2: Подготовка оборудования



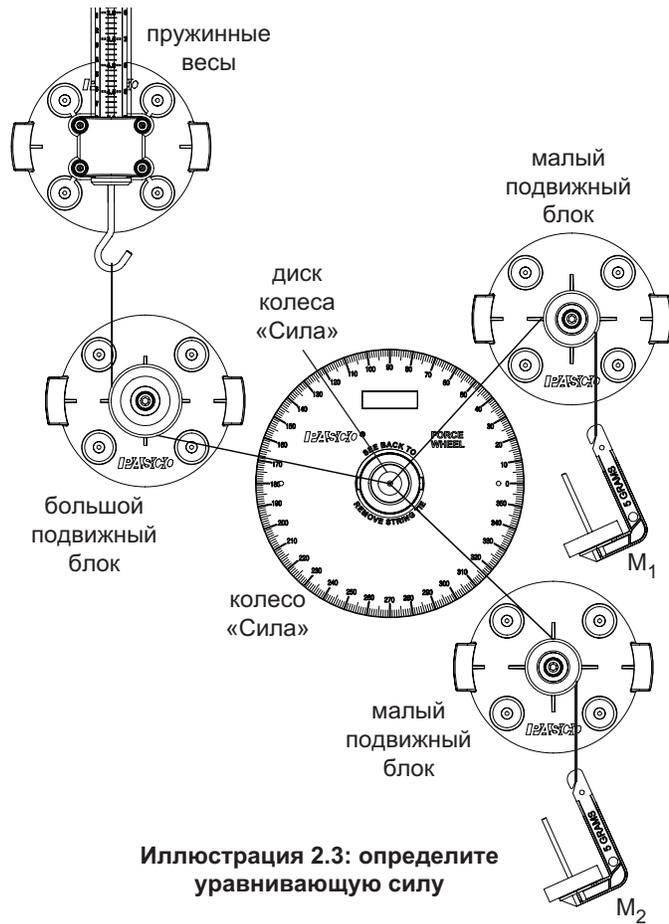
Набор для изучения основ статики

Ход работы: две силы

1. Повесьте на подвес груз 0,5 г (или снимите с него груз этой массы). Сместился ли диск с центрального положения? Насколько можно менять массу груза на подвесе, чтобы диск оставался в центре?
2. Каково значение и направление F_g – силы тяжести, которую прикладывает подвес? $F_g = mg$.
 - F_g : значение _____ Направление _____
3. С помощью пружинных весов и колеса «Сила» определите значение и направление уравнивающей силы, то есть F_E .
 - F_E : значение _____ Направление _____

Ход работы: три силы

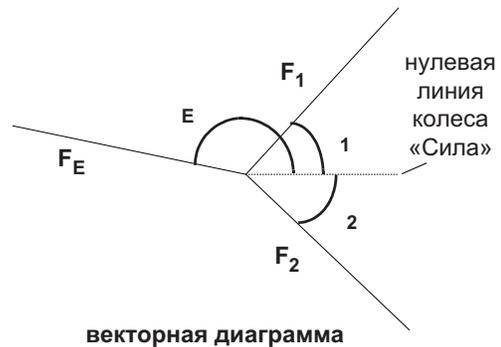
1. Закрепите на доске один большой и два малых подвижных блока. Пружинные весы двигайте, как показано на иллюстрации.
2. Привяжите нити к нижнему крюку пружинных весов и подвесам, подвешенным через малые подвижные блоки.
3. Подвесьте груз 30 г (0,030 кг) на верхний подвес, на нижний подвес – груз 50 г (0,050 кг).
4. Отрегулируйте большой подвижный блок и пружинные весы так, чтобы диск находился в центре колеса «Сила».
5. Насколько можно изменить вес грузов на подвесе, чтобы диск не сместился из центра колеса «Сила»?



Данные

Запишите значения масс подвешенных грузов M_1 и M_2 (учитывайте при этом и массу самого подвеса), значения сил F_1 и F_2 в Ньютонах, F_E , углов θ_1 , θ_2 и θ_E относительно нулевой линии колеса «Сила».

Масса (кг)	Сила (Н)	Угол (°)
M_1	F_1	θ_1
M_2	F_2	θ_2
	F_E	θ_E



Анализ

1. На отдельном листе бумаги в клетку с помощью записанных в таблицу значений составьте векторную диаграмму для \mathbf{F}_1 , \mathbf{F}_2 и \mathbf{F}_E . Выберите приемлемый масштаб, например, 2,0 см/Ньютон, сделайте длину каждого вектора пропорциональной значению силы. Присвойте каждому вектору символ, укажите значение силы, которую он обозначает.
2. На вашей векторной диаграмме, используя метод параллелограмма, отобразите силы \mathbf{F}_1 и \mathbf{F}_2 . Результирующей силе присвойте символ \mathbf{F}_R . Измерьте длину \mathbf{F}_R , чтобы определить значение результирующей силы. Зафиксируйте это значение на векторной диаграмме.
3. На вашей диаграмме определите направление \mathbf{F}_R относительно горизонтальной оси вашей диаграммы. Отметьте угол θ_R .

Вопросы

1. Точно ли соответствует значение вектора уравнивающей силы \mathbf{F}_E значению вектора результирующей силы \mathbf{F}_R (чтобы силы были уравновешены, значения должны быть точно одинаковыми)? Если нет, в чём могут заключаться причины отличий?
2. Сравните направление вектора уравнивающей силы \mathbf{F}_E с вектором результирующей силы \mathbf{F}_R .

Дополнительно

Проведите новые эксперименты, меняя значения и направления \mathbf{F}_1 и \mathbf{F}_2 .

Эксперимент 3: Разложение сил на составляющие

Необходимое оборудование

Доска
Колесо «Сила»
Набор грузов и подвесов

Пружинные весы
Подвижные блоки (2)
Нить

Теоретическая часть

В Эксперименте 2 вы складывали направленные к одной точке силы, чтобы определить значение и направление суммарной силы. В этом эксперименте задача будет обратной: вам необходимо будет определить две силы, которые при сложении будут иметь то же значение и то же направление, что и исходная (суммарная) сила. Вы узнаете, что любую силу в плоскости, определяемой осями X и Y, можно отобразить вектором по оси “x” и вектором по оси “y”.

Подготовка оборудования

Подготовьте оборудование, как показано на иллюстрации. Создайте вектор силы F , подвесив груз M_1 к нити от диска в центре колеса «Сила» (нить должна проходить через подвижный блок).

Динамометр и подвижный блок отрегулируйте так, чтобы нить от пружинных весов была натянута горизонтально от нижней части подвижного блока до диска колеса «Сила». Нитью соедините второй подвес и диск в центре колеса «Сила».

Теперь сдвиньте динамометр к подвижному блоку или наоборот – от него, чтобы отрегулировать горизонтальную составляющую (x-составляющую) силы F_x . Отрегулируйте вес на вертикальном подвесе M_2 , чтобы отрегулировать вертикальную составляющую (y-составляющая) силы F_y . Вертикальную и горизонтальную составляющие необходимо отрегулировать так, чтобы диск находился в центре колеса «Сила».

Обратите внимание: x- и y-составляющие фактически являются x- и y-составляющие уравновешивающей силу F силы F_E , а не самой силы F .

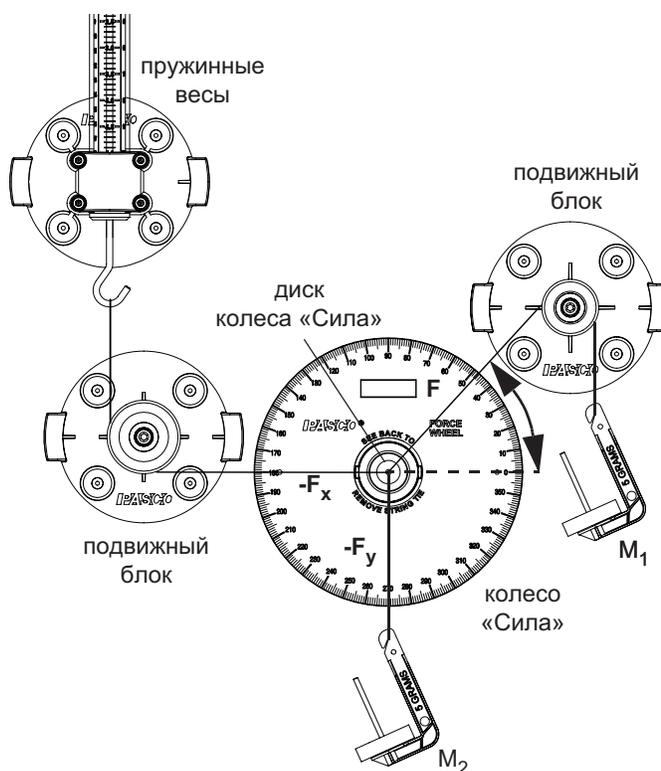


Иллюстрация 3.1: подготовка оборудования

Ход работы 1

1. Рассчитайте и запишите значение F (используя формулу $F = mg$). Для измерения угла F используйте колесо «Сила», значение угла запишите.
 - Значение $F =$ _____ Угол $\theta =$ _____
2. Запишите значение x-составляющей силы F , рассчитайте и запишите значение y-составляющей силы F .
 - X-составляющая = _____ Y-компонент = _____

- Каковы значения F_x и F_y , x - и y -составляющих F ?
 - $F_x =$ _____ $F_y =$ _____
- Измените значение и направление вектора силы F , повторите эксперимент.
- Запишите значение и угол вектора силы F , а также значения F_x и F_y .
 - Значение $F =$ _____ Угол $\theta =$ _____
 - $F_x =$ _____ $F_y =$ _____

Справочные сведения

Зачем для определения векторов необходимо использовать составляющие? Первая причина: использование векторов облегчает их математическое сложение. На иллюстрации представлены x - и y -составляющие вектора длиной F , а также угол θ относительно оси x . В связи с тем, что компоненты находятся под прямым углом относительно друг друга, для определения результирующей силы используется метод параллелограмма в виде прямоугольника. С помощью прямоугольного треугольника AOX можно рассчитать составляющие F :

- F_x , x -составляющая $F = F \cos \theta$
- F_y , y -составляющая $F = F \sin \theta$

Если вы хотите сложить несколько векторов, определите x - и y -составляющие каждого из них. Сложите x -составляющие и y -составляющие. Получившиеся значения будут значениями x - и y -составляющих **результирующей силы**. Значение результирующей силы F_R является квадратным корнем суммы квадратов x - и y -составляющих результирующей силы (R_x и R_y , соответственно):

$$F_R = \sqrt{(R_x)^2 + (R_y)^2}$$

Угол результирующей силы является арктангенсом y -составляющей, делённым на x -составляющую.

$$\theta_R = \text{atan}\left(\frac{R_y}{R_x}\right)$$

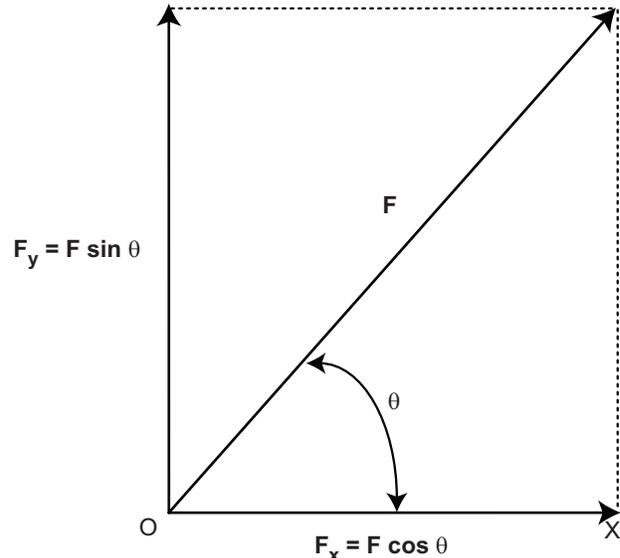


Иллюстрация 3.2: составляющие вектора

Процедура 2

Выставьте колесо «Сила» по уровню. Создайте новую силу F . Нить от диска протяните через подвижный блок, к краю нити привяжите подвес. На подвес добавьте груз.

- Рассчитайте и запишите значение силы F , созданной подвижным блоком и подвесом. Для определения угла используйте колесо «Сила».
 - Значение, $F =$ _____ Угол $\theta =$ _____
- Рассчитайте значения F_x и F_y , x - и y -составляющих новой силы F . Помните, что $F_x = F \cos \theta$, а $F_y = F \sin \theta$.
 - $F_x =$ _____ $F_y =$ _____
- Теперь отрегулируйте динамометр, подвижный блок и нить от диска колеса так, чтобы оборудование прикладывало x -составляющую F_x новой силы F . Отрегулируйте динамометр, чтобы к диску прикладывалось горизонтальное тянущее усилие F_x .
- Далее привяжите к подвесу третью нить от диска, чтобы та висела вертикально. Добавьте к подвесу груз, чтобы к диску прикладывалось вертикальное тянущее усилие F_y .

Вопросы

1. Где находится диск колеса «Сила» при установленном равновесии? В центре?
2. Почему да или почему нет?

Дополнительно

1. Как правило, лучше всего определять компоненты вектора вдоль перпендикулярных осей (согласно описанию выше). Если позволяет время, настройте оборудование так, чтобы попытаться определить составляющие вектора вдоль не перпендикулярных осей. Для перенаправления компонентов сил в не перпендикулярные направления используйте подвижный блок.
2. На иллюстрации показана классическая комбинация векторов. Чтобы диск находился в состоянии равновесия, x -составляющие силы F_1 и F_2 должны иметь одинаковые значения и разные направления, а y -составляющие F_1 и F_2 должны при сложении быть равны значению F_3 – вертикальной силы. Отрегулируйте оборудование так, чтобы пружинные весы прикладывали силу F_1 . После того, как система достигнет равновесия, определите x - и y -составляющие векторов и сравните их.
3. Чтобы создать такую же схему векторов, как на иллюстрации, измените углы F_1 и F_2 , чтобы векторы были ближе к оси «X». Рассчитайте x -составляющие, обратите внимание на изменения. Что происходит с x -составляющими по мере приближения двух сил к параллели? Сила какой величины понадобилась бы, если бы F_1 и F_2 были горизонтальными?

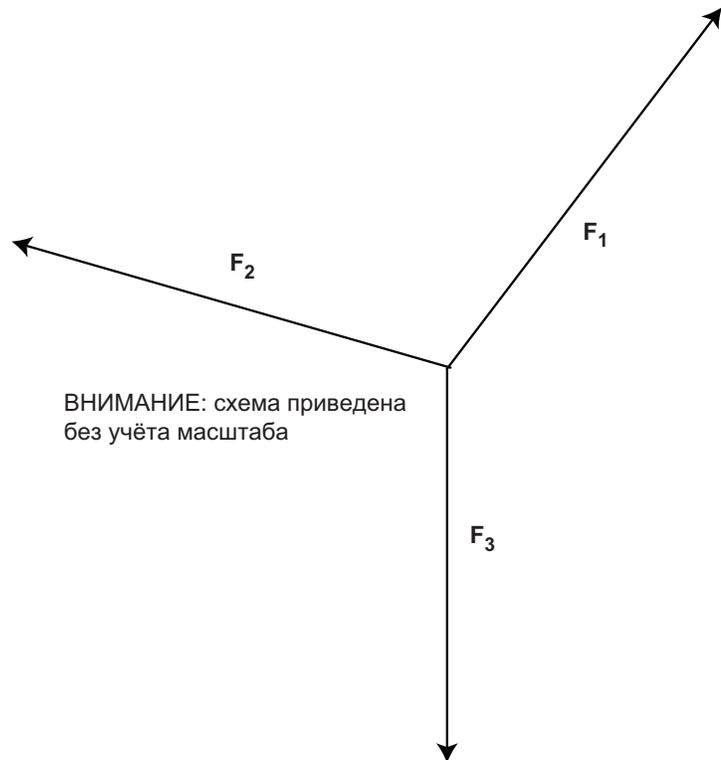


Иллюстрация 3.3: удлинение векторов

Эксперимент 4: Крутящий момент – параллельные силы

Необходимое оборудование

Доска
Набор грузов и подвесов

Балансир и угломеры
Нить

Теоретическая часть

В Эксперименте 2 вы определяли результирующие и уравнивающие силы, направленные к одной точке. В реальных условиях такие силы встречаются нечасто. Силы гораздо чаще действуют на несколько точек тела. Например, на иллюстрации представлены две тяговые силы, которые действуют на разные точки. Можно задать два следующих вопроса:

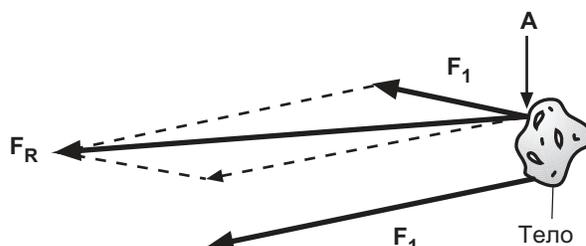


Иллюстрация 4.1: силы, не направленные к одной точке

1. В каком направлении происходит ускорение предмета?
2. Будет ли предмет вращаться?

Если бы к точке «А» были приложены две силы, то результирующей была бы та сила, вектор которой обозначен **FR**. Вектор действительно **FR** показывает направление, в котором будет ускоряться предмет (это вы изучите в последующих экспериментах). Как ответить на вопрос 2? Будет ли предмет вращаться? В рамках этого эксперимента вы начнёте изучать типы сил, которые становятся причиной вращения физических тел. Так вы познакомитесь с новым понятием – момент силы.

Подготовка оборудования

Закрепите балансир на доске ближе к центру.

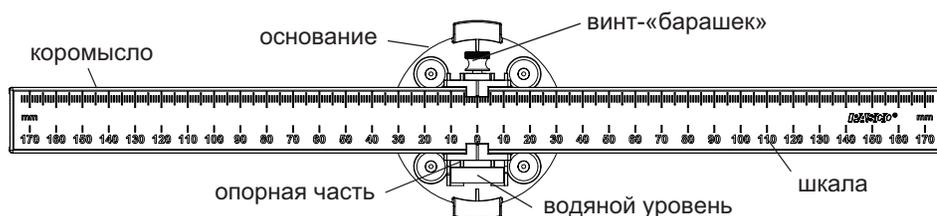


Иллюстрация 4.2: балансир

Выравнивание коромысла

Ослабьте винт-«барашек», отрегулируйте коромысло так, чтобы нулевая отметка на нём была выровнена с метками индикатора на опорной части. При выровненном коромысле пузырёк воздуха в водяном уровне будет находиться в середине между двумя линиями.

Установка угломеров

Для начала определите массу двух угломеров и запишите её значение. Для измерения массы вы можете воспользоваться пружинными весами.

- Угломер 1 = _____
- Угломер 2 = _____

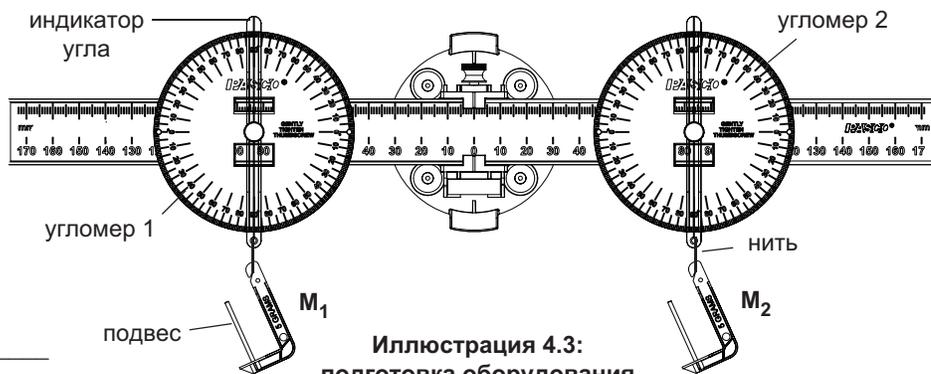


Иллюстрация 4.3: подготовка оборудования

Ослабьте винты-«барашки» на угломерах, наденьте на оба края коромысла. Привяжите подвес к нити на индикаторе угла каждого угломера.

Ход работы: равное расстояние, равная масса

Расположите один из угломеров близко к краю коромысла, затяните винт-«барашек», чтобы зафиксировать угломер. Отрегулируйте положение другого угломера, чтобы добиться идеального равновесия балансира. Далее затяните винт-«барашек».

1. Измерьте расстояния d_1 и d_2 от опорной части до центра каждого угломера.

- $d_1 =$ _____
- $d_2 =$ _____

2. На каждый подвес добавьте груз 50 г.

- Балансир ещё в равновесии?

3. На один из подвесов добавьте груз 20 г.

- Можно ли восстановить равновесие, переставляя другой угломер и подвес?

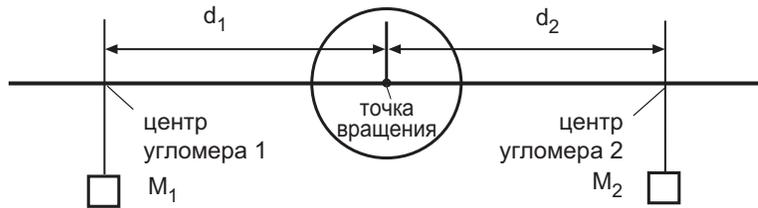


Иллюстрация 4.4: измерение крутящих моментов

Процедура: разные расстояния, разные массы

Расположите один из угломеров примерно посередине между точкой вращения и краем коромысла. Затяните винт-«барашек». На подвес M_1 добавьте груз 75 грамм.

На другой подвес (M_2) добавляйте различные грузы, двигайте его вдоль коромысла, чтобы восстановить равновесие.

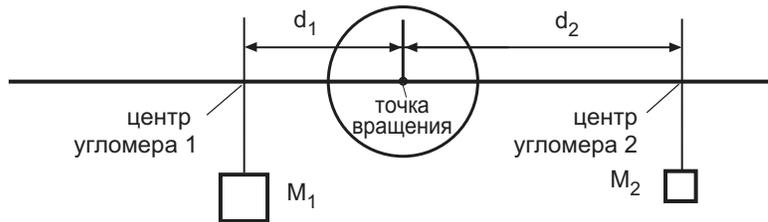


Figure 4.5: More Torques

1. В первом положении равновесия измерьте общую массу M_1 и M_2 по обе стороны оси (угломер, подвес, добавленные грузы), внесите значение массы в таблицу.
 2. Измерьте расстояния d_1 и d_2 между центрами угломеров и осью. Полученные результаты внесите в таблицу.
 3. Измерьте ещё пять разных значений M_2 , результаты также внесите в таблицу. Обязательно указывайте единицы измерения.
 4. Если позволяет время, измените M_1 и повторите процедуру.
- Напоминание: для получения точных результатов при измерении M_1 и M_2 учтите массу угломера, подвеса, добавленных грузов.

Расчёты

Рассчитайте силу гравитации ($\text{вес} = mg$), создаваемую общей массой на обоих краях коромысла для каждого сценария. Рассчитайте моменты сил τ_1 и τ_2 на обоих краях коромысла для каждого сценария. Помните о том, что крутящий момент является векторным произведением суммарной силы и плеча рычага (длины). Так как расстояние и направление силы находятся под прямым углом (перпендикулярны), крутящий момент равен $F d$, где $\mathbf{F} = m\mathbf{g}$. Запишите рассчитанные значения веса, \mathbf{F} и крутящего момента для всех положений равновесия балансира.

Таблица данных

Сценарий	Общая масса M1, кг	Вес F1 (Н)	Расстояние d1, м	Момент силы = F1d1	Общая масса M2, кг	Вес F2 (Н)	Расстояние d2, м	Момент силы = F2d2
1								
2								
3								
4								
5								
6								

Вопросы

1. На основании полученных вами результатов ответьте: каким должно быть математическое соотношение между τ_1 и τ_2 , чтобы коромысло находилось в состоянии равновесия?
2. Какой крутящий момент создаёт тяговое усилие на коромысло балансира вверх от точки вращения?

Дополнительно

Если позволяет время, установите на коромысло третий угломер и подвес (на ту сторону, где находится второй угломер).

Вопрос

Каким должно быть математическое соотношение между τ_1 , τ_2 и τ_3 , чтобы коромысло оставалось в равновесии с тремя угломерами и подвесами на нём?

Эксперимент 5А: центр масс

Необходимое оборудование

Доска
Асимметричная пластина
Набор подвесов и грузов

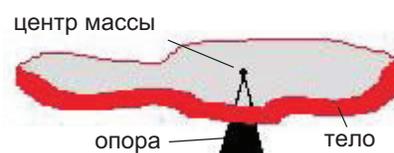
Балансир и угломер
Нить

Теоретическая часть

Притяжение является универсальной силой; все тела во вселенной притягиваются к другим телам. Поэтому, каждое тело на балансире, находящемся на опорной части, притягивается ко всем телам Земли.

К счастью, сумма всех этих отдельных гравитационных сил создаёт одну единственную результирующую силу. Она действует так, будто между центром Земли и центром балансира существует тяговое усилие. Значение этой силы такое, как будто все тела расположены в центре Земли, а все тела на балансире расположены в центре его массы.

Вращающийся после броска предмет вращается вокруг центра массы, а центр массы движется на параболической траектории. Тело, центр массы которого находится над опорой, склонен оставаться в равновесии во вращательном движении (будучи уравновешенным на опоре). В данном эксперименте ваши знания момента силы помогут вам понять, что такое центр массы тела, и определять его местонахождение.



Подготовка оборудования

Измерьте массу коромысла, запишите результат.

Далее определите массу двух угломеров, результаты запишите. Обратите внимание, что для измерений можно использовать динамометр.

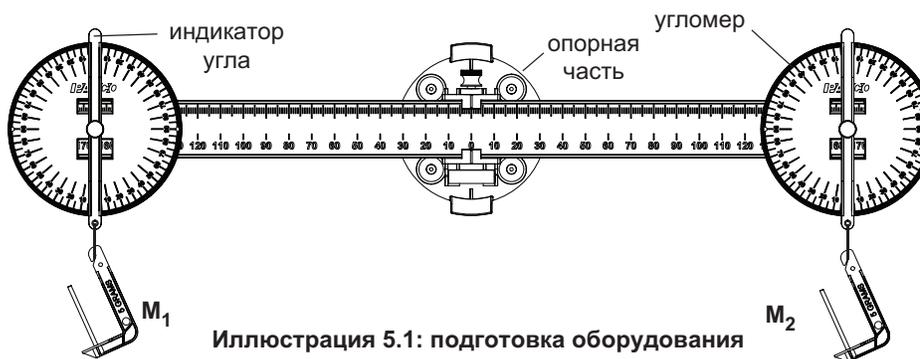


Иллюстрация 5.1: подготовка оборудования

- Коромысло = _____
- Угломер 1 = _____
- Угломер 2 = _____

Ослабьте винты-«барашки» на двух угломерах, наденьте на край коромысла, чтобы оба угломера находились на отметке 165 мм. Привяжите подвес на нить от индикатора угла каждого угломера.

Установите балансир ближе к центру доски.

Запишите общую массу коромысла + угломеров + подвесов (по 5 г каждый).

- Масса системы = _____

Выравнивание коромысла, маркировка центра массы

Ослабьте винт-«барашек», отрегулируйте коромысло так, чтобы метки индикатора на оси были выровнены с нулевой отметкой на коромысле. По мере необходимости отрегулируйте положение обоих угломеров – пузырёк воздуха водяного уровня должен находиться в середине между двумя линиями. Как только коромысло будет выровнено и примет положение равновесия, затяните винты, удерживающие коромысло и угломеры.

Отметьте карандашом точку на коромысле, которая соответствует центру массы системы. Вся масса системы (коромысло, угломеры и подвесы) действует так, будто она сконцентрирована в центре.

Если коромысло находится в состоянии равновесия, сила на точке вращения должна уравновешивать общую силу притяжения, которая действует на коромысло. В связи с тем, что коромысло не вращается, сила притяжения и та, сила, которая её уравнивает, должны быть силами, направленными к одной точке.

Эксперимент

1. Почему балансир обязательно бы вращался, если бы результирующая сила притяжения и сила, создаваемая точкой вращения, не были бы направлены к одной точке?
 - Помните о том, что на балансирах собрано множество небольших подвешенных грузов. Сила притяжения тянет каждый подвешенный груз вниз, в результате вокруг точки вращения балансира создаётся момент силы.
2. Каково соотношение между суммой моментов сил вокруг центра массы по часовой стрелке и суммой крутящих моментов вокруг центра массы против часовой стрелки? Объясните, почему.
 - К одному подвесу добавьте груз 50 г, к другому 100 г. Ослабьте винт-«барашек» на коромысле, сдвигайте его до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие. Затяните винт-«барашек».
 - Опорная часть по-прежнему удерживает коромысло, угломеры, подвесы и грузы, но уже на новой точке центра массы системы.
3. Рассчитайте три момента силы τ_1 , τ_2 и τ_3 , создаваемых силами F_1 , F_2 и F_3 , действующими вокруг новой точки вращения. Обязательно укажите направление момента силы – по часовой стрелке или против неё.

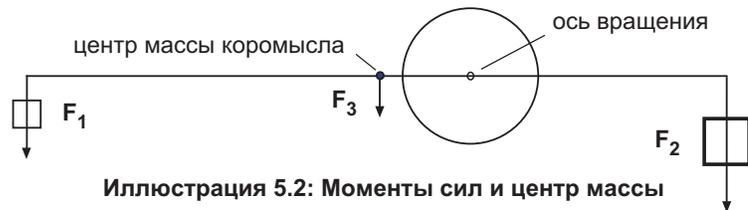


Иллюстрация 5.2: Моменты сил и центр массы

Положение	Масса, кг	Сила ($F = mg$)	Расстояние, м	Крутящий момент ($\tau = Fd$)
1	0,050			
2	0,100			
3				

4. Уравновешены ли крутящие моменты по часовой стрелке / против часовой стрелки?
 - Снимите груз 50 г с находящегося по левую руку подвеса, но сам подвес и угломер оставьте. Если убрать груз, сила F_1 перестанет действовать. Измените положение коромысла так, чтобы момент сил, создаваемый F_3 , был уравновешен с моментом сил, создаваемым силой F_2 , то есть, чтобы коромысло снова было выровнено.

- Повторно рассчитайте крутящие моменты вокруг точки вращения.

Позиция	Сила ($F = mg$)	Момент силы ($\tau = Fd$)
2		
3		

5. Моменты сил уравновешены?

Асимметричная пластина

Вместо балансира установите опору датчика силы. К стержню на опоре датчика силы подвесьте асимметричную пластину.

Так как сила стержня, действующая на пластину, является силой, уравновешивающей сумму сил притяжения, которые действуют на пластину, линия силы, создаваемой стержнем, должна проходить через центр массы этой пластины. Намотайте на стержень нить, к краю нити привяжите подвес.

Карандашом или легко стираемой ручкой нарисуйте на пластине линию прямо по нити.

Снимите нить и подвес. Подвесьте пластину за другое отверстие. Снова намотайте нить, снова подвесьте подвес за стержень. Нарисуйте новую линию по нити.

Повторите аналогичные действия с третьим отверстием. Нарисуйте третью линию.

6. Проходит ли нарисованная линия через центр массы пластины?
7. Был бы пригоден такой метод для трёхмерного предмета? Почему да или почему нет?

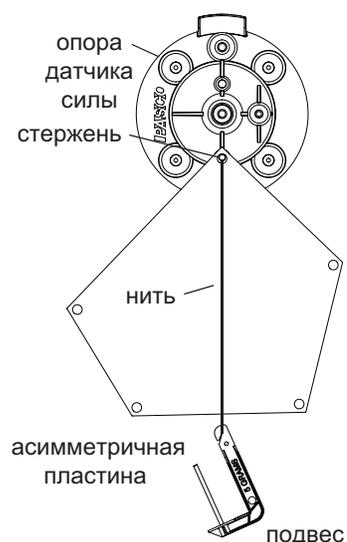


Иллюстрация 5.3:
определение центра масс

Дополнительно

Снимите со стержня нить и пластину. Попробуйте уравновесить пластину на пальце – кончик пальца должен находиться под точкой пересечения всех линий. Что происходит?

Эксперимент 5В: устойчивое равновесие тел

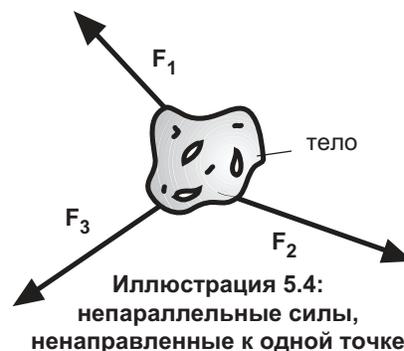
Необходимое оборудование:

Доска	Балансир и угломеры
Подвижный блок (1)	Динамометр
Набор подвесов и грузов	Нить

Теоретическая часть

Любая сила, действующая на тело, может создавать как равноускоренное прямолинейное движение (движение центра массы тела в направлении действия силы), так и вращательное движение (вокруг точки вращения).

В данной части эксперимента вы будете изучать взаимосвязь между силами и моментами сил, исследуя силы, действующие на тело, находящееся в состоянии устойчивого равновесия

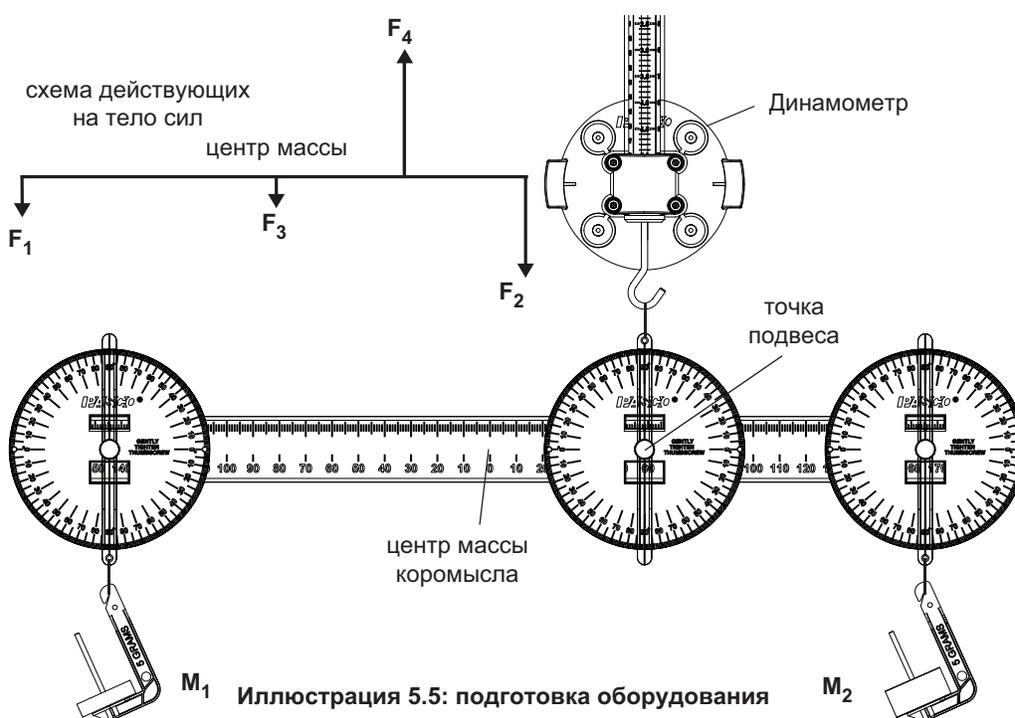


Подготовка оборудования

Определите центр массы балансира, сделайте отметку карандашом. Соберите оборудование (как показано на схеме), состоящее из пружинных весов, подвесов, трёх угломеров на балансире.

Подвесив балансир к пружинным весам, вы можете определить все силы, которые на него действуют.

Как показано на схеме, такими силами являются: F_1 , вес груза M_1 , F_2 , вес груза M_2 , F_3 , вес балансира, действующий через центр массы, F_4 , тяговое усилие, создаваемое динамометром направленное вверх.



Эксперимент

Заполните таблицу соответствующими данными: M (кг), F (Ньютон), d (расстояние в метрах от точки приложения силы до точки подвеса), τ (крутящий момент вокруг точки подвеса; Ньютон x метр). Для момента сил укажите направление: по часовой стрелке или против часовой стрелки.

Таблица с данными

Позиция	Масса (M)	Сила (F)	Расстояние (d)	Крутящий момент (τ)
1				
2				
3				
4				

Расчёты

1. Рассчитайте и запишите сумму крутящих моментов по часовой стрелке и крутящих моментов против часовой стрелки.

$$\sum \tau_{\text{по часовой стрелке}} = \underline{\hspace{2cm}} \quad \sum \tau_{\text{против часовой стрелки}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

- Крутящие моменты уравновешены?

2. Рассчитайте и запишите сумму сил, направленных вверх и вниз.

$$\sum F_{\text{вверх}} = \underline{\hspace{2cm}} \quad \sum F_{\text{вниз}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

- Уравновешены ли переносные силы?

3. Опираясь на ответы на вопросы, скажите: какие условия должны быть соблюдены, чтобы физическое тело находилось в состоянии равновесия (не испытывало ускорения)?

Изменение исходной точки

При измерении крутящих моментов сначала были измерены все расстояния от точки подвеса на балансирах. Так изучается склонность коромысла к вращению вокруг этой точки (подвеса). Вы также можете измерить крутящие моменты вокруг других точек – на коромысле или за его пределами. С помощью ранее использованных сил повторно измерьте расстояния, выполняя измерения от левого края коромысла (как показано на схеме ниже).

Пересчитайте моменты сил, чтобы определить склонность коромысла к вращению вокруг левого края.

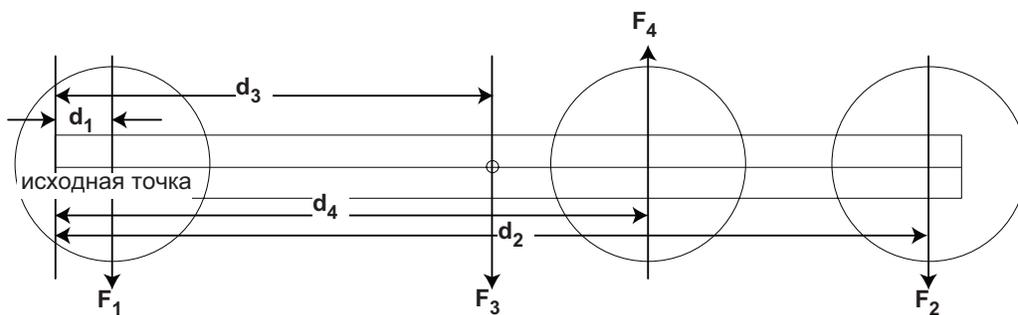


Иллюстрация 5.6: изменение исходной точки

Данные внесите во вторую таблицу.

Как и ранее, не забывайте указывать направления моментов сил (по часовой стрелке / против часовой стрелки).

Таблица с данными: изменение исходной точки

Позиция	Сила (F)	Расстояние (d)	Крутящий момент (τ)
1			
2			
3			
4			

Расчёты

1. Рассчитайте и запишите сумму моментов сил по часовой стрелке / против часовой стрелки.

$$\sum \tau_{\text{по часовой стрелке}} = \underline{\hspace{2cm}} \quad \sum \tau_{\text{против часовой стрелки}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

- Моменты сил уравновешены?

Дополнительно

С помощью подвижного блока, подвешенного груза и нити создайте дополнительную направленную вверх силу с одного края коромысла. Чтобы закрепить нить на коромысле, вам может понадобиться скотч. Отрегулируйте положения остальных грузов и пружинных весов, чтобы вернуть коромысло в положение равновесия (выровнять коромысло по горизонтали).

- Уравновешены ли силы, создающие как переносное, так и вращательное движения?
- Зарисуйте схему оборудования, приведите расчёты на отдельном листе бумаги.

Эксперимент 6: крутящий момент – не параллельные силы

Необходимое оборудование

Доска	Балансир и угломеры
Подвижный блок	Пружинные весы
Набор подвесов и грузов	Нить

Теоретическая часть

В предыдущем эксперименте вы изучали крутящие моменты, прикладываемые к балансиру. Вы обнаружили, что если крутящие моменты вокруг точки вращения уравновешены, то коромысло балансира сохраняет равновесие. В том эксперименте все силы были перпендикулярны коромыслу и параллельны относительно друг друга. Что же произойдёт, если одна или несколько сил *не* будут перпендикулярны коромыслу?

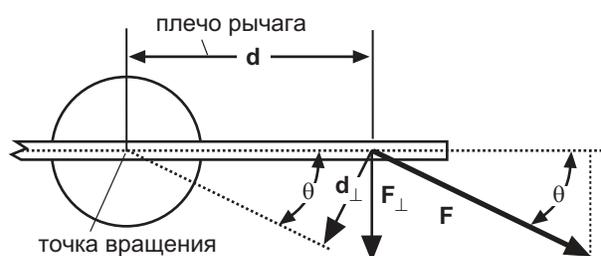


Иллюстрация 6.1: момент сил

Оказывается, формулу расчёта момента сил можно обобщить, введя на поправку на этот случай. Момент сил является векторным произведением вектора силы и плеча рычага, и в этом выражении плечом рычага является расстояние от точки вращения до точки приложения силы. Формула в сведённом виде выглядит следующим образом:

$$\tau = Fd \sin \theta$$

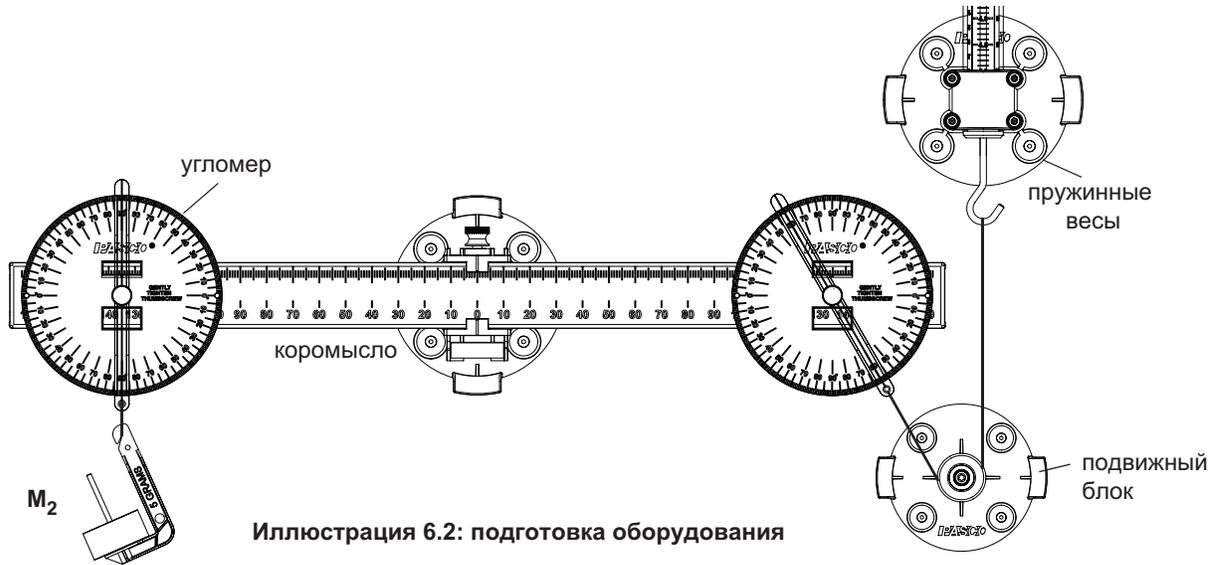
where F is the magnitude of the force vector, d is the distance from the pivot point to the point at which the force is applied (that is, the “lever arm”), and θ is the angle between the force vector, F , and the lever arm, d . Note that $F \sin \theta$ is F_{\perp} , the component of the force vector, F , that is perpendicular to the lever arm, d . Note also that $d \sin \theta$ is d_{\perp} , the component of the lever arm, d , that is perpendicular to the force vector, F . In other words, $d \sin \theta$ is the perpendicular distance, d_{\perp} , from the pivot point to the line of force.

Подготовка оборудования

Закрепите балансир в левой части доски. Отрегулируйте коромысло так, чтобы нулевая отметка на нём совпала с отметкой индикатора на оси.

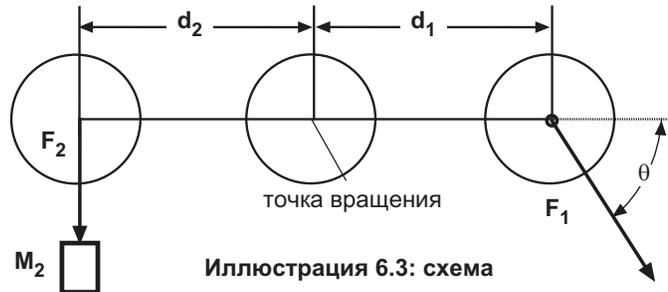
На каждый край коромысла установите угломер (например, на расстоянии 130 – 140 мм от оси). По мере необходимости отрегулируйте положения угломеров, чтобы коромысло было выровнено и находилось в состоянии равновесия.

К одному из угломеров подвесьте груз M_2 . На доске закрепите динамометр, соедините их с угломером с помощью нити и подвижного блока, как показано на схеме.



Процедура

1. Измерьте d_1 и d_2 . Запишите полученные значения.
2. Запишите значение общей массы M_2 , значение силы F_2 (вес подвешенного груза). С помощью полученных значений рассчитайте крутящий момент τ_2 , создаваемый силой F_2 . Обязательно указывайте единицы измерения для каждой величины.



- Двигая подвижный блок, вы можете отрегулировать угол силы F_1 . Обратите внимание: когда вы двигаете подвижный блок, вам нужно двигать и динамометр, чтобы нить между весами и подвижным блоком висела точно вертикально.
3. Настройте все значения угла F_1 , которые приведены в таблице ниже. При любом угле сдвигайте пружинные весы к подвижному блоку или от него (по мере необходимости), добиваясь, чтобы значение F_1 было достаточным для равновесия коромысла. Показания силы, считываемые с пружинных весов, фиксируйте в Ньютонах.

Угол	F_1 (Н)	$\tau_1 = F_1 d_1 \sin \theta$	$(\tau_1 - \tau_2) \div (\tau_1 + \tau_2) / 2$
30°			
40°			
50°			
60°			
70°			
80°			

4. Произведите расчёты и определите момент сил, τ_1 , создаваемый пружинными весами. Определите разницу между τ_1 и τ_2 в процентах. Разница рассчитывается по формуле: разница между значениями моментов сил, делённая на среднее значение моментов сил.
- Для обеспечения достоверности математического определения момента сил значения τ_1 и τ_2 следует определять по одной и той же формуле.
5. Используйте обобщённую формулу крутящего момента ($\tau = Fd \sin \theta$) для расчётов τ_2 в Шаге 2. Подсказка: чему равен угол между силой F_2 и плечом рычага d_2 ? Влияет ли на результат рассчитанное по обобщённой формуле значение?

Анализ непараллельных сил

Представьте себе две непараллельные силы, действующие на тело на разных расстояниях от точки вращения. На иллюстрации представлена схема расчёта момента сил, создаваемого двумя непараллельными силами. Сила F_1 создаёт момент τ_1 вокруг точки «O», значение которого равно $F_1 d_1 \sin \theta_1$. Сила F_2 создаёт крутящий момент τ_2 вокруг точки «O», значение которого равно $F_2 d_2 \sin \theta_2$. Однако просто сложить эти два момента сил, чтобы определить суммарный момент сил, было бы заблуждением. Причина в том, что τ_1 и τ_2 создают вращение вокруг точки «O» в разных направлениях. Складываем более двух крутящих моментов, сложите значения тех, которые создают вращение по часовой стрелке. Далее сложите значения всех крутящих моментов, которые создают вращение против часовой стрелки. Чтобы система находилась в равновесии, сумма моментов сил, которые создают вращение по часовой стрелке, должна равняться сумме моментов сил, которые создают вращение против часовой стрелки. Помните, что перпендикулярное расстояние d_{\perp} от точки вращения до силы равно произведению $d \sin \theta$, и что угол измеряется между плечом рычага d и линией направления действия силы.

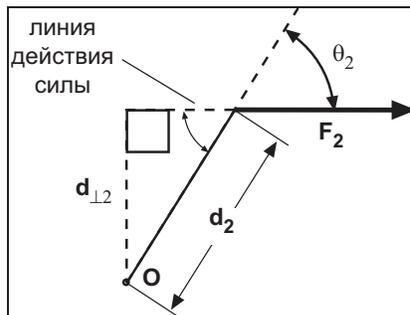
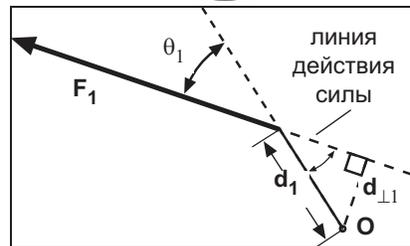
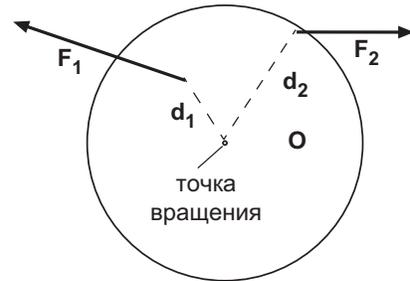


Иллюстрация 6.4: не параллельные силы

Колесо «Момент силы»

С помощью колеса «Крутящий момент» можно легко создать равновесие среди нескольких непараллельных сил. На иллюстрации 6.5 представлена сила F , которая прикладывается под углом 10° к линии от центра колеса к точке приложения силы. Крутящий момент можно рассчитать по формуле $\tau = Fd \sin \theta$. На иллюстрации видно, что $d \sin \theta$ является перпендикулярным расстоянием d_{\perp} от центра колеса «Момент силы» до линии действия силы при достаточной протяжённости этой линии.

Представьте колесо «Крутящий момент» с двумя непараллельными силами. Угол между силой F_1 и плечом рычага d_1 равен θ . Перпендикулярное расстояние $d_{\perp 1}$ от точки вращения «O» до линии действия силы равно $d_1 \sin \theta$. Поэтому момент силы τ_1 , создаваемый F_1 , равен произведению F_1 на $d_{\perp 1}$.

Радиусная шкала на ярлыке колеса позволяет измерять перпендикулярное расстояние от точки вращения до линии действия силы. Шаг увеличения радиуса концентрических окружностей составляет 2 мм. Каждый рычаг индикатора крутящего момента выполнен прозрачным, и его центральная линия соответствует линии действия силы.

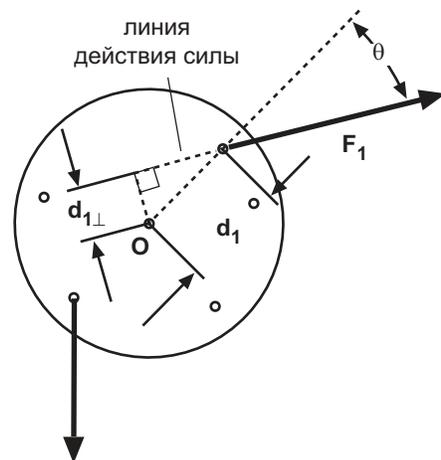


Иллюстрация 6.5: применение колеса «Момент силы»

Сборка колеса «Крутящий момент»

Снимите с доски балансир и закрепите на ней колесо «Момент сил», как показано на иллюстрации. Чтобы приложить к колесу три крутящих момента, используйте подвижные блоки, нити, подвешиваемые грузы.

По радиусной шкале на ярлыке колеса можно измерять перпендикулярное расстояние от каждой линии действия силы до точки вращения. Значения расстояний внесите в таблицу. Рассчитайте и зафиксируйте значения сил. Рассчитайте и зафиксируйте значения сил для каждой силы по формуле $\tau = F d_{\perp}$. Обязательно указывайте направление момента сил (по часовой стрелке / против часовой стрелки).

Из суммы моментов сил против часовой стрелки вычтите сумму моментов сил по часовой стрелке – так вы получите значение суммарного крутящего момента.

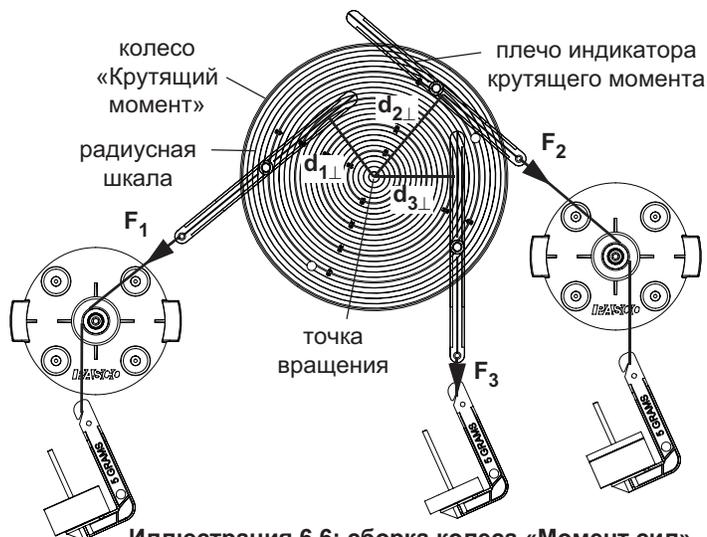


Иллюстрация 6.6: сборка колеса «Момент сил»

Таблица данных

	Сила, F (Ньютон)	Перпендикулярное расстояние, d_{\perp} (м)	Крутящий момент, $\tau = F d_{\perp}$ (Ньютон · метр)
1			
2			
3			

Суммарный крутящий момент = _____

Вопрос

В пределах ошибки эксперимента суммарный крутящий момент равен нулю, если колесо «Крутящий момент» находится в состоянии равновесия.

Дополнительно

Проведите повторные эксперименты с другими силами и углами.

Эксперимент 7: наклонная плоскость

Необходимое оборудование

Доска	Наклонная плоскость и тележка
Подвижный блок (2)	Пружинные весы
Набор грузов и подвесов	Нить

Вводная часть

Предположим, что вам необходимо спроектировать пандус и предусмотреть трос, который будет удерживать на ней тяжёлый предмет. Если угол наклона известен, какую силу должен создавать трос, чтобы удерживать этот предмет? Какую силу должна выдерживать при этом пандус?

Задачу можно решить, разрабатывая и испытывая пандус и тросы. Другой способ – испытывать модели в масштабе. Но существует и альтернативное решение – использовать знания сил и векторов для решения поставленной задачи математическим способом. Рассмотрим схему: вес находящегося на наклонной плоскости предмета F можно разложить на две составляющие. Первая составляющая перпендикулярна плоскости - F_{\perp} , другая параллельна плоскости (F_{\parallel}). Угол θ является углом наклона плоскости. В рамках данного эксперимента вам предстоит сравнить данные, полученные математическими расчётами, с результатами, измеренными на модели в масштабе.

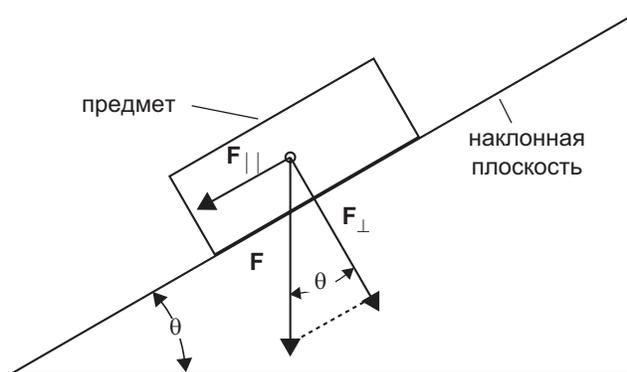


Иллюстрация 7.1: наклонная плоскость

Эксперимент

1. Положите на тележку груз 100 г. Измерьте и запишите общую массу тележки. Рассчитайте и запишите вес тележки с грузом.
 - Общая масса тележки = _____ Вес тележки = _____
2. Закрепите наклонную плоскость на доске. Начните с угла 15° . Поставьте тележку на наклонную плоскость, удерживайте её на рампе с помощью нити (нить протяните от тележки до пружинных весов через подвижный блок)

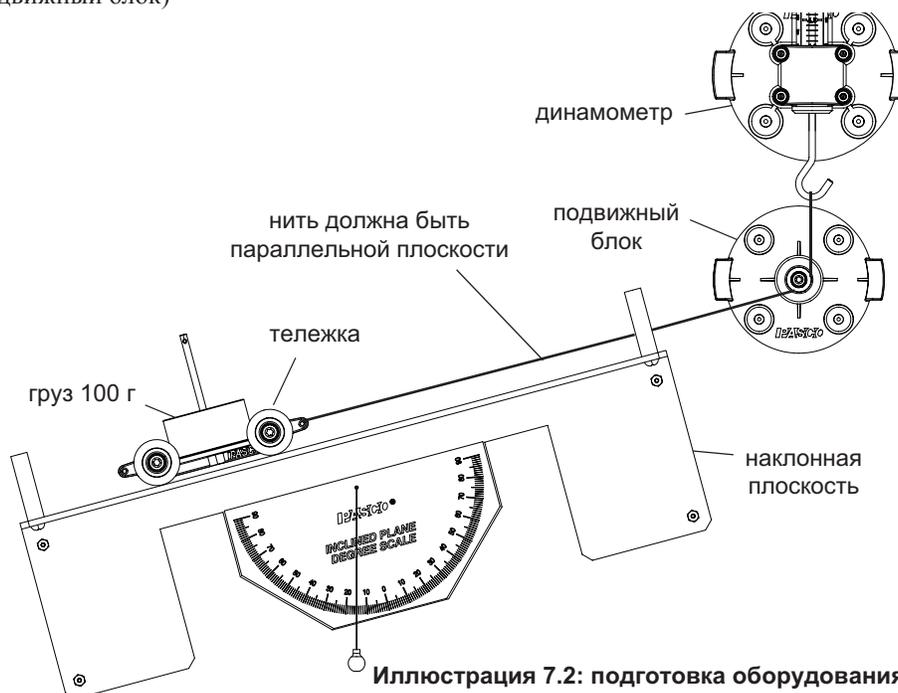


Иллюстрация 7.2: подготовка оборудования

Сила, создаваемая пружинными весами, $F_{\text{II измеренная}}$ равна составляющей силы притяжения, параллельной наклонной плоскости (F_{II}). Рассчитанная составляющая силы, параллельной наклонной плоскости, $F_{\text{II рассчитанная}}$, равна $F \sin \theta$, где θ - это угол наклона плоскости.

- По очереди выставьте все углы наклона плоскости из таблицы ниже. Для получения точных результатов отрегулируйте подвижный блок и пружинные весы так, чтобы нить оставалась параллельной наклонной плоскости. Для каждого угла запишите значение $F_{\text{II измеренная}}$ (значение силы, которая параллельна наклонной плоскости).
- Для каждого угла рассчитайте значение силы параллельной плоскости – $F_{\text{II рассчитанная}}$. Используйте формулу $F \sin \theta$. Полученные значения запишите.
- Рассчитайте разницу (в %) между измеренными и рассчитанными значениями силы, параллельной наклонной плоскости.

Угол	$F_{\text{II измеренная}}$	$F_{\text{II рассчитанная}}$	Разница, %
15°			
30°			
45°			
60°			
75°			

**разницей (в %) является абсолютное значение разности измеренной и рассчитанной величин, делённое на их среднее значение, умноженное на 100%*

$$(\text{измеренное} - \text{рассчитанное}) / (\text{измеренное} + \text{рассчитанное}) / 2 \times 100\%$$

Вопрос

Насколько сопоставимы значение силы, рассчитанное по векторной модели, со значением силы, которое вы измерили?

Перпендикулярная сила

Сила, создаваемая наклонной плоскостью как реакция на вес тележки на ней, называется силой нормальной реакции опоры. В векторной модели составляющая силы, перпендикулярной плоскости, F_{\perp} , равна $F \cos \theta$. Перпендикулярная сила равна силе тележки на наклонной плоскости, перпендикулярной этой плоскости.

Чтобы измерить силу тележки на наклонной плоскости, установите угол 15°. Динамометр замените подвесом, соединённым с тележкой нитью, пропущенной через подвижный блок. К подвесу добавляйте грузы, пока тележка и подвес не будут находиться в равновесии. Другими словами, пока сила, создаваемая натяжением нити, не будет равна составляющей веса тележки, параллельной плоскости.

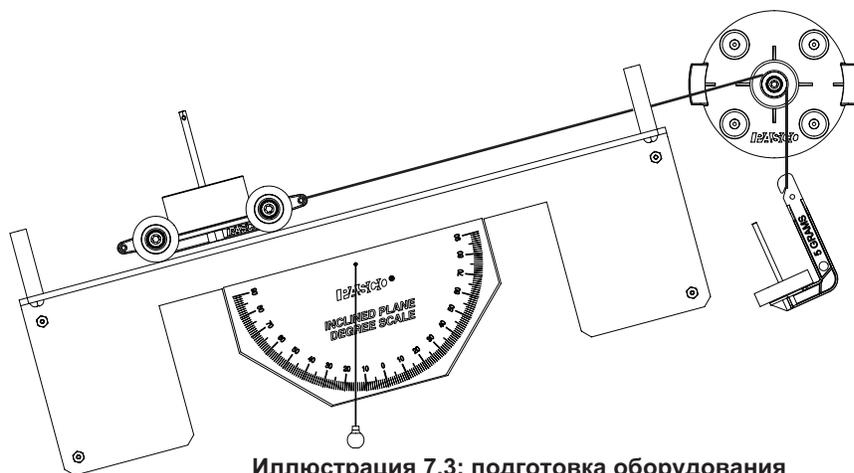


Иллюстрация 7.3: подготовка оборудования для создания силы реакции опоры

Запишите общую массу подвеса, рассчитайте и запишите вес.

- Общая масса подвеса = _____ Вес подвеса = _____
- Насколько сопоставим вес подвеса со значением $F_{\perp \text{ рассчитанная}}$ составляющей веса тележки, параллельной плоскости? Значение при угле 15° найдите в таблице.

На доске закрепите второй подвижный блок, над ним установите пружинные весы. Привяжите нить к отверстию в верхней части стержня тележки. Выставьте подвижный блок так, чтобы нить от стержня шла по его оси (и, таким образом, была перпендикулярна плоскости). Пружинные весы выставьте так, чтобы нить от подвижного блока до весов проходила по вертикали.

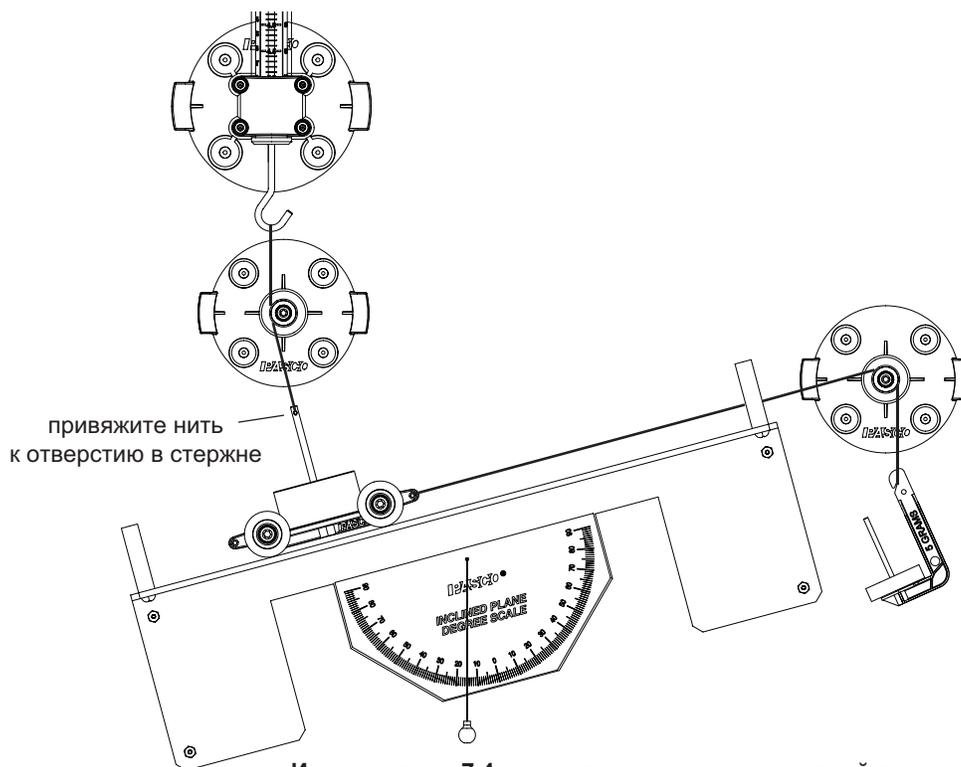


Иллюстрация 7.4: измерение перпендикулярной силы

Динамометр тяните вверх до тех пор, пока тележка не начнёт чуть-чуть приподниматься с плоскости. Показания динамометра запишите как перпендикулярную силу F_{\perp} .

$F_{\perp \text{ измеренная}} = \underline{\hspace{2cm}}$

Рассчитайте значение силы реакции опоры по векторной модели, $F_{\perp \text{ рассчитанная}} = F \cos \theta$. Полученное значение запишите.

$F_{\perp \text{ рассчитанная}} = \underline{\hspace{2cm}}$

Вопрос

Насколько сопоставимы измеренное и рассчитанное значения?

Эксперимент 8: трение скольжения

Необходимое оборудование

Доска	Наклонная плоскость и брусок для изучения трения
Подвижный блок	Пружинные весы
Набор подвесов и грузов	Нить

Теоретическая часть

Трение – это сила, возникающая между двумя телами, сила, направленная против движения тела движению. Сила трения покоя (или трением прилипания) называется трение между телами, которые относительно друг друга не двигаются. Трение покоя предотвращает, например, соскальзывание тела с наклонной плоскости. Если суммарная внешняя сила, которая действует на тело, выше силы трения покоя, то тело начнёт смещаться. Трение скольжения (или кинетическое трение) возникает, когда тела двигаются относительно друг друга. В большинстве случаев статическое трение между телами выше трения скольжения. После начала смещения, если смещение тела является постоянным, внешняя сила равна силе трения скольжения.

Объяснение такого явления как трение основано на предположении, что поверхности на атомном уровне близки друг к другу на небольшой части общей площади. Поверхности, которые на атомном уровне близки друг к другу, создают (также действующие друг на друга) силы торможения. Эта площадь контакта пропорциональна силе нормальной реакции опоры, и поэтому сила трения пропорциональна силе реакции опоры. То есть: $f \propto F_N$, где f – это сила трения, а F_N – перпендикулярная сила. Отношение силы трения и силы нормальной реакции опоры называется коэффициентом трения (μ). Сила трения равна $f = \mu F_N$. Коэффициент трения не имеет единицы измерения, его значение варьируется от 0 до 1, зависит от качества обработки поверхности «поверхность – поверхность» и определяется опытным путём.

Предметом исследования в рамках данного эксперимента будет влияние силы реакции опоры, материалов контактирующих тел и площади контакта на трение скольжения.

Процедура

С помощью динамометра измерьте вес блока для изучения трения. Полученное значение запишите.

- Вес динамометра, $W =$ _____

1. Закрепите на доске наклонную плоскость и выровняйте её с помощью отвеса. На наклонную плоскость положите динамометр. Соедините его нитью с подвесом (нить пропустите через подвижный блок).
2. Отрегулируйте подвижный блок так, чтобы нить была параллельна наклонной плоскости.

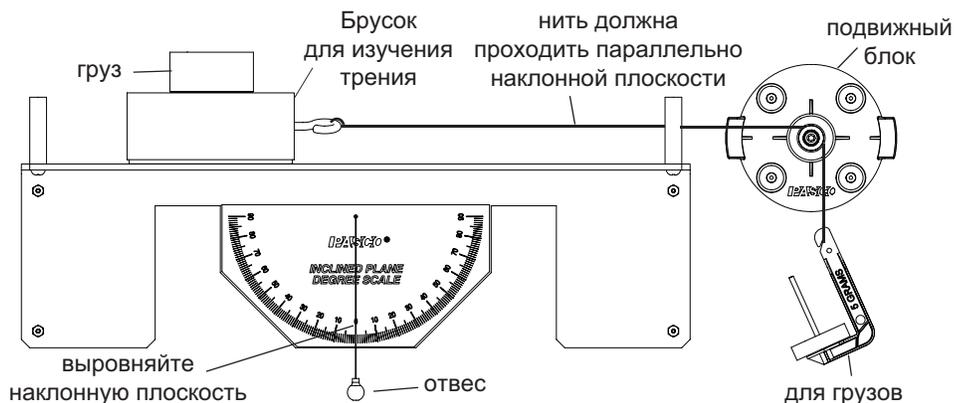


Иллюстрация 8.1: подготовка оборудования

3. Добавляйте к подвесу грузы (или снимайте их с него), чтобы добиться движения бруска для изучения трения с медленной, но постоянной скоростью после лёгкого толчка.

- Если брусок для изучения трения останавливается, это значит, что у него слишком маленькая масса. Если ускорится, то он слишком тяжёлый.
- Вес подвешенного груза, достаточный для того, чтобы тянуть блок с *постоянной скоростью*, называется f_k . Это сила трения скольжения (кинетического трения) между фрикционным блоком и наклонной плоскостью.

Переменные

Измените следующие параметры и измерьте силу трения скольжения.

- **Перпендикулярная сила:** сверху на блок положите груз, чтобы увеличить значение перпендикулярной силы между блоком и наклонной плоскостью.
- **Контактирующие материалы:** две стороны блока выполнены из неотделанной древесины. Две другие стороны покрыты войлоком. Сравните силу трения скольжения деревянной поверхности и поверхности, покрытой войлоком, при условии, что поверхности имеют одинаковую площадь.
- **Площадь контакта:** площадь верхней и нижней поверхностей больше площади боковых поверхностей. Сравните силу трения скольжения большей и меньшей площадей.

Памятки для каждого опыта:

- Тщательно подбирайте количество грузов на подвесе – вес должен быть достаточным для того, чтобы блок двигался с очень медленной и постоянной скоростью после лёгкого толчка.
- Запишите общую массу блока, M , и массу подвешенного груза, m (общая масса подвеса + масса подвешенных грузов).
- Рассчитайте и запишите значение перпендикулярной силы FN фрикционного блока на наклонной плоскости и силу трения скольжения f_k (вес подвешенного груза).
- Рассчитайте и запишите значение коэффициента трения μ , который рассчитывается по формуле $\mu = \text{сила трения скольжения} / \text{перпендикулярная сила } FN$.

Таблица с данными

Опыт	Добавленный груз (кг)	Общая масса блока, M	Сила нормальной реакции опоры, $FN = Mg$	Подвешенный груз, m	Сила трения, $f_k = mg$	Коэффициент трения, $\mu = f_k / FN$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
Опыт	Поверхность	Общая масса блока*, M	Сила нормальной реакции опоры, $FN = Mg$	Подвешенный груз, m	Сила трения, $f_k = mg$	Коэффициент трения, $\mu_k = f_k / FN$
7	Дерево, большая площадь					
8	Войлок, большая площадь					
9	Дерево, малая площадь					
10	Войлок, малая площадь					

*Для опытов с 7 по 10 общая масса блока должна быть постоянной.

Вопросы

1. Опыты 1 – 6: что происходит с трением скольжения по мере увеличения силы нормальной реакции опоры?
2. Опыты 1 – 6: что происходит с трением скольжения по мере уменьшения силы нормальной реакции опоры?
3. Насколько сопоставимы силы трения поверхностей из дерева и войлока большой площади? Насколько сопоставимы силы трения поверхностей из дерева и войлока малой площади?
4. На основании выполненных измерений ответьте: зависит ли трение скольжения, возникающее между телами, обработки контактирующих материалов?
5. Насколько сопоставимы силы трения деревянных поверхностей большой и малой площади? Насколько сопоставимы силы трения поверхностей, покрытых войлоком, большой и малой площади?
6. На основании выполненных измерений ответьте: зависит ли трение скольжения, возникающее между телами, от площади контакта?

Трение скольжения на наклонной поверхности

Если блок находится не на горизонтальной поверхности, изменится ли коэффициент трения скольжения μ_k ?

Если тело находится на наклонной плоскости под углом, одна составляющая веса тела ($F = mg$) параллельна плоскости ($F_{||}$), а другая составляющая F перпендикулярна ей (F_{\perp}). В теории перпендикулярная составляющая равна силе, перпендикулярной поверхности.

Если бы между плоскостью и телом не было трения, параллельная составляющая веса тела ускоряла бы тело вниз по плоскости. Однако сила трения существует, и она противостоит параллельной составляющей силы. Другими словами, вектор силы трения направлен вверх от плоскости, в то время, как тело смещается по ней вниз.

Представьте, что на тело оказывается тянущее усилие, направленное вверх – это усилие создаётся натяжением нити, привязанной к грузу. Будет ли трение скольжения ($f_k = \mu_k F_N$) противостоять параллельной составляющей веса тела, и будет ли вектор трения скольжения иметь то же направление, что и параллельная составляющая? Обе силы будут направлены вниз, в то время, как на тело будет оказываться тянущее усилие, направленное вверх. Если на тело оказывать тянущее усилие с постоянной скоростью, то суммарная сила, действующая на тело, будет равна нулю. Будет ли натяжение нити «Т» равно сумме параллельной составляющей и трения скольжения?

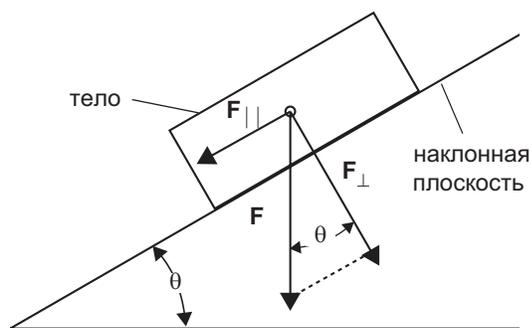


Иллюстрация 8.2: наклонная плоскость

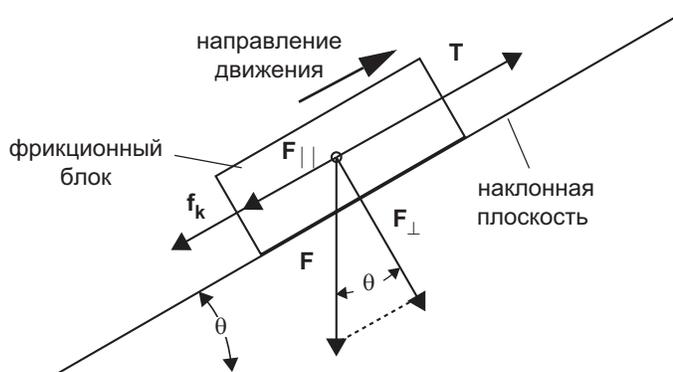


Иллюстрация 8.3: схема действующих на тело сил

Прогноз

Насколько сопоставима сумма параллельной составляющей веса блока ($F_{||}$) и трения скольжения (f_k) с весом подвешенного груза?

Процедура

1. Измерьте и запишите вес, W , бруска для изучения трения.
 - Вес, $W =$ _____
2. Закрепите наклонную плоскость на доске, выставьте угол θ , равный 15° . Соберите оборудование, включающее в себя подвижный блок, подвес, нить и брусок для изучения трения (согласно схеме). Внимание: нить должна проходить параллельно наклонной плоскости.



Иллюстрация 8.4: эксперимент с силой трения на наклонной плоскости

3. Массу грузов на подвесе подберите так, чтобы брусок для изучения трения перемещался с медленной и постоянной скоростью вверх по наклонной плоскости после лёгкого толчка.
4. Запишите общую массу подвешенного груза, m (масса подвеса + масса грузов).

Расчёты

- Помните о том, как рассчитать вес фрикционного блока: $W = F = mg$.
5. Рассчитайте и запишите параллельную составляющую, $F_{\parallel} = Mg \sin\theta$, веса блока.
 6. Рассчитайте перпендикулярную составляющую, $F_{\perp} = Mg \cos\theta$, веса блока и запишите его как значение перпендикулярной силы F_N .
 7. Рассчитайте силу трения скольжения по формуле $f_k = \mu_k F_N$, где F_N – это перпендикулярная сила, а μ_k – это коэффициент трения скольжения материала, из которого выполнена поверхность (дерево или войлок).
 8. Рассчитайте вес подвешенного груза, $F_{\text{подвешенный}} = mg$, запишите его как силу натяжения нити, T .
 9. Рассчитайте и запишите сумму параллельной составляющей веса блока, F_{\parallel} , и силы трения скольжения, f_k .

Таблица с данными

Угол θ	Масса блока, M	Масса подвешенного груза, m	Параллельная составляющая, $F_{\parallel} = Mg \sin\theta$	Перпендикулярная сила, $F_{\perp} = F_N = Mg \cos\theta$	Сила трения, $f_k = \mu_k F_N$	Сила натяжения, $T = mg$

Вопрос

Насколько сопоставимы натяжение нити и сумма параллельной составляющей веса блока и силы трения скольжения?

Статическое трение на наклонной плоскости

Представьте, что брусок для изучения трения находится на наклонной плоскости. Один край этой плоскости поднимается вверх до тех пор, пока параллельная составляющая веса блока не начинает «тянуть» его вниз. Статическое трение удерживает блок на месте до того момента, когда значение параллельной составляющей веса блока не начинает превышать значение статического трения. Перед самым началом смещения блока значение статического трения достигает своего максимума и равняется значению параллельной составляющей веса блока.

Одним из способов измерения коэффициента статического трения, μ_k , является определение максимального угла наклона плоскости до того момента, когда блок начинает смещаться вниз. Составляющая веса блока, которая параллельна плоскости, $F_{||}$, равна $Mg \sin \theta$, где M – масса блока. Перпендикулярная сила F_{\perp} – это перпендикулярная составляющая веса блока, или $F_{\perp} = Mg \cos \theta$. Сила трения покоя, f_s , является коэффициентом трения покоя, μ_s , умноженным на значение перпендикулярной силы. Поэтому, $f_s = \mu_s Mg \cos \theta$.

Когда блок находится в состоянии покоя, сила статического трения равна составляющей веса блока, которая параллельна наклону, или $Mg \sin \theta = \mu_s Mg \cos \theta$. Вычисление коэффициента статического трения μ_s осуществляется по следующей формуле:

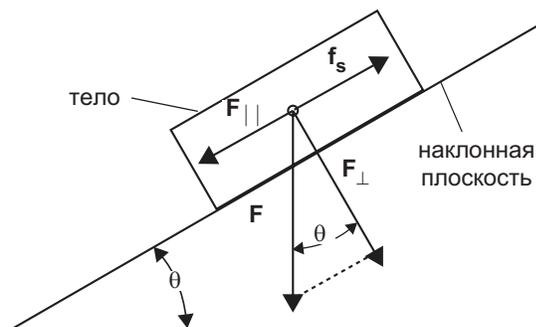


Иллюстрация 8.5: схема статического трения

Процедура

1. Закрепите наклонную плоскость на доске, угол наклона = 0. На наклонную плоскость положите фрикционный блок.
2. Осторожно поднимайте плоскость до того момента, когда блок начнёт смещаться. Зафиксируйте значение угла θ .
3. Положите блок на поверхность из другого материала и повторите эксперимент.

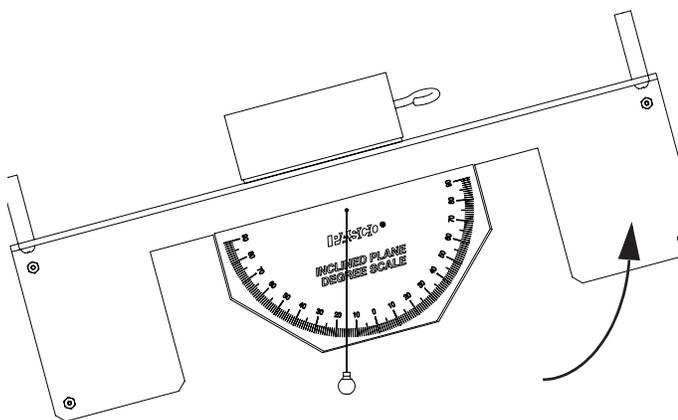


Иллюстрация 8.6: увеличение угла наклона

Таблица с данными

Материал поверхности	Угол	Коэффициент статического трения
Дерево		
Войлок		

Расчёты

- Рассчитайте коэффициент трения покоя для дерева и войлока.

Вопросы

- Насколько сопоставимы коэффициенты трения покоя войлока и дерева?

Эксперимент 9: простое гармоническое колебание – груз на пружине

Необходимое оборудование

Доска
Набор грузов и подвесов
Секундомер (артикул ME-1234)

Динамометр
Нить

Теоретическая часть

Представьте себе висящий на пружине груз. В состоянии покоя груз висит в таком положении, при котором сила пружины уравновешивает силу притяжения, которая действует на груз. Если тянущее усилие опускает груз ниже исходной точки (положения равновесия), пружина создаёт силу, которая возвращает груз в исходное положение. Если груз принимает положение выше исходной точки, то возврат в положение равновесия осуществляется за счёт действия силы притяжения. Суммарная сила, действующая на груз, является в этой связи восстанавливающей силой, так как она всегда действует для ускорения груза в положение его равновесия.

Ранее вы уже изучали Закон Гука, согласно которому сила, создаваемая пружиной, пропорциональна её растягиванию. То же самое действительно и для сжатия пружины. Данное соотношение выражается в виде $F = -kx$, где F – это сила, создаваемая пружиной, x – это расстояние от точки равновесия до края пружины, а k – это коэффициент пропорциональности, который ещё называется коэффициентом жесткости пружины.

Когда бы ни действовала на тело восстанавливающая сила, пропорциональная изменению длины относительно положения равновесия, возникает результирующее движение, именуемое «простое гармоническое колебание». Если простое гармоническое колебание груза M на пружине анализировать математически, используя Второй Закон Ньютона, то период колебания, будет равен:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{k}}$$

Период – это время совершения полного колебания (вниз – вверх – вниз). В данном эксперименте вы будете изучать уравнение периода простого гармонического колебания.

Процедура

1. Измерьте и запишите константу k – коэффициент жесткости пружины в динамометре (см. эксперимент «Закон Гука»).
 - Константа пружины, $k =$ _____ (Н/м)
2. Закрепите на доске пружинные весы так, чтобы шкала проходила строго по вертикали. Привяжите нить к подвесу, добавьте на него груз 120 г (чтобы общая подвешенная масса составляла 125 г или 0,125 кг).
 - Выполните следующие действия: потяните за подвес, опустите его на несколько сантиметров, осторожно отпустите, чтобы подвес совершал колебательные движения вверх и вниз, не смещаясь в стороны.

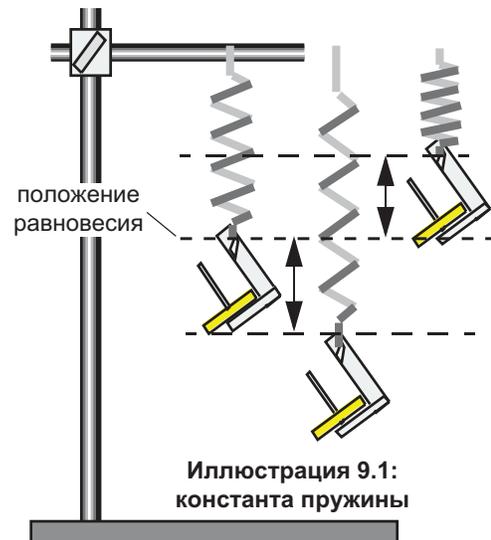


Иллюстрация 9.1:
константа пружины

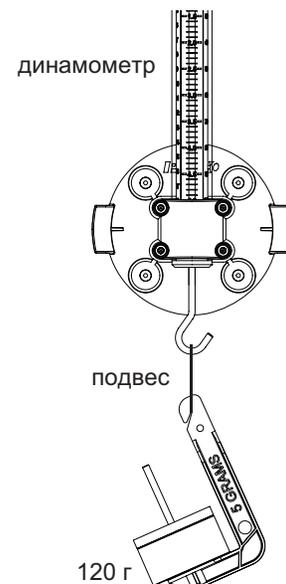


Иллюстрация 9.2:
подготовка оборудования

3. Потяните подвес вниз, осторожно отпустите. Перед тем, как приступить к измерениям, дайте ему совершить несколько колебательных движений вверх-вниз. При плавных колебаниях измерьте время как минимум десяти полных колебаний (вниз – вверх – вниз). Если есть возможность, измерьте период максимального числа колебаний до того момента, когда амплитуда колебаний станет слишком малой.
4. Рассчитайте и запишите измеренный период времени, $T_{\text{измеренный}}$, разделив общее время на число полных колебаний.
5. Повторите измерения с грузом 125 г пять раз. Рассчитайте и запишите среднее измеренное время.
6. Используя значения M и k , рассчитайте теоретический период времени, $T_{\text{теоретический}}$. Результат зафиксируйте.
7. Повторите процедуру с массами 175 и 225 г (общая масса, включая массу подвеса).

Масса, кг	Колебания	Общее время, с	Измеренный период, с	Теоретический период, с
0,125 кг				
Средний измеренный период, с				
0,175 кг				
Средний измеренный период, с				
0,225 кг				
Средний измеренный период, с				

Вопросы

1. Насколько сопоставимы теоретическое и измеренное значения периода колебаний?
2. Является ли уравнение периода колебания груза на пружине приемлемой и соответствующей реалиям физики математической моделью? Почему да или почему нет?

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{k}}$$

Дополнительно

Помимо подвешенного груза существует и другая масса, которая совершает колебательные движения вверх и вниз. При колебаниях подвешенного груза двигается и определённая часть пружины. Повлияет ли это на ваши расчёты теоретического значения $T_{измеренный}$?

Чтобы выяснить это, используйте уравнение для расчёта периода колебаний и вычислите общую массу, совершающую колебательные движения, $M_{общая}$, которая должна быть основана на константе пружины и среднем измеренном периоде, $T_{измеренный}$, для каждого груза. Используйте формулу:

$$M_{общая} = \frac{T^2 k}{4\pi^2}, \text{ где}$$

T – это средний измеренный период, а k – константа пружины.

Подвешенный груз, кг	Средний измеренный период, с	Рассчитанная общая масса, кг	Новый теоретический период, с
0,125 кг			
0,175 кг			
0,225 кг			

Рассчитав общую массу на основании значения среднего измеренного периода и константы пружины, повторно рассчитайте теоретический период на основании рассчитанной общей массы и коэффициент жесткости пружины.

$$T_{новый} = 2\pi \sqrt{\frac{M_{общая}}{k}}$$

Сравните рассчитанную общую массу $M_{общая}$ с массой подвешенного груза M . Скажите, сколько примерно дополнительной массы колеблется помимо подвешенного груза?

- $M_{дополнительная} = \underline{\hspace{2cm}}$

Вопрос

1. Насколько сопоставимы (в каждом опыте) *новое* теоретическое значение периода колебаний и среднее измеренное значение периода колебаний?
2. Является ли уравнение периода колебания груза на пружине приемлемой и соответствующей реалиям физики математической моделью? Почему да или почему нет?

Простое гармоническое колебание: балка на пружине

Представьте себе горизонтальную балку, опорой которой служат шарнир (с одного края) и вертикальная пружина (с другого края). Если край балки потянуть вниз, то пружина будет создавать возвращающую силу, $F = -kx$, необходимую для возвращения балки в исходное положение. Балка будет совершать колебательные движения вверх и вниз в течение определённого периода, $T_{балки}$. Период рассчитывается по следующей формуле:

$$T = \sqrt{\frac{M}{k}}, \text{ где}$$

M – это общая масса, совершающая колебательные движения, k – константа пружины. Каково будет значение периода колебания балки на пружине?

Балка вращается вокруг шарнира, когда колеблется её край, прикрепленный к пружине. Сила пружины, действующая на совершающий колебательные движения край балки, $F = -kx$, создаёт крутящий момент, действующий на балку. Пусть L является длиной плеча рычага балки. Момент силы, созданный пружиной от пружины будет равен $\tau = FL$. Суммарный крутящий момент создаёт угловое ускорение, α , которое прямо пропорционально крутящему моменту τ и обратно пропорционально инерции вращения I . То есть, 0.

$$\alpha = \frac{\tau}{I}$$

Или: $\tau = \alpha I$. Если преобразовать эти два уравнения, получится $FL = \alpha I$. Мы исходим из предположения, что балка выглядит как тонкий стержень, который вращается вокруг одного края. Инерция вращения тонкого стержня равна $I = 1/3 mL^2$, где m – это масса балки. В связи с тем, что сила, действующая на балку, равна $F = -kx$, уравнение $FL = \alpha I$ преобразуется в:

$$-kxL = \frac{\alpha mL^2}{3}$$

Угловое ускорение α и тангенциальное (линейное) ускорение αT совершающего колебательные движения края балки взаимосвязаны. Тангенциальное уравнение $\alpha T = ar$, где r – это радиус вращения. В данном случае радиусом вращения будет плечо рычага, то есть L . Таким образом, $\alpha T = \alpha L$, или $\alpha = \alpha T/L$. Выражение приобретает следующий вид:

$$-kxL = \frac{a_T mL^2}{3L}$$

что в упрощённом виде выглядит так:

$$-kx = \frac{a_T m}{3}$$

Тангенциальное ускорение будет рассчитываться следующим образом:

$$a_T = -\frac{3k}{m} x$$

Тангенциальное ускорение $\alpha T = -\omega^2 x$, поэтому выражение приобретает следующий вид:

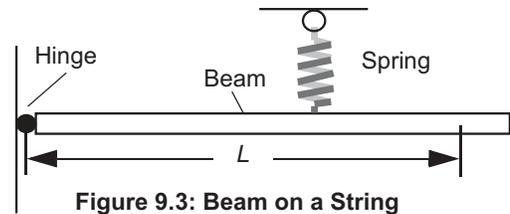
$$-\omega^2 x = -\frac{3k}{m} x$$

$$\omega^2 = \frac{3k}{m}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{3k}{m}}$$

В связи с тем, что круговая частота равна $\omega = 2\pi/T$, период $T = 2\pi/\omega$, или

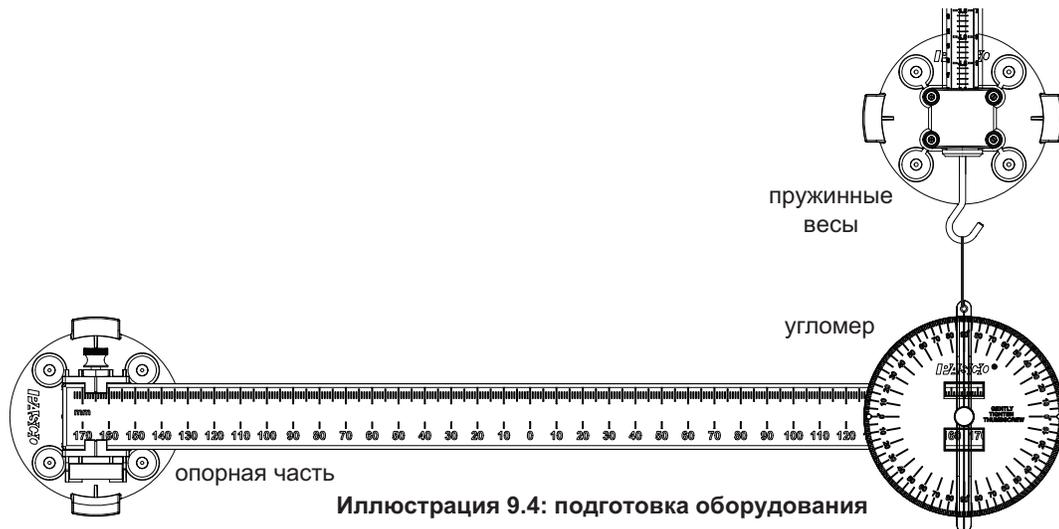
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{3k}}$$



В этой части эксперимента вам предстоит изучить уравнение простого гармонического колебания балки на пружине.

Процедура

1. На один край балансира установите угломер. Измерьте и запишите общую массу коромысла и угломера (в сумме).
 - Масса, $m =$ _____
2. С другого края балансира установите опорную часть и закрепите балансир на доске.



3. Закрепите балансир на доске, чтобы линия шкалы проходила строго по вертикали. Соедините нитью индикатор угла на угломере и нижний крюк пружинных весов.
4. Балансир и пружинные весы выставьте так, чтобы коромысло располагалось по горизонтали, а шкала – по вертикали, непосредственно над центром угломера.
5. Опустите балансир вниз, аккуратно и плавно отпустите его. Измерьте время как минимум десяти полных колебаний (вниз – вверх – вниз). Запишите количество колебаний и общее время.
6. Рассчитайте и запишите значение измеренного периода времени, $T_{\text{измеренный}}$, разделив общее время на количество колебаний.
7. Повторите измерения пять раз. Рассчитайте и запишите средний измеренный период времени.
8. С помощью m и k рассчитайте теоретический период времени, $T_{\text{теоретический}}$. Запишите результат.

Таблица с данными

Опыт	Колебания	Общее время, с	Измеренный период времени, с	Теоретический период времени, с
1				
2				
3				
4				
5				
Средний измеренный период времени, с				

Вопросы

1. Насколько близки по значениям теоретическое и среднее измеренное значение периода колебаний?
2. Является ли уравнение расчёта периода колебаний балки на пружине приемлемой математической моделью, которая соответствует реалиям физики? Почему да или почему нет?

Дополнительно

При колебаниях балки стержень и часть пружины на пружинных весах совершают колебательные движения вверх и вниз. Используя результаты из первой части эксперимента, рассчитайте общую массу, которая совершает колебательные движения: балансир + угломер + масса компонентов динамометра. Повторно рассчитайте теоретический период времени колебаний, $T_{\text{теоретический}}$.

- Насколько сопоставимы значения повторно рассчитанного теоретического и среднего измеренного периода колебаний?

Эксперимент 10: простое гармоническое колебание – обычный маятник

Необходимое оборудование

Доска

Нить

Секундомер (ME-1234)

Вспомогательный блок и зажим верёвки

Набор грузов и подвесов

Теоретическая часть

Простое гармоническое колебание не ограничено находящейся на пружине массой. На самом деле это одно из самых распространённых и важных колебаний, встречающихся в природе: от атомов до крыльев летательных аппаратов. Такое колебание играет важную роль во многих явлениях физики.

Поведение качающегося маятника, например, очень похоже на поведение груза на пружине. Если сравнивать эти явления, можно спрогнозировать период колебаний маятника.

На иллюстрации показан обычный маятник с нитью и грузом под углом θ относительно вертикали. На груз действуют две силы: сила пружины, T , и сила притяжения, $F = mg$, можно разложить на две составляющие. Первая составляющая – это радиальная сила, $F_{\text{радиальная}}$, действующая вдоль нити. Вторая составляющая, $F_{\text{тангенциальная}}$, перпендикулярна нити и соприкасается с дугой, которую описывает груз во время колебательных движений. Радиальная составляющая веса, $mg \cos \theta$, равна силе T которая действует через нить. Тангенциальная составляющая веса $mg \sin \theta$ имеет то же направление, что и движение, она ускоряет груз или замедляет его.

По конгруэнтным треугольникам на иллюстрации видно, что груз из положения равновесия смещается по линии в виде арки, примерная длина которой равна $L = \tan \theta$. Если угол θ относительно мал (менее 20°), практически верно то, что $\tan \theta = \sin \theta$. В этой связи при малых колебаниях маятника приблизительно верно то, что $F_{\text{тангенциальная}} = mg \tan \theta = mg x/L$. Так как тангенциальная составляющая силы является восстанавливающей силой, уравнение должно принять вид $F_{\text{тангенциальная}} = -mg x/L$. Если сравнить это уравнение с уравнением для восстанавливающей силы груза на пружине, $F = -kx$, можно увидеть, что количество mg/L математически выполняет ту же роль, что и коэффициент жесткости пружины. На основании данного сходства можно сказать, что период колебаний маятника можно вычислить по следующей формуле:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{mg/L}} = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}, \text{ где}$$

m – масса, g – гравитационное ускорение, L – длина маятника от точки вращения до центра массы подвешенного груза.

В данной части эксперимента вы будете изучать уравнение расчёта периода простого гармонического колебания, совершаемого маятником.

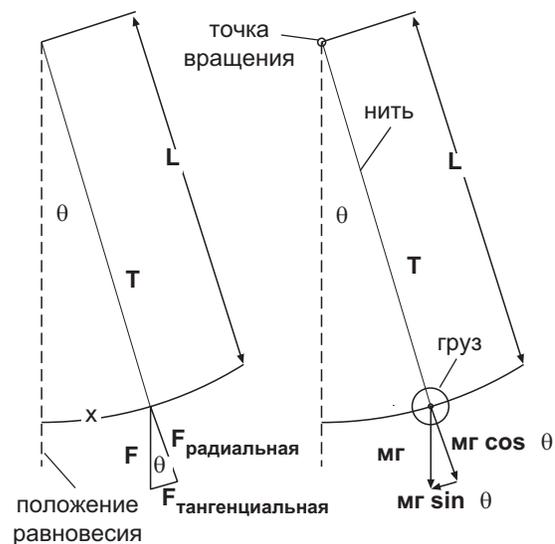


Иллюстрация 10.1: маятник

Процедура

1. Поместите вспомогательный блок ближе к верхнему краю доски. Нить длиной примерно 45 см пропустите через зажим, а зажим прикрепите к блоку.
2. Привяжите к нити груз 10 г, отрегулируйте длину нити так, чтобы маятник на доске был максимально длинным.
3. Измерьте и запишите L , длину маятника от точки вращения до центра массы подвешенного груза. Запишите m – массу подвешенного груза.
4. Создайте колебания груза, но с разумно малым углом (менее 20°). Измерьте время 30 колебаний. Запишите общее время.
5. Измерения повторите 5 раз.
6. Используйте другие грузы. Проведите измерения с грузами 20 г и 50 г.
7. Измените длину. Повторите процедуру с исходной массой и двумя другими, отличными от исходной, длинами – половиной и четвертью исходной длины.

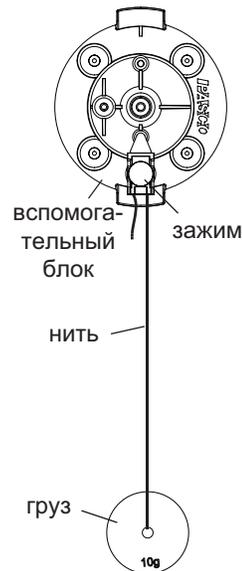


Иллюстрация 10.2: подготовка оборудования

Таблица с данными

Масса 1, кг	Длина 1, м	Колебания	Общее время, с	Измеренный период, с	Теоретический период, с
0,010					
Средний измеренный период, с					
Масса 2, кг	Длина 1, м	Колебания	Общее время, с	Измеренный период, с	Теоретический период, с
0,020					
Средний измеренный период, с					
Масса 3, кг	Длина 1, м	Колебания	Общее время, с	Измеренный период, с	Теоретический период, с
0,050					
Средний измеренный период, с					

Таблица с данными

Масса 1, кг	Длина 2, м	Колебания	Общее время, с	Измеренный период, с	Теоретический период, с
0,010					
Средний измеренный период, с					
Масса 2, кг	Длина 3, м	Колебания	Общее время, с	Измеренный период, с	Теоретический период, с
0,010					
Средний измеренный период, с					

Расчёты

1. Рассчитайте и запишите измеренный период (общее время / количество колебаний).
2. Рассчитайте и запишите средний измеренный период.
3. Рассчитайте теоретический период.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

Вопросы

1. Насколько сопоставимы теоретическое и измеренное значения периода колебаний обычного маятника?
2. Является ли уравнение для расчёта периода колебаний обычного маятника приемлемой математической моделью, соответствующей реалиям физики? Почему да или почему нет?
3. Как повышение массы обычного маятника влияет на период его колебаний?
4. Как изменение длины обычного маятника влияет на период его колебаний?

Эксперимент 11А: Простое гармоническое движение – физический маятник

Необходимое оборудование

Доска
Секундомер (ME-1234)

Балансир

Теоретическая часть

Обычный маятник представляет собой груз, подвешенный к краю «невесомой» нити определённой длины. Физический маятник – это твёрдое тело, которое поворачивается на некой точке и свободно вращается в вертикальной плоскости под действием силы притяжения. Пусть L_{cm} будет расстоянием от точки вращения до центра массы этого тела.

Крутящий момент, который вызывает вращение, создаётся составляющей силы притяжения, которая перпендикулярна линии, соединяющей точку вращения с центром массы. Эта составляющая силы равна $mg \sin \theta$. Крутящий момент является произведением длины плеча рычага, L_{cm} , и перпендикулярной силы, то есть $\tau = L_{cm} mg \sin \theta$. При малых углах $\sin \theta = \theta$, поэтому выражение для расчёта крутящего момента преобразуется в $\tau = L_{cm} mg \theta$ или $\tau = k \theta$, где $k = L_{cm} mg$.

В связи с тем, что выражение для крутящего момента соответствует выражению для возвращающей силы, $F = -kx$, которая действует на тело, совершающее простое гармоническое колебание, период колебаний физического маятника можно записать следующим образом:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{L_{cm} mg}}, \text{ где}$$

I (момент инерции) физического маятника – заменяется M ; $L_{cm} mg$ заменяется k , и уравнение расчёта периода колебаний массы на пружине приобретает следующий вид:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{k}}$$

Предположим, что коромысло балансира представляет собой прямоугольный (в сечении) стержень. Для вращающегося вокруг оси, проходящей через центр массы, стержня момент инерции составит:

$$I_{cm} = \frac{1}{12} mL^2, \text{ где}$$

m – масса, L – длина стержня.

Что произойдёт, если стержень будет вращаться вокруг одного из краёв, а не центра массы? Если стержень вращается вокруг другой оси, которая параллельна оси, проходящей через центр массы, вы можете использовать теорему Штейнера и рассчитать с её помощью момент инерции вокруг параллельной оси. Момент инерции вокруг параллельной оси, $I_{\text{параллельный}}$ является суммой моментов инерций вокруг центра массы, I_{cm} , и mL_{cm}^2 , где m – это масса стержня, а L_{cm} – это перпендикулярное расстояние от центра массы до точки вращения, или:

$$I_{\text{параллельный}} = I_{cm} + mL_{cm}^2 = \frac{1}{12} mL^2 + mL_{cm}^2$$

Формула расчёта периода колебаний приобретает следующий вид:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\frac{1}{12} mL^2 + mL_{cm}^2}{L_{cm} mg}} = 2\pi \sqrt{\frac{\frac{1}{12} L^2 + L_{cm}^2}{L_{cm} g}}$$

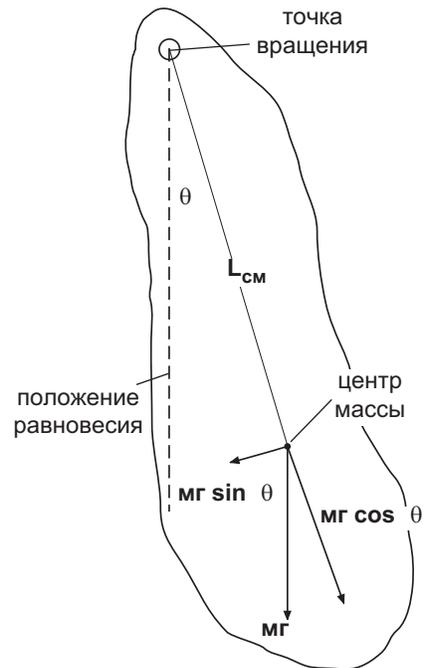


Иллюстрация 11.1: физический маятник

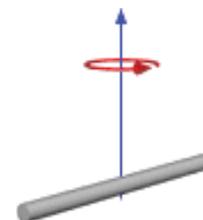


Иллюстрация 11.2: момент инерции

В данной части эксперимента вы будете изучать уравнение для расчёта периода простого гармонического колебания физического маятника с фиксированным расстоянием между точкой вращения и центром массы.

Процедура

1. Опорную часть балансира сдвиньте к отметке 170 мм с одного края коромысла и установите ближе к верху доски.
2. Измерьте и запишите общую длину, L , коромысла балансира и расстояние L_{cm} от точки вращения до центра массы (предположительно при «0»).
3. Качните коромысло так, чтоб оно начало совершать колебательные движения, однако угол колебания не должен при этом превышать 20° .
4. Измерьте и зафиксируйте общее время 10 колебаний.
5. Выполните повторные измерения ещё пять раз.

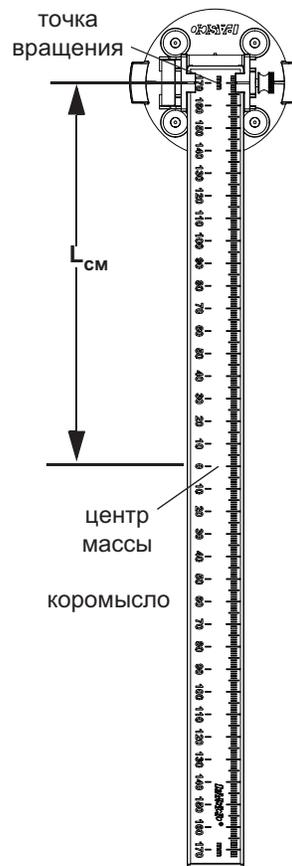


Иллюстрация 11.3: подготовка оборудования

Таблица с данными

- Длина, L (м) = _____ Расстояние, L_{cm} (м) = _____

Опыт	Колебания	Общее время, с	Измеренный период, с	Теоретический период, с
1				
2				
3				
4				
5				
Средний измеренный период, с				

Расчёты

1. В каждом опыте рассчитайте и запишите измеренный период, разделив общее время на количество колебаний. Рассчитайте средний измеренный период.
2. Рассчитайте теоретический период.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\frac{1}{12}L^2 + L_{cm}^2}{L_{cm}g}}$$

Вопросы

1. Насколько сопоставимы теоретические и измеренные значения периода колебаний?
2. Является ли уравнение для расчёта теоретического периода колебаний физического маятника приемлемой математической моделью, соответствующей реалиям физики? Почему да или почему нет?

Попробуйте это

- Если предположить, что расстояние L_{cm} от точки вращения до центра массы равно $L/2$, равно половине длины стержня, то формула для $I_{\text{параллельный}}$ упрощается:

$$I_{\text{параллельный}} = I_{cm} + mL_{cm}^2 = \frac{1}{12}mL^2 + mL_{cm}^2 = \frac{1}{12}mL^2 + m\left(\frac{L}{2}\right)^2 = \frac{1}{12}mL^2 + \frac{1}{4}mL^2 = \frac{1}{3}mL^2$$

- Если подставить это выражение в формулу для расчёта периода колебаний физического маятника, то:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_{\text{параллельный}}}{L_{cm} mg}} = 2\pi \sqrt{\frac{\frac{1}{3}mL^2}{L_{cm} mg}} = 2\pi \sqrt{\frac{\frac{1}{3}mL^2}{\frac{L}{2} mg}} = 2\pi \sqrt{\frac{2L}{3g}}$$

- С помощью данного выражения пересчитайте теоретический период колебания физического маятника, результат сопоставьте с измеренным значением.
- Какова разница между повторно и ранее рассчитанными значениями теоретического периода?

Дополнительно: период колебаний с большими углами

Движение физического маятника с малым углом колебаний называется простым гармоническим движением. Если угол увеличивается, что $\sin \theta$ перестаёт быть равным θ . Как меняется период колебаний физического маятника при увеличении угла отклонения?

Необходимое оборудование

Доска

Балансир

Карандаш или легко стираемый маркер

Колесо «Сила»

Секундомер (ME-1234)

Нить

Подготовка оборудования

1. Сдвиньте опорную часть балансира, закрепите его в левом углу доски.

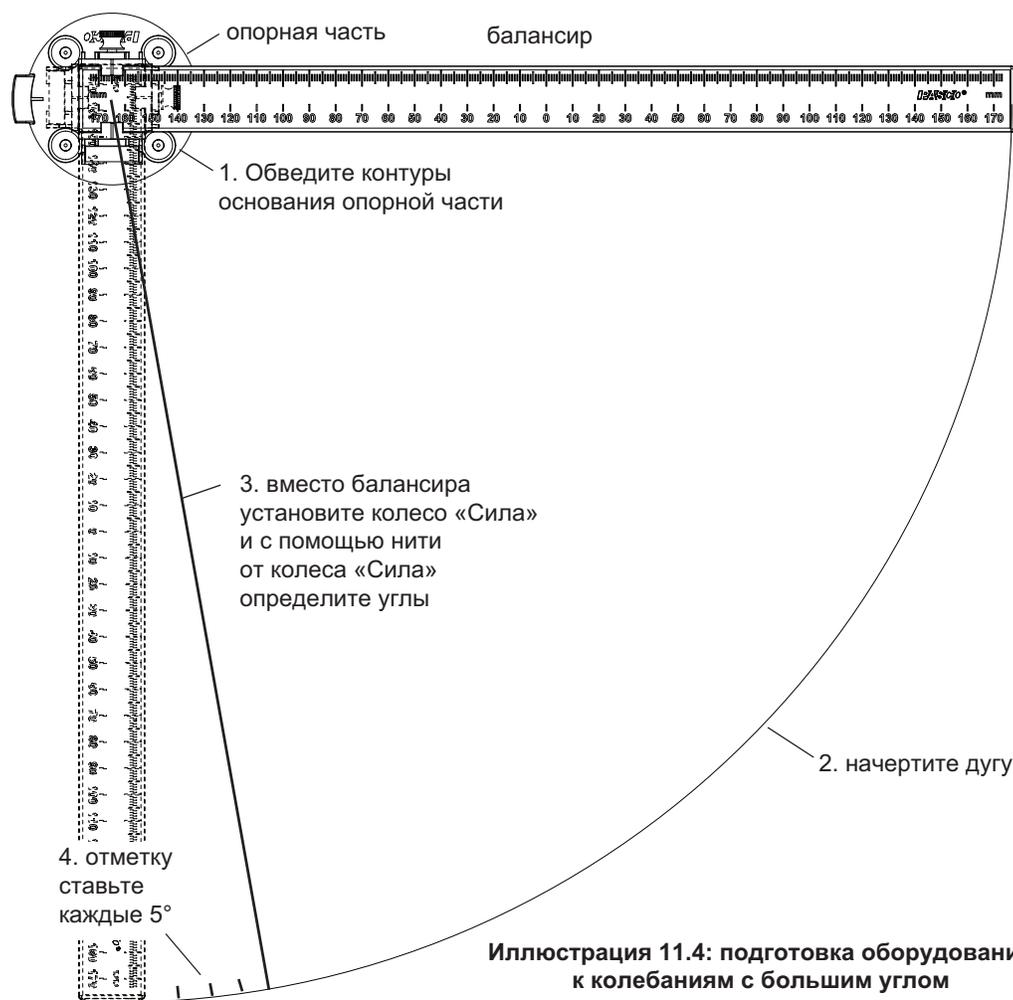


Иллюстрация 11.4: подготовка оборудования к колебаниям с большим углом

2. Карандашом или легко стираемым маркером обведите на доске контуры основания опорной части.
3. Удерживая на краю коромысла маркер или карандаш (перпендикулярно доске), двигайте коромысло и карандаш, рисуя дугу от нижнего края доски до противоположного верхнего угла.
4. После того, как вы начертите дугу, снимите балансир, поместите основание колеса «Сила» в обведённые контуры основания опорной части. Выровняйте колесо «Сила».

5. Протяните одну из нитей от диска колеса «Сила» до дуги на доске. Нить должна проходить от колеса ровно вниз. На дуге поставьте отметку, обозначьте её «0».
6. Натяните нить, сместите её, чтобы угол относительно вертикали составлял 5° . Поставьте отметку и обозначьте её.
7. Продолжайте смещать нить вдоль дуги, ставьте отметки каждые 5° . Продолжайте до тех пор, пока нить не примет горизонтальное положение.
8. Снимите колесо «Сила», замените его балансиrom в исходном положении.

Процедура

1. Удерживайте коромысло балансира так, чтобы его центральная линия указывала на отметку 5° . Отпустите коромысло, измерьте время минимум десяти колебаний. Запишите время и количество колебаний.
2. Удерживайте коромысло балансира так, чтобы его центральная линия указывала на отметку 10° . Повторите измерения.
3. Продолжайте выполнять измерения и фиксировать общее время минимум десяти колебаний при всех углах, дойдя до угла 90° .

Таблица с данными

Угол	Колебания	Общее время, с	Период, с	Угол	Колебания	Общее время, с	Период, с
5				50			
10				55			
15				60			
20				65			
25				70			
30				75			
35				80			
40				85			
45				90			

Анализ

1. Рассчитайте и запишите период колебаний для каждого угла (делите общее время на количество колебаний).
2. Постройте график зависимости периода колебаний от угла.

Вопросы

1. Под каким углом начинает меняться период колебаний физического маятника?
2. Что происходит с периодом колебаний по мере увеличения угла? Он уменьшается или увеличивается?

Эксперимент 11В: минимальный период колебаний физического маятника

Необходимое оборудование

Доска

Балансир

Секундомер (ME-1234)

Теоретическая часть

Период колебаний физического маятника можно записать в виде следующей формулы:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{L_{cm} mg}}, \text{ где}$$

I – момент инерции физического маятника

L_{cm} – кратчайшее расстояние от оси на точке вращения до параллельной оси в центре массы, см,

m – масса маятника

Момент инерции, I_{cm} , прямоугольного стержня вокруг центра его массы:

$$I_{cm} = \frac{1}{12} m(a^2 + b^2), \text{ где}$$

a – длина, b – толщина прямоугольного стержня. Однако если длина намного превышает толщину, для аппроксимации момента инерции вокруг центра массы можно использовать следующее выражение:

$$I_{cm} = \frac{1}{12} mL^2, \text{ где}$$

m – это масса, а L – это длина стержня.

Если стержень вращается вокруг другой оси, которая параллельна оси, проходящей через центр массы, вы можете использовать теорему Штейнера и рассчитать с её помощью момента инерции вокруг параллельной оси. Момент инерции вокруг параллельной оси, $I_{\text{параллельный}}$, является суммой момента инерции вокруг центра массы, I_{cm} , и mL_{cm}^2 , где m – это масса стержня, а L_{cm} – это перпендикулярное расстояние от центра массы до точки вращения, или:

$$I_{\text{параллельный}} = I_{cm} + mL_{cm}^2 = \frac{1}{12} mL^2 + mL_{cm}^2$$

Формула расчёта периода колебаний приобретает следующий вид:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\frac{1}{12}L^2 + L_{cm}^2}{L_{cm} g}}$$

При каком значении L_{cm} период колебаний T становится *минимальным*?

В данном эксперименте вы будете определять расстояние L_{cm} от точки вращения до центра массы, на основании которого будет рассчитываться минимальный период колебаний физического маятника.

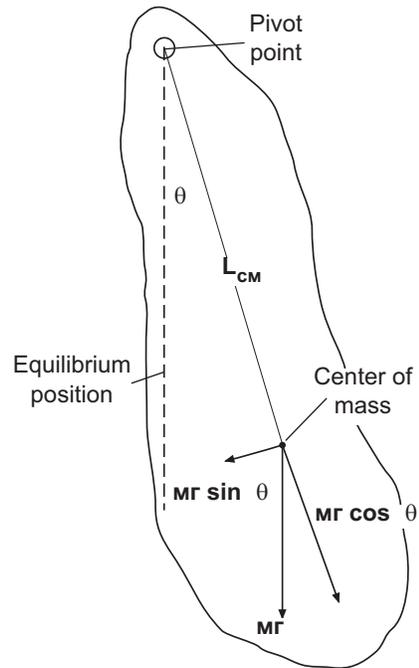


Figure 11.5: Physical Pendulum

Процедура

1. Сдвиньте опорную часть балансира в положение «1 см над срединной точкой коромысла». Это положение примерно соответствует центру массы коромысла. Опорную часть закрепите на доске.
 2. Раскачайте коромысло. При этом угол колебания не должен превышать 20°.
 3. Измерьте и запишите общее время минимум 10 колебаний.
 4. Измените положение коромысла так, чтобы точка вращения находилась на 1 см дальше от центра массы. Повторите измерения общего времени колебаний.
 5. Увеличьте расстояние $L_{см}$ на 1 см, повторите измерение.
 6. Увеличивайте расстояние $L_{см}$ на 1 см, выполняя измерения, пока не дойдёте до отметки 170 мм.
 7. Запишите общую длину коромысла L .
- Общая длина, $L =$ _____.

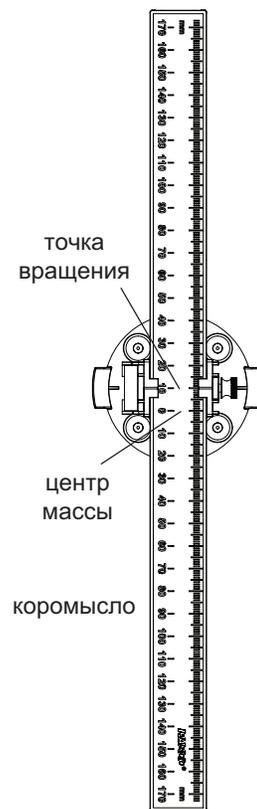


Иллюстрация 11.6:
подготовка оборудования

Таблица с данными

Номер опыта	Расстояние, $L_{см}$, м	Колебания	Общее время, с	Измеренный период, с
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				

Расчёты

1. Для каждого расстояния L_{cm} рассчитайте и запишите измеренный период – для этого разделите общее время на количество колебаний.
2. Постройте график зависимости измеренного периода от расстояния L_{cm} . Определите, при какой длине период является минимальным?
 - Минимальная длина $L_{cm} = \underline{\hspace{2cm}}$.
3. Производную периода рассчитайте по следующей формуле:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\frac{1}{12}L^2 + L_{cm}^2}{L_{cm}g}}$$

- Приведите производную к нулю, рассчитайте L_{cm} и подтвердите, что оно равно $L_{cm} = \frac{1}{\sqrt{12}}L$.
- Рассчитайте и запишите значение L_{cm} на основании общей длины L .
- Теоретическое значение $L_{cm} = \underline{\hspace{2cm}}$.

Вопросы

1. На основании построенного графика ответьте: при каком расстоянии от точки вращения до центра массы период колебаний является минимальным?
2. Насколько сопоставимы значения расстояния, при котором период колебаний является минимальным – по графику и теоретическое значение?
3. Чтобы произойдёт, если вы сместите точку вращения к центру массы коромысла, а затем отведёте коромысло в сторону на угол менее 20° ? Исходите из предположения, что опорная часть не имеет никакого трения.

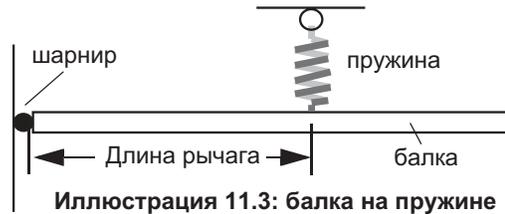
Эксперимент 11С: простое гармоническое колебание – балка на пружине

Необходимое оборудование

Доска	Динамометр
Набор грузов и подвесов	Балансир и угломер
Секундомер (ME-1234)	Нить

Теоретическая часть

Представьте себе горизонтальную балку, опорой которой с одного края служит шарнир, а с другого – вертикальная пружина. При смещении балки пружина создаёт возвращающую силу, $F = -kx$, которая возвращает балку в положение равновесия. Балка будет совершать колебательные движения вверх и вниз в течение периода времени $T_{\text{балки}}$.



Для массы на пружине T будет рассчитываться по следующей формуле:

$$T = \sqrt{\frac{M}{k}}, \text{ где}$$

M – это совершающий колебательные движения груз (масса), а k – константа пружины. Каким же будет период колебаний балки на пружине?

Балка смещается относительно шарнира по мере того, как пружина совершает колебательные движения вверх или вниз. Сила пружины, которая действует на балку, $F = -kx$, создаёт момент силы. Пусть $L_{\text{рычаг}}$ будет длиной плеча рычага балки. Момент силы, создаваемый пружиной равен $\tau = FL_{\text{рычаг}}$. Суммарный крутящий момент вызывает угловое ускорение, α прямо пропорциональное моменту силы, τ и обратно пропорциональное моменту инерции, I . То есть:

$$\alpha = \frac{\tau}{I} \text{ или } \tau = \alpha I$$

Если подставить друг к другу выражения для расчёта момента силы, получаются формулы $FL_{\text{рычаг}} = \alpha I$ или $-kxL_{\text{рычаг}} = \alpha I$, где x – это смещение пружины во время колебательных движений вверх / вниз.

Угловое ускорение, α , и тангенциальное (линейное) ускорение, a_T , балки взаимосвязаны. Тангенциальное ускорение, $a_T = \alpha r$, где r является радиусом вращения. В данном случае радиусом вращения является плечо рычага, $L_{\text{рычаг}}$, поэтому $a_T = \alpha L_{\text{рычаг}}$ или $\alpha = a_T / L_{\text{рычаг}}$. Выражение приобретает следующий вид:

$$-kxL_{\text{рычаг}} = \frac{a_T}{L_{\text{рычаг}}} I$$

a_T вычисляется по следующей формуле:

$$a_T = \frac{kL_{\text{рычаг}}^2}{I} x$$

Данное выражение имеет форму $a_T = \omega^2 x$, где ω является угловой частотой, то есть:

$$\omega = \sqrt{\frac{kL_{\text{рычаг}}^2}{I}} = L_{\text{рычаг}} \sqrt{\frac{k}{I}}$$

Так как угловая частота $\omega = 2\pi/T$, период $T = 2\pi/\omega$, или:

$$T = \frac{2\pi}{L_{\text{рычаг}} \sqrt{\frac{k}{I}}}$$

I является моментом инерции, а κ – коэффициентом жесткости пружины. Если исходить из предположения, что балка имеет форму прямоугольного стержня, то момент инерции вокруг центра массы стержня будет рассчитываться по следующей формуле:

$$I_{cm} = \frac{1}{12} ML^2, \text{ где}$$

M – масса, L – длина стержня. Согласно теореме Штейнера момент инерции вокруг оси на краю стержня рассчитывается следующим образом:

$$I_{\text{параллельный}} = I_{cm} + ML_{cm}^2 = \frac{1}{12} ML^2 + ML_{cm}^2, \text{ где}$$

L_{cm} – это расстояние от центра массы стержня до параллельной оси (точки вращения).

Разумеется, при добавлении массы на балку, момент инерции будет меняться. Например, если точечная масса, m , находится на расстоянии, r , от точки вращения, то момент инерции составит $I = mr^2$.

Процедура

1. Измерьте и запишите массу коромысла балансира. Измерьте и запишите массу угломера.
2. Опорную часть разместите на отметке 170 мм. Закрепите угломер на коромысле на отметке 110 мм. Балансир закрепите на доске.

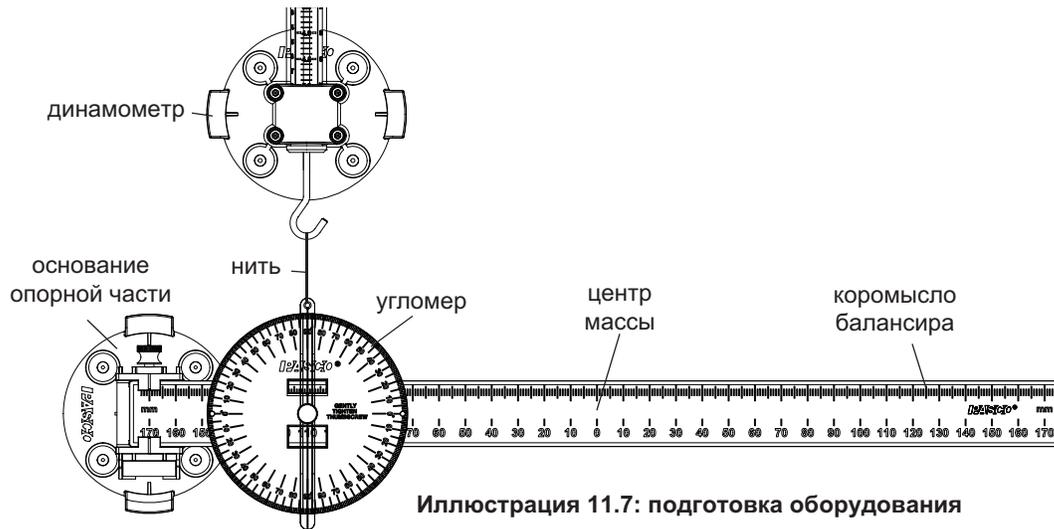


Иллюстрация 11.7: подготовка оборудования

3. Закрепите пружинные весы на доске так, чтобы шкала находилась строго вертикально. Нитью соедините индикатор угла на угломере и нижний крюк пружинных весов.
4. Отрегулируйте балансир и пружинные весы так, чтобы коромысло располагалось горизонтально, а шкала находилась непосредственно над центром угломера.
5. Нажмите на коромысло, опустив его (угол наклона не более 20°). Далее осторожно отпустите. Измерьте время десяти полных колебаний (или максимально возможного числа колебаний). Запишите общее количество колебаний и общее время.
6. Рассчитайте и запишите измеренный период, $T_{\text{измеренный}}$, разделив общее время на количество колебаний.
7. Повторите измерения в первом положении угломера пять раз.
8. Измените положение угломера, сместив его дальше на 10 мм от точки вращения. Повторите измерения.
9. Повторите измерения на отметках 90 мм, 80 мм и 70 мм (всего расстояний должно быть пять).

10. Измерьте и запишите длину балки, L , и расстояние от точки вращения до центра массы балки, L_{cm} .
11. В описании эксперимента по Закону Гука определите константу пружины, κ , пружинных весов и запишите её значение.

Расчёты

1. Рассчитайте и запишите измеренный период в каждом опыте.
2. Рассчитайте и запишите средний измеренный период для всех длин плеча рычага.

Предположим, что угломер является точечной массой, m , при расстоянии r от оси вращения. Его момент инерции + момент инерции балки в итоге дают следующее выражение:

$$I = I_{балка} + mr^2 = \frac{1}{12} ML^2 + ML_{cm}^2 + mr^2$$

Так как расстояние r от оси вращения также является длиной плеча рычага, $L_{рычаг}$, формула расчёта момента инерции приобретает следующий вид:

$$I = I_{балка} + mr^2 = \frac{1}{12} ML^2 + ML_{cm}^2 + mL_{рычаг}^2$$

Формула расчёта периода колебаний выглядит следующим образом:

$$T = \frac{2\pi}{L_{рычаг}} \sqrt{\frac{I}{k}} = \frac{2\pi}{L_{рычаг}} \sqrt{\frac{\frac{1}{12}ML^2 + ML_{cm}^2 + mL_{рычаг}^2}{k}}$$

3. Рассчитайте теоретический период, $T_{теоретический}$, по каждому опыту. Результат зафиксируйте.

Данные

- Масса балки, $M =$ _____ масса угломера, $m =$ _____
- Длина, $L =$ _____ расстояние от точки вращения до центра массы, $L_{cm} =$ _____
- Константа пружины, $\kappa =$ _____

Таблица с данными

L рычаг, м	Колебания	Общее время, с	Измеренный период, с	Теоретический период, с
0,060				
Средний измеренный период, с				
L рычаг, м	Колебания	Общее время, с	Измеренный период, с	Теоретический период, с
0,070				
Средний измеренный период, с				
L рычаг, м	Колебания	Общее время, с	Измеренный период, с	Теоретический период, с
0,080				
Средний измеренный период, с				
L рычаг, м	Колебания	Общее время, с	Измеренный период, с	Теоретический период, с
0,090				
Средний измеренный период, с				
L рычаг, м	Колебания	Общее время, с	Измеренный период, с	Теоретический период, с
0,100				
Средний измеренный период, с				

Вопросы

1. Насколько сопоставимы (в каждом опыте) теоретическое и среднее измеренное значения периода колебаний?
2. Является ли уравнение периода колебаний балки приемлемой математической моделью для расчёта фактического периода колебаний балки на пружине? Почему да или почему нет?

Extension

- Составьте график «Период «Т» / величина, обратная $L_{\text{рычаг}}$ ». Определите наклон линии, сравните значение наклона со значением, которое получится при расчёте по следующей формуле:

$$2\pi \sqrt{\frac{\frac{1}{12}ML^2 + ML_{\text{см}}^2 + mL_{\text{рычаг}}^2}{k}}$$

Эксперимент 12: простейшие механизмы – рычаг

Необходимое оборудование

Доска
 Набор грузов и подвесов
 Большой подвижный блок
 Карандаш или легко стираемый маркер

Динамометр
 Балансир и угомеры
 Нить

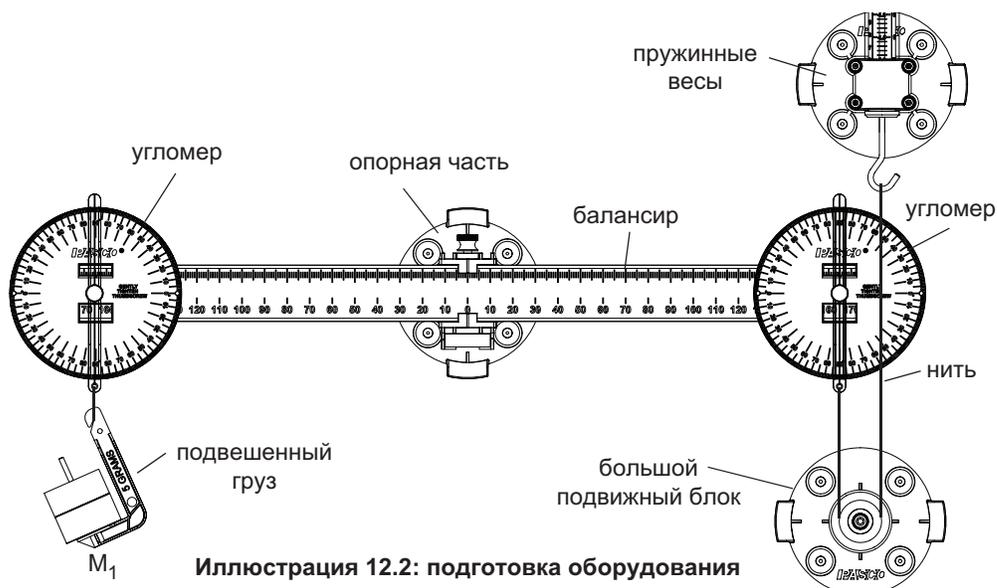
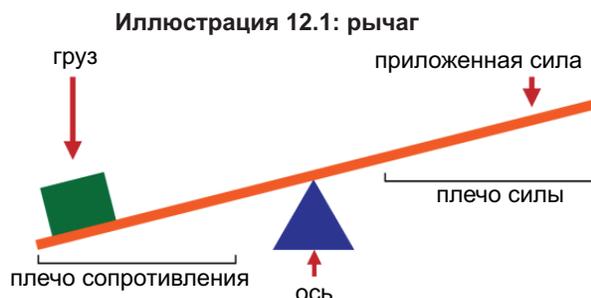
Теоретическая часть

Принцип работы рычага можно понять с помощью такого понятия, как «момент силы». Когда момент силы, создаваемый приложенной силой («усилие»), становится выше, чем момент силы поднимаемого тела («груз»), рычаг вращается вокруг своей точки вращения (которая иногда называется «ось»), поднимая груз. Принцип работы рычага можно ещё объяснить с точки зрения работы и преобразования энергии.

В физике точным математическим определением работы является сила, приложенная к телу, умноженная на расстояние, на котором эта сила действует, или $W = Fd$, где W – это работа, F – приложенная сила, а d – расстояние, на которое перемещается тело в направлении действия силы. Если к телу прикладывается сила, но тело не перемещается в направлении действия этой силы, в техническом смысле работа не выполняется. Если работа выполняется на изолированной системе, энергия этой системы изменится ровно на количество выполненной работы, или $\Delta E = W$, где ΔE – это изменение энергии.

В этом эксперименте вы будете совершать над рычагом определённое, поддающееся измерениям количество работы и наблюдать за изменениями потенциальной энергии в поле силы тяжести Земли.

1. На каждый край балансира установите по угомеру. Балансир закрепите на доске. Центр коромысла должен располагаться на оси опорной части.



2. На один край балансира установите большой подвижный блок и динамометр. С помощью нити соедините динамометр и уголок на балансире.
3. С помощью нити подвесьте к уголку подвес и положите на него груз 200 г.
4. Отрегулируйте большой подвижный блок и пружинные весы так, чтобы балансир располагался точно по горизонтали.

Процедура

1. Выполните необходимые измерения, зарегистрируйте полученные результаты. Покажите, что созданные динамометром крутящие моменты и вес подвешенного груза уравновешены.
2. Карандашом или легко стираемым маркером обведите контуры основания динамометра и отметьте положение верхней части подвеса на доске.
3. Медленно поднимайте пружинные весы вверх. Если вы выполните это движение достаточно медленно, то показания весов существенно не изменятся.
4. Отметьте новые положения подвеса и весов.

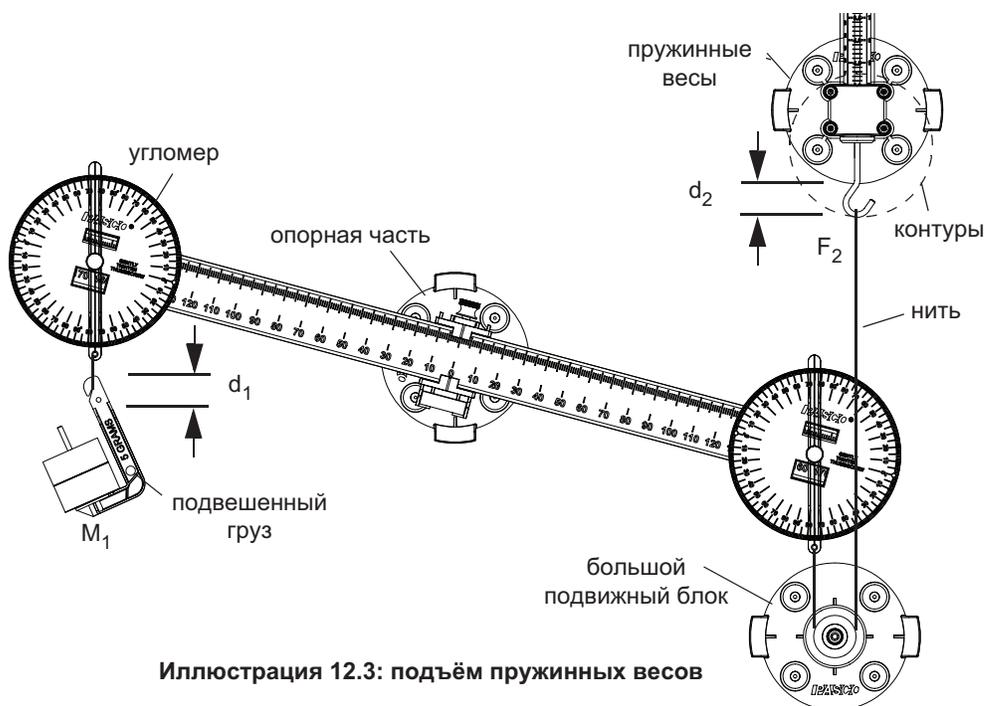


Иллюстрация 12.3: подъем пружинных весов

5. Измерьте и запишите расстояния d_1 (расстояние смещения подвешенного груза) и d_2 (расстояние смещения пружинных весов). Кроме этого зафиксируйте F_2 (показания пружинных весов), M_1 и W_1 , массу и вес подвешенного груза.
6. Передвиньте уголок с подвешенным грузом в новое положение – примерно на середину расстояния до точки вращения – и повторите эксперимент. Измерьте и зафиксируйте новые значения d_1 , d_2 , F_2 .

Таблица с данными

Позиция	Опыт 1	Опыт 2	Позиция	Опыт 1	Опыт 2
Расстояние смещения подвешенного груза, d_1			Масса подвешенного груза, M_1		
Расстояние смещения пружинных весов, d_2			Вес подвешенного груза, W_1		
Сила пружинных весов, F_2					

Расчёты

1. Рассчитайте и запишите количество работы над системой при подъёме пружинных весов. Работа рассчитывается по формуле: $W = F_2 d_2$.
2. Рассчитайте и запишите изменение потенциальной энергии подвешенного груза при его подъёме в гравитационном поле Земли, где $\Delta E_{\text{потенциальная}} = M_1 g d_1$ ($g = 9,8 \text{ Н/кг}$).

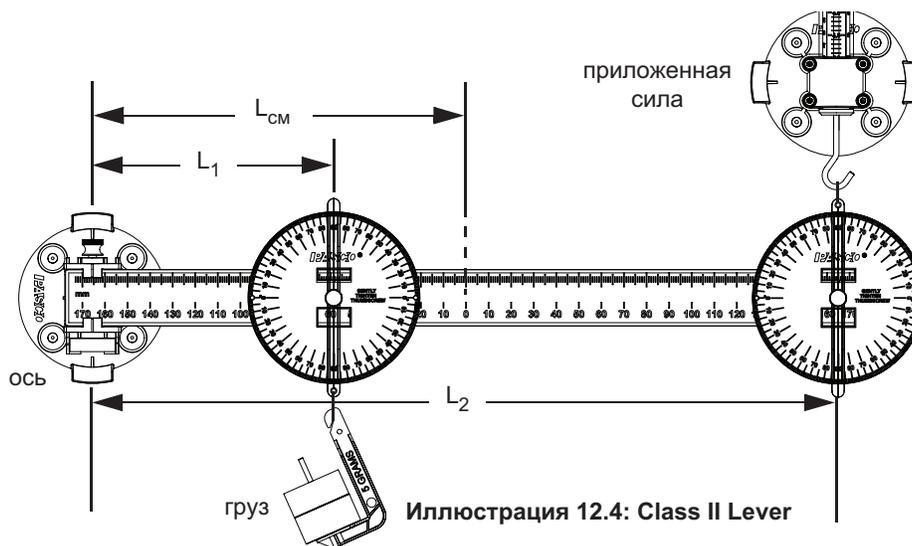
Опыт	Работа	Изменение потенциальной энергии
1		
2		

Вопросы

1. Насколько сопоставимы: работа над системой и изменение потенциальной энергии системы?
2. Насколько рычаг облегчает выполнение работы, например, подъём тяжёлого груза? Объясните с точки зрения сохранения энергии.

Дополнительно

Тип рычага, ось которого расположена между грузом и прикладываемой силой (пружинные весы), называется рычагом класса I. У рычага класса II груз расположен между осью и прикладываемой силой, а у рычага класса III сила прикладывается между осью и грузом.



Примером рычага класса II является тачка, пример рычага класса III – рука человека.

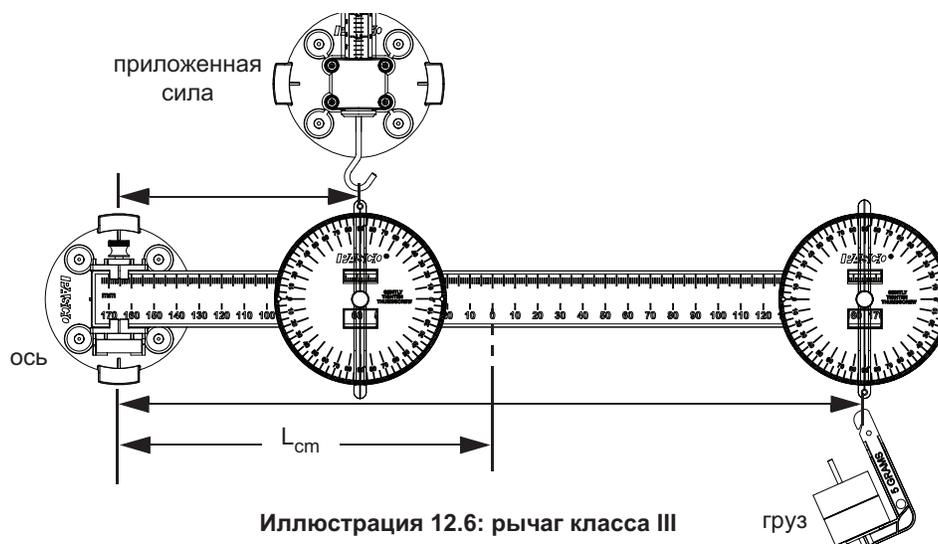


Иллюстрация 12.6: рычаг класса III

Если рычаг находится в положении равновесия, сумма моментов сил вокруг точки вращения с направлением по часовой стрелке равна сумме моментов сил с направлением против часовой стрелки.

Выполните измерения, необходимые для определения того, равна ли сумма моментов сил с направлением по часовой стрелке сумме моментов сил против часовой стрелки для рычагов классов II и III. Понадобится ли вам учитывать массу угломеров и балансира?

Представьте полученные результаты в виде схемы. Измерения и расчёты представьте на отдельном листе бумаги.

Таблица с данными (таблица 16.1):

Рычаг	Σ момент сил по часовой стрелке	Σ момент сил против часовой стрелки	Суммарный момент сил
Класс II			
Класс III			

Вопросы

1. Равен ли суммарный момент сил рычага класса II, если тот находится в состоянии равновесия?
2. Равен ли суммарный момент сил рычага класса III, если тот находится в состоянии равновесия?

Эксперимент 13: простые механизмы – наклонная плоскость

Необходимое оборудование

Доска и подвижный блок

Набор грузов и подвесов

Карандаш или легко стираемый маркер

Динамометр

Наклонная плоскость и тележка

Нить

Вводная часть

Для подъёма тяжёлых предметов так же, как и рычаг, используется наклонная плоскость. В предыдущем эксперименте вы анализировали использование наклонной плоскости в контексте соответствующих «вовлечённых» сил. В этом эксперименте вы будете изучать наклонную плоскость более подробно, основываясь на таких понятиях, как работа и сохранение энергии.

Работа по подъёму тела весом W является произведением веса и высоты. Чтобы поднять то же самое тело по наклонной плоскости, требуется сила меньшего значения, $W \sin \theta$, чем вес тела. Однако расстояние, на котором будет действовать сила, будет большим. Угол θ - это угол наклона плоскости.

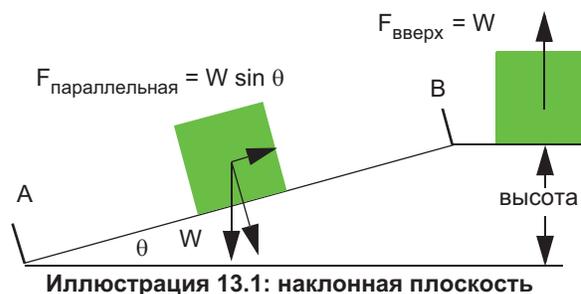


Иллюстрация 13.1: наклонная плоскость

Процедура

1. На стержень тележки наденьте груз 100 г. С помощью пружинных весов измерьте общий вес W тележки с грузом.
 - Вес, $W =$ _____
2. Закрепите наклонную плоскость на доске под относительно малым углом (например, 15°). Подвижный блок и пружинные весы поместите на доске ближе к краю наклонной плоскости. На наклонную плоскость поместите тележку, с помощью нити соедините тележку с пружинными весами.

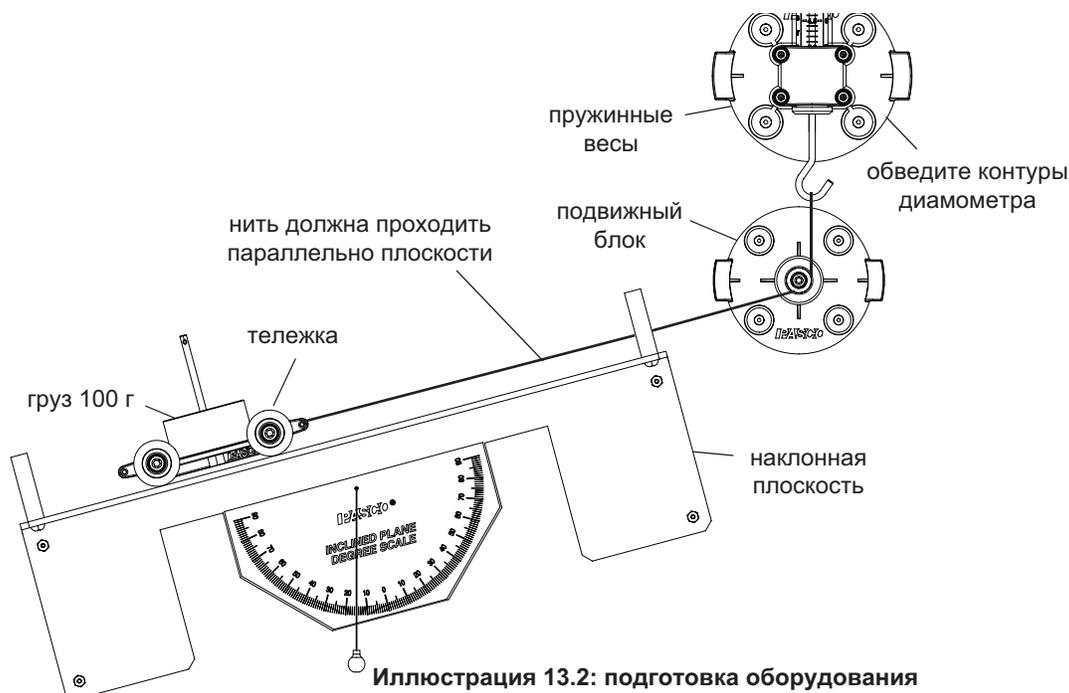


Иллюстрация 13.2: подготовка оборудования

3. Измерьте и запишите значение силы, F_1 , создаваемой пружинными весами на тележку, и угол θ наклонной плоскости.
 - Сила, $F_1 =$ _____ Угол, $\theta =$ _____
4. Карандашом или легко стираемым маркером обведите контуры пружинных весов на доске.
5. Медленно поднимите весы – достаточно медленно, чтобы изменения показаний пружинных весов были незначительными.
6. Измерьте и запишите значение расстояния d_1 , на которое весы переместили тележку.
 - Расстояние, $d_1 =$ _____

Расчёты

1. Рассчитайте и запишите значение высоты, на которую была поднята тележка в результате тянущего усилия со стороны весов.
 - Высота, $d_1 \sin \theta =$ _____

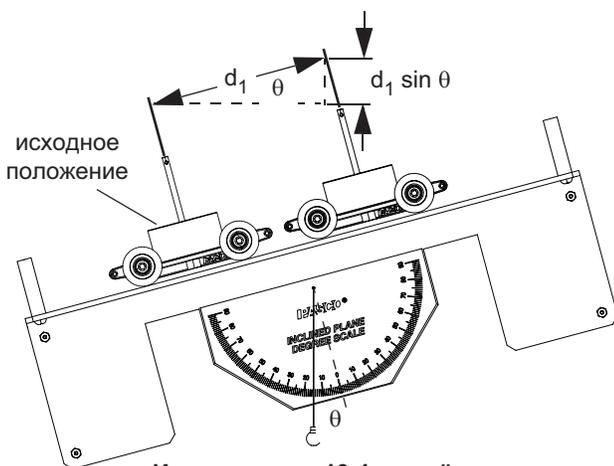


Иллюстрация 13.4: расчёт высоты

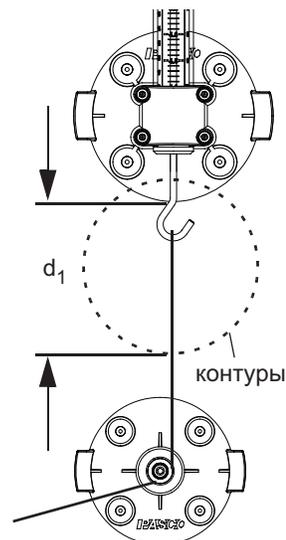


Иллюстрация 13.3: измерение расстояния d_1

2. Рассчитайте и запишите количество работы, выполненной пружинными весами.
 - Работа $= F_1 d_1 =$ _____
3. Рассчитайте и запишите изменения гравитационной потенциальной энергии тележки.
 - $\Delta E = \text{вес} \times \text{высота} = W d_1 \sin \theta =$ _____

Вопрос

- Насколько сопоставимы изменение потенциальной энергии тележки с работой, выполненной динамометром?

Процедура

1. Осторожно подвесьте к весам тележку и груз 100 г. Запишите значение силы F_2 , создаваемой весами.
 - Сила, $F_2 =$ _____

- Медленно поднимите весы на расстояние $d_1 \sin \theta$, то есть на высоту, на которую была поднята тележка, находившаяся на наклонной плоскости (поднимать весы следует медленно, чтобы изменения показаний весов не были значительными).

Расчёты

- Рассчитайте и запишите количество работы, которая была выполнена на тележке при подъёме прямо вверх на расстояние $d_1 \sin \theta$.
 - Работа = $F d = F_2 d_1 \sin \theta =$ _____
- Рассчитайте и запишите изменение гравитационной потенциальной энергии тележки.
 - $\Delta E = \text{вес} \times \text{высота} = W d_1 \sin \theta =$ _____

Вопросы

- Насколько сопоставимы работа, выполненная над тележкой на наклонной плоскости, с работой, связанной с подъёмом тележки пружинными весами?
- Насколько наклонная плоскость облегчает работу, например, подъём тяжёлых грузов? Другими словами – в чём преимущество применения наклонной плоскости?

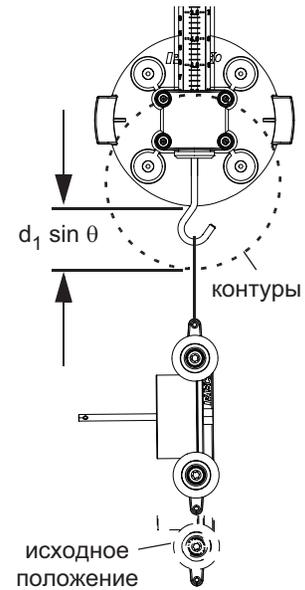


Иллюстрация 13.5: подъём тележки

Эксперимент 14: простые механизмы – подвижный блок

Необходимое оборудование

Доска и подвижный блок
 Большой подвижный блок, малые подвижные блоки (2)
 Набор грузов и подвесов

Динамометр
 Сдвоенный подвижный блок
 Нить

Теоретическая часть

В предыдущих экспериментах вы использовали подвижные блоки для изменения направления прикладываемых сил. Однако системы подвижных блоков могут и трансформировать относительно малые силы в силы с более высоких значений, почти так же как рычаг или наклонная плоскость. В этом эксперименте вы будете изучать подвижные блоки более детально, а также изучать использование систем подвижных блоков для повышения значений прикладываемых сил по мере выполнения работы.

В идеальной системе подвижного блока не должно быть трения. То есть, прикладываемая сила должна полностью передаваться на подвешенный груз.

Изучать такие системы (как и рычаг и наклонную плоскость) можно посредством анализа сил, действующих на них, или работы, которая выполняется над этими системами или непосредственно самими системами. В рамках этого эксперимента вы будете изучать несколько систем подвижных блоков.

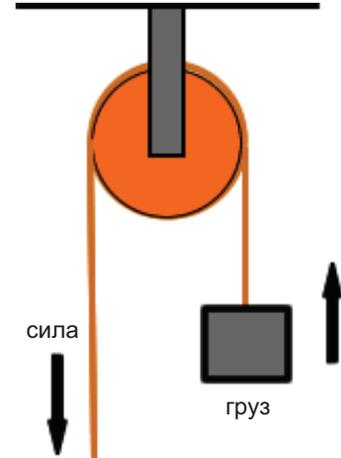


Иллюстрация 14.1:
простой подвижный блок

Процедура

Эффект трения в этом эксперименте более заметен, чем в экспериментах с рычагами и наклонной плоскостью. Изучение начнём именно с него.

1. Повесьте на подвес груз 200 г. С помощью пружинных весов измерьте общий вес, W , подвеса вместе с грузом. Результат измерения запишите.
 - Вес, $W = \underline{\hspace{2cm}}$
2. Закрепите динамометр и два подвижных блока на доске (как показано на схеме), соедините пружинные весы и подвес с помощью нити. Снимите показания силы F с пружинных весов.
 - Сила, $F = \underline{\hspace{2cm}}$

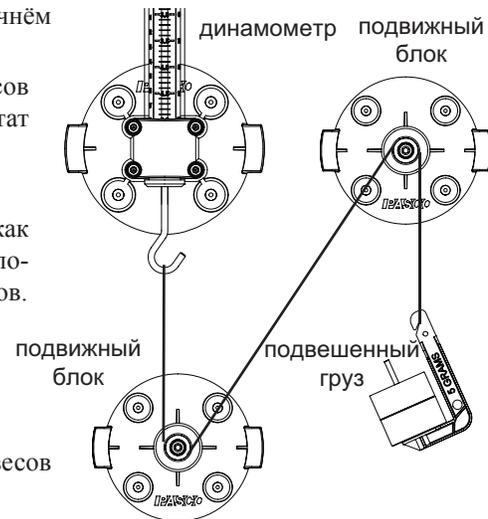


Иллюстрация 14.2:
подготовка оборудования

Вопрос

- Насколько сопоставимы показания силы, F , с пружинных весов с весом подвешенного груза W ?
3. Соберите каждую из трёх представленных ниже систем подвижных блоков. Выполните работу над каждой системой, то есть медленный подъём динамометр. Измерьте и зафиксируйте следующее:

Символ	Описание	Символ	Описание
F	Показания силы с пружинных весов	d2	Расстояние подъёма подвешенного груза
W/F	Соотношение «Вес подвешенного груза / сила»	Работа	Работа, выполненная при подъёме пружинных весов ($F \times d_1$)
d1	Расстояние подъёма пружинных весов	ΔE	Изменение гравитационной потенциальной энергии

4. Карандашом или легко стираемым маркером обведите контуры основания пружинных весов. Также отметьте положение верхней части подвешенного груза.

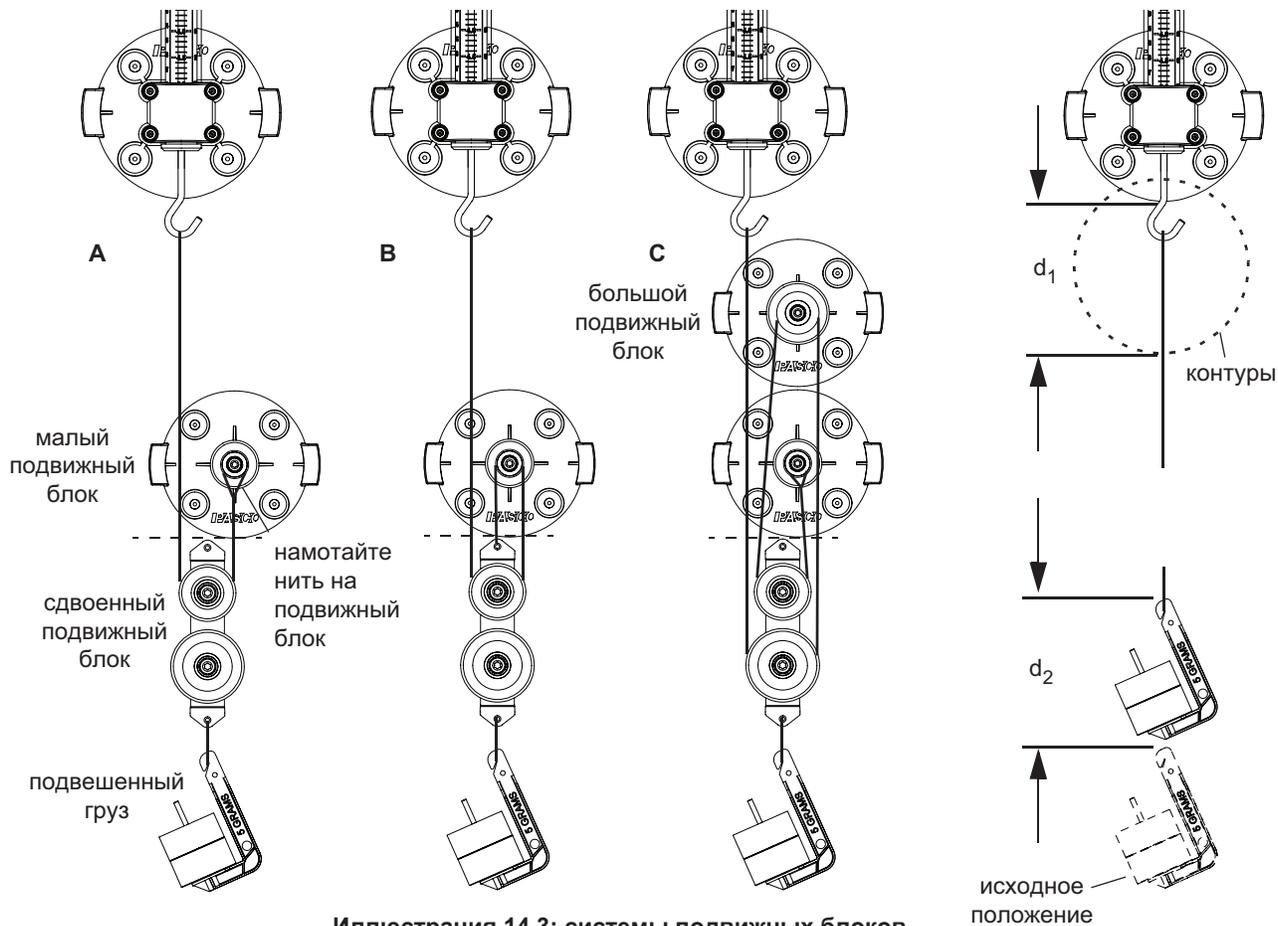


Иллюстрация 14.3: системы подвижных блоков

Внимание: в приведённых чертежах не выдержан масштаб. На практике между компонентами предусматривается большее расстояние.

5. Медленно поднимайте весы (достаточно медленно, чтобы изменения показаний весов не были существенными).
6. Измерьте и зафиксируйте расстояние d_1 (расстояние подъёма весов). Измерьте и зафиксируйте расстояние d_2 (расстояние подъёма подвешенного груза).

Таблица с данными

Система	W	F	W/F	d1	d2	Работа	ΔE
A							
B							
C							

Вопросы

1. Насколько сопоставимы соотношение «вес / сила» (W / F) и соотношение d_1 / d_2 (между расстоянием подъёма весов и расстоянием подъёма подвешенного груза)?
2. Сравните значение W / F с количеством пересечений нитью пунктирной линии на иллюстрации системы подвижных блоков.

Эксперимент 15: Действие сил на стрелу

Необходимое оборудование

Доска
Балансир и угломеры
Набор грузов и подвесов

Динамометр и подвижный блок
Нить

Теоретическая часть

К верхнему краю удерживаемой тросом стрелы подвешен груз. Нижний край стрелы удерживает опорная часть.

Пример: если масса равна 100 кг, а масса стрелы составляет 50 кг, каким будет натяжение, T , троса? Предположим, что трос закреплён на точке, соответствующей центру массы стрелы. К тому же трос находится под определённым углом относительно стрелы. Угол между стрелой и горизонтальной линией равен 50° .

Чтобы стрела находилась в равновесии, все силы, в результате действия которых создаётся поступательное движение (F_x и F_y), равно как и все крутящие моменты должны давать в сумме нуль. Один крутящий момент создаётся натяжением троса. Другой – весом стрелы. Третий крутящий момент возникает от веса подвешенного груза.

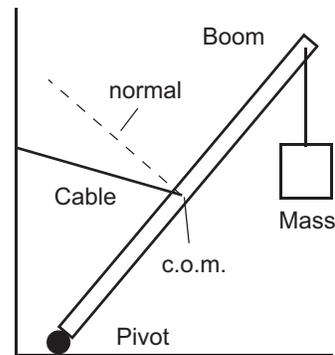


Fig. 15.1: Suspended Mass

$$\Delta\tau_{\text{по часовой стрелке}} = (WL \cos \beta) + (W_{\text{см}} L_{\text{см}} \cos \beta)$$

$$\Delta\tau_{\text{против часовой стрелки}} = TL_{\text{см}} \cos \alpha$$

W – вес подвешенного груза, L – плечо рычага от точки вращения до то точки закрепления подвешенного груза, $W_{\text{стрела}}$ – вес стрелы, $L_{\text{см}}$ – плечо рычага от точки вращения до центра массы, β – угол стрелы, T – натяжение троса, α – угол троса относительно нормали стрелы.

Если стрела находится в состоянии равновесия, суммарный крутящий момент равен нулю. Выражение для расчёта T (натяжение троса) будет выглядеть следующим образом:

$$T = \frac{(WL \cos \beta) + (W_{\text{см}} L_{\text{см}} \cos \beta)}{L_{\text{см}} \cos \alpha}$$

Процедура

1. Соберите балансир, закрепив на одном его конце опорную часть, в срединной точке – первый угломер, а на другом конце – второй угломер. Закрепите собранный таким образом балансир в нижнем углу доски.
2. Закрепите на доске подвижный блок и динамометр, с помощью нити соедините пружинные весы с угломером в срединной точке коромысла балансира.
3. Нитью соедините угломер с края коромысла балансира и подвешенный груз.
4. Выполните необходимые измерения, результаты зафиксируйте.

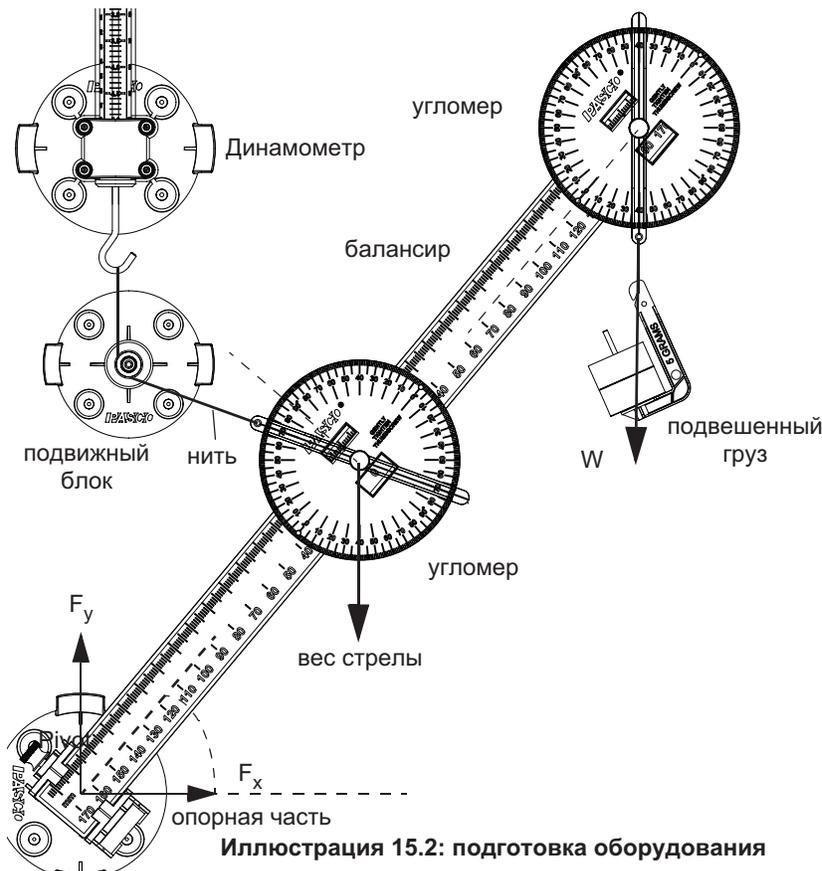


Таблица с данными

Параметр	Значение
Угол β балансира	
Угол α нити	
Вес W подвешенного груза	
Вес $W_{\text{стрела}}$ стрелы	
Вес угломера	
Плечо рычага $L_{\text{см}}$ от точки вращения до центра массы	
Плечо рычага L до подвешенного груза	
Натяжение T в нити	

Расчёты

1. Рассчитайте сумму моментов сил вокруг точки вращения (с направлением по часовой стрелке)
 - \sum моментов сил по часовой стрелке = _____
2. Рассчитайте теоретическое натяжение T нити.
 - Натяжение теоретическое = _____

Вопрос

- Насколько сопоставимы показания силы с пружинных весов с теоретическим значением натяжения нити?

Эксперимент 16: модифицированная машина Атвуда

Необходимое оборудование

Доска	Малый подвижный блок (2)
Набор грузов и подвесов	Нить
Секундомер	Легко стираемый маркер или карандаш

Теоретическая часть

Ускорение тела зависит от суммарной прикладываемой силы и массы этого тела. В машине Атвуда разница между двумя подвешенными грузами определяет суммарную силу, которая действует на систему двух масс. Суммарная сила ускоряет оба подвешенных груза – груз большей массы ускоряется вниз, а груз меньшей массы – вверх.

Машину, демонстрирующую принципы ускорения и суммарной силы, изобрёл Джордж Атвуд в 1784 году. В идеальной машине Атвуда две неравные массы крепятся к эластичной и не имеющей массы нити. Нить пропускается через подвижный блок (не имеющий ни массы, ни трения). В реальной машине не всё так просто, как у её идеального прототипа. Нити и подвижные блоки не могут не иметь массу, а подвижные блоки не лишены трения. Демонстрационный показ помимо прочего усложняется инерцией вращения.

В силовой схеме свободного тела машины Атвуда T является натяжением нити, M_2 больше M_1 , а g является ускорением под действием силы тяжести. На основании правила, гласящего, что вверх – это положительное значение, а вниз – отрицательное, уравнение расчёта суммарной силы для обоих грузов будет выглядеть так:

$$T_1 - M_1g = F_{\text{суммарная}} = M_1a$$

$$T_2 - M_2g = F_{\text{суммарная}} = M_2(-a)$$

В идеале (если нить не имеет массы, не растягивается, а подвижный блок лишён и массы, и трения) натяжение T одинаково для обоих грузов. Примем $T_1 = T_2$ и рассчитаем теоретическое ускорение a :

$$a = g \frac{M_2 - M_1}{M_2 + M_1}$$

Теоретическим ускорением будет разница двух сил ($M_2g - M_1g$), разделённая на сумму двух грузов.

В этом эксперименте вы будете изучать ускорение грузов в машине Атвуда. Вы можете определить ускорение a , измерив время t , т.е., время, в течение которого один из грузов совершает падение, проходя при этом известное расстояние d .

$$a = \frac{2d}{t^2}$$

Сравните измеренное и теоретическое ускорения.

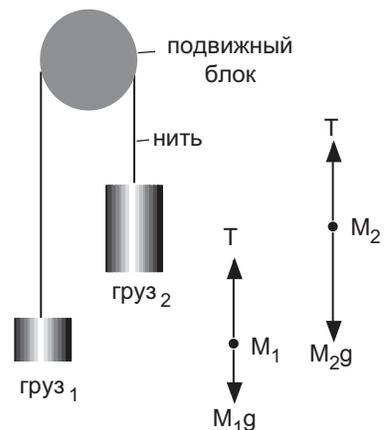


Fig. 16.1: Atwood's FBD

Подготовка оборудования

1. Закрепите на доске два малых подвижных блока ближе к верхнему краю (подвижные блоки должны располагаться рядом друг с другом и находиться на одном уровне).
2. Два подвеса соедините нитью, которая должна проходить через оба подвижных блока.
 - ПРИМЕЧАНИЕ: нить должна быть достаточно длинной, чтобы тяжёлый груз почти доставал до нижней части доски, а малый груз поднимался почти до подвижного блока.
3. Опустите груз M_1 вниз так, чтобы верхняя часть груза M_2 находилась почти под основанием подвижного блока. Легко стираемым маркером или карандашом нанесите на доску горизонтальную отметку по нижнему краю груза M_2 .
4. Отмерьте по вертикали вниз 20 см от первой отметки, нанесите на доске вторую горизонтальную отметку.

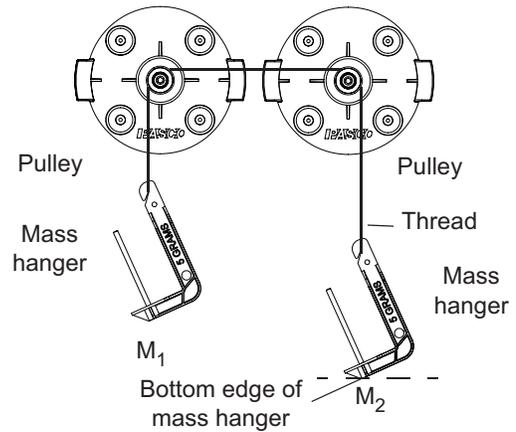


Figure 16.2: Equipment Setup

Процедура

Часть 1: постоянная общая масса

1. На «лёгкий» подвес (M_1) положите следующие грузы: 1 x 50г, 3 x 20г, 2 x 5г, 2 x 2г, 1 x 1г. На «тяжёлый» подвес (M_2) положите следующие грузы: 1 x 50г, 3 x 20г, 1 x 10г, 1 x 5г.
2. В таблицу с данными внесите значения M_1 и M_2 с учётом массы самого подвеса – 5 г.
3. Груз 1г переложите с «лёгкого» подвеса на «тяжёлый» (разница должна будет составлять 1 г). Тяните «лёгкий» груз вниз, пока нижний край «тяжёлого» груза не сравняется с начальной отметкой на доске.
 - ПРИМЕЧАНИЕ: подвесы не должны ни качаться, ни вращаться.
4. Отпустите «лёгкий» подвес, в этот же момент засекайте время. Остановите секундомер, когда нижний край «тяжёлого» подвеса достигнет конечной отметки на доске. Внесите время t_1 в таблицу с данными. Повторите опыт ещё два раза, результаты также внесите в таблицу.
5. Во втором опыте верните груз 1г на «лёгкий» подвес, а один из грузов 2г переместите на «тяжёлый» подвес ($\Delta M = 2$ г). Регистрацию данных проведите три раза.
6. В третьем опыте снимите груз 1г с «лёгкого» подвеса и положите его на «тяжёлый» подвес ($\Delta M = 3$ г). Регистрацию данных проведите три раза.
7. В четвёртом опыте снимите с «тяжёлого» подвеса груз 1г, переложите его на «лёгкий», снимите груз 2г с «лёгкого» подвеса, положите его на «тяжёлый» ($\Delta M = 4$ г). Регистрацию данных проведите три раза.
8. Для пятого опыта снимите груз 1г с «лёгкого» подвеса, положите его на «тяжёлый» подвес ($\Delta M = 5$ г). Регистрацию данных проведите три раза.

Таблица с данными 1: постоянная общая масса

Опыт	M_1 , кг	M_2 , кг	ΔM , кг	t_1	t_2	t_3	$T_{\text{среднее}}$	$\alpha_{\text{теорет.}}$	$\alpha_{\text{измер}}$	Разница, %
1			0,001							
2			0,002							
3			0,003							
4			0,004							
5			0,005							

Часть 2: постоянная суммарная сила

1. Положите груз 50 г на «лёгкий» подвес M_1 . На «тяжёлый» подвес M_2 положите грузы 50г и 5г.
2. Внесите в таблицу значения общей массы M_1 и M_2 (масса с учётом грузов + подвеса 5г).
3. Тяните «лёгкий» подвес вниз до тех пор, пока нижний край «тяжёлого» подвеса не сравняется с начальной отметкой на доске.
 - ПРИМЕЧАНИЕ: подвесы не должны ни качаться, ни вращаться.
4. Отпустите «лёгкий» подвес, в этот же момент засекайте время. Остановите секундомер, когда нижний край «тяжёлого» подвеса достигнет конечной отметки на доске. Внесите время t_1 в таблицу с данными. Повторите опыт ещё два раза, результаты также внесите в таблицу.
5. Во втором опыте добавьте на каждый подвес по грузу 20г (ΔM будет оставаться 5г). Регистрацию данных проведите три раза.
6. В третьем опыте добавьте на каждый подвес ещё по 20г. Регистрацию данных проведите три раза.
7. В четвёртом опыте добавьте на каждый подвес ещё по 20г. Регистрацию данных проведите три раза.
8. В пятом опыте добавьте на каждый подвес ещё по 20г. Регистрацию данных проведите три раза.

Таблица с данными: постоянная суммарная сила

Опыт	M_1 , кг	M_2 , кг	ΔM , кг	t_1	t_2	t_3	$T_{\text{среднее}}$	$\alpha_{\text{теорет.}}$	$\alpha_{\text{измер}}$	Разница, %
1			0,005							
2			0,005							
3			0,005							
4			0,005							
5			0,005							

Расчёты

1. Рассчитайте и запишите среднее время в каждом опыте.
2. Рассчитайте и запишите теоретическое и измеренное ускорения каждого опыта.

3. Рассчитайте и запишите разницу (в %) между теоретическим и измеренным ускорением в каждом опыте.

$$\text{Разница в \%} = \left| \frac{a_{\text{теорет.}} - a_{\text{измеренное}}}{a_{\text{теорет.}}} \right| \times 100$$

4. Для данных по постоянной общей массе рассчитайте суммарную силу в каждом опыте: $F_{\text{суммарная}} = \Delta M \times g$. Составьте график «Суммарная сила по вертикали / измеренное ускорение по горизонтали».

Вопросы

1. Опишите график «Суммарная сила / ускорение». Что характеризует наклон линии графика?
2. Как связан график «Суммарная сила / ускорение» со вторым Законом Ньютона?
3. Сравните значения разниц (в %) между теоретическим и измеренным ускорением. По каким причинам на эту разницу нужно будет делать поправку?

Техническая поддержка

Контактные данные Службы технической поддержки PASCO:

Адрес: PASCO scientific, 10101 Бульвар Футхиллз,
Розвилл, Калифорния 95747-7100

Телефон: 916-786-3800 (для звонков из любой страны мира, кроме США) или
800-772-8700 (для звонков из США)

Факс: (916)786-7565

Сайт: www.pasco.com

Электронная почта: support@pasco.com

Более подробную информацию по изделию «Набор для изучения основ статики» и новейшую версию Руководства по эксплуатации можно получить на сайте PASCO, введя в поле поиска артикул ME-9502.

Ограниченная гарантия

Описание условий гарантии на продукцию PASCO приводится в каталоге PASCO.

Авторское право

Руководство для пользователя PASCO scientific 012-12876B Statics System Instruction Manual («Набор для изучения основ статики») защищено авторским правом. Копирование любой части настоящего руководства разрешается некоммерческим образовательным учреждениям при условии использования исключительно в лабораториях и аудиториях и неосуществлении продаж с целью получения прибыли. При других обстоятельствах копирование без письменного разрешения со стороны PASCO scientific запрещается.

Торговые марки

PASCO и PASCO scientific являются торговыми марками или зарегистрированными торговыми марками PASCO scientific в США и/или других странах. Наименования других брендов, продуктов и сервисов являются или могут быть торговыми или сервисными марками, используемыми для идентификации продукции и услуг других владельцев. Для получения более подробной информации заходите по ссылке www.pasco.com/legal.

