

Глава II. ДИНАМИКА

§ 6. Первый закон Ньютона — закон инерции

Динамикой называют раздел механики, в котором изучают, как взаимодействие тел влияет на их движение.

Законы динамики сформулировал английский учёный Исаак Ньютон. Они известны сегодня как *три закона Ньютона*.

1. Закон инерции

В качестве первого закона динамики Ньютон взял открытый Галилеем *закон инерции*. Вы уже знакомы с этим законом из курса физики 7-го класса. Повторим один из опытов Галилея.



Галилео Галилей
(1564—1642)

Поставим опыт

Сообщим шару некоторую начальную скорость и будем наблюдать, как он катится по горизонтальной поверхности. Мы заметим, что время движения шара до остановки зависит от рода поверхности: чем она более гладкая и твёрдая, тем *дольше* катится шар (рис. 6.1).

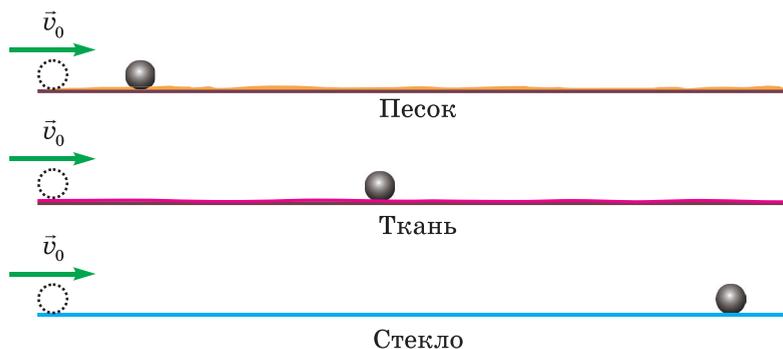


Рис. 6.1

Эти опыты навели Галилея на мысль, что причиной изменения скорости шара является *трение*: чем оно меньше, тем дольше катится шар. И учёный сделал гениальный вывод: если бы трения не было *совсем*, то скорость шара оставалась бы *постоянной*!

Таким образом, Галилей сформулировал *закон инерции*: если на тело не действуют другие тела или действия других тел скомпенсированы, то тело движется равномерно и прямолинейно или покоится.

Сохранение состояния покоя или прямолинейного равномерного движения в случаях, когда на данное тело не действуют другие тела или действия других тел скомпенсированы, называют явлением инерции¹⁾.

Мы так часто используем в жизни явление инерции, что обычно не обращаем на это внимания. Например, именно вследствие явления инерции можно после разгона ехать на велосипеде по горизонтальной дороге, не крутя педали (рис. 6.2).



Рис. 6.2

¹⁾ Далеко не любое движение с постоянной по модулю и направлению скоростью разумно считать движением по инерции. Например, равномерное движение тяжело гружёного самосвала вверх по склону вряд ли стоит считать движением по инерции, хотя при этом все действующие на самосвал силы уравновешивают друг друга. С другой стороны, естественно считать, что всадник, выброшенный из седла при резкой остановке лошади, движется по инерции, хотя на него действует сила тяжести, и он движется по параболе. Другой часто используемый пример движения по инерции: при встряхивании мокрого зонтика с него слетают капли воды, но они движутся после этого под действием силы тяжести, которая не уравновешивается другими силами. Эти примеры показывают, что «движение по инерции» не является однозначно определённым понятием. В связи с этим нецелесообразно включать его в задания при контроле знаний.

2. Инерциальные системы отсчёта

Закон инерции справедлив не в любой системе отсчёта. Опыты показывают, что он с хорошей точностью выполняется в системе отсчёта, связанной с Землёй. Однако, например, в системе отсчёта, связанной с разгоняющимся или тормозящим автомобилем, этот закон не выполняется: при разгоне автомобиля пассажир чувствует, что какая-то «неведомая» сила вдавликает его в кресло, а при торможении такая же «неведомая» сила толкает его вперёд.

Системы отсчёта, в которых выполняется закон инерции, называют *инерциальными*.

1. Приведите свои примеры систем отсчёта, которые можно считать инерциальными.



Существует *бесконечно много* инерциальных систем отсчёта. Ведь если тело покоится или движется равномерно и прямолинейно в одной инерциальной системе отсчёта, то оно будет покоиться или двигаться равномерно и прямолинейно в любой другой системе отсчёта, которая движется относительно данной системы отсчёта с постоянной (по модулю и направлению) скоростью.

3. Первый закон Ньютона

Закон инерции с указанием систем отсчёта, в которых он выполняется, формулируют сегодня как *первый закон Ньютона*.

Существуют системы отсчёта, называемые инерциальными, относительно которых тела сохраняют свою скорость неизменной, если на них не действуют другие тела или действия других тел скомпенсированы.

Главный вывод из первого закона Ньютона заключается в том, что *изменение скорости тела в инерциальной системе отсчёта обусловлено действием на это тело других тел*.

Поэтому взаимодействие тел удобнее всего изучать именно в инерциальных системах отсчёта. Мы так и будем поступать.

Первый закон Ньютона (закон инерции) кажется настолько простым, что возникает вопрос: почему его не открыли до Галилея?

Ведь ещё древнегреческий учёный Аристотель, живший в 4-м веке до нашей эры, написал книгу «Физика», что в переводе с древнегреческого означает «Природа».

В этой книге Аристотель утверждал, что тело движется только при условии, что его «толкают» или «тянут». На это указывал повседневный опыт. Например, телега не едет сама по себе, её должна тянуть лошадь. И листья на деревьях трепещут только под действием ветра.

Представление Аристотеля о движении и его причинах было настолько *очевидным*, что его никто не подвергал сомнению в течение двух тысяч лет, пока над ним не задумался Галилей. Он отнёсся к представлению Аристотеля как к *гипотезе*¹⁾, которую надо проверить на *опыте*.

Поэтому Галилея считают основоположником *научного метода*, который состоит в том, что на основе наблюдений учёный формулирует *гипотезу*, которую потом надо обязательно проверить на *опыте*.

Научный опыт (эксперимент) отличается от повседневного опыта тем, что учёный намеренно создаёт *специальные условия* протекания природных явлений с целью найти однозначный ответ на поставленный им «природе» вопрос: правильна ли сформулированная им гипотеза или нет?

Например, Галилей в своих опытах, которые привели его к формулировке закона инерции, старался максимально *уменьшить трение*.

Открытый Галилеем закон инерции, согласно которому тело может двигаться «само по себе», да ещё и неограниченно долго, и сегодня представляется таким же *неочевидным*, как и во времена Аристотеля.

И причина того, что нам трудно *осознать* закон инерции (не *заучить* его формулировку, а *понять* его), всё та же: мы *видим*, что окружающие нас тела *не движутся сами по себе*, да ещё *сколь угодно долго*! Как же мы можем не верить собственным глазам?

Однако теперь, когда мы знаем о трении и сопротивлении среды (например, воздуха), которое сопровождает любое движение, мы можем *мысленно* отвлечься от них и *представить* себе неограниченно продолжающееся прямолинейное равномерное движение тела, на которое не действуют другие тела, хотя такого тела и не существует в природе: невозможно, например, «отключить» силы тяготения.

Нашему воображению помогает и то, что сегодня люди научились значительно уменьшать трение. Благодаря этому способность

1) *Гипотезой* называют научное предположение: именно таково значение этого слова в переводе с латинского.

тел сохранять движение перестала казаться такой удивительной и странной, какой она была во времена Аристотеля и даже во времена Галилея.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- *Первый закон Ньютона:* существуют системы отсчёта, называемые инерциальными, относительно которых тела сохраняют свою скорость неизменной, если на них не действуют другие тела или действия других тел скомпенсированы.
- Сохранение состояния покоя или прямолинейного равномерного движения в случаях, когда на данное тело не действуют другие тела или действия других тел скомпенсированы, называют *явлением инерции*.



? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

Базовый уровень

2. Расскажите о законе инерции. Кем был открыт этот закон?
3. Какое из приведённых ниже утверждений правильное?
 - а) Если на тело не действуют другие тела, то скорость тела не изменяется.
 - б) Если скорость тела не изменяется, значит, на тело не действуют другие тела.Приведите примеры, подтверждающие ваш ответ.
4. Какие системы отсчёта называют инерциальными? Приведите примеры инерциальных систем отсчёта.
5. На основании каких наблюдений и опытов систему отсчёта, связанную с Землёй, можно приближённо считать инерциальной?
6. Приведите примеры систем отсчёта, которые нельзя считать инерциальными.
7. Сформулируйте первый закон Ньютона с указанием систем отсчёта, в которых он справедлив.

§ 7. Второй закон Ньютона

1. Силы. Равнодействующая

Из курса физики 7-го класса вы уже знаете, что взаимодействие тел описывают с помощью *сил*, действующих на каждое из взаимодействующих тел.

Напомним, что сила — *векторная* величина, потому что она характеризуется не только числовым значением (*модулем*), но и *направлением*.

Все механические явления можно объяснить действием всего трёх видов сил: *сил упругости*, *сил тяготения* и *сил трения*. С этими видами сил вы тоже познакомились в курсе физики 7-го класса. Далее мы рассмотрим их подробнее.

Измеряют силы *динамометром*, действие которого основано на свойствах сил упругости. На рисунке 7.1 изображён демонстрационный пружинный динамометр и показано его устройство.



Рис. 7.1

Единицей силы в СИ является *ньютон* (Н), определение которого будет дано ниже.

Равнодействующая

Опыты показывают, что в тех случаях, когда тело можно считать материальной точкой, *несколько* приложенных к телу сил вызывают такое же действие, как и *одна* сила, равная их *векторной сумме*. Поэтому

векторную сумму приложенных к телу сил называют *равнодействующей* этих сил.



1. На рисунках 7.2, *а*, *б* показаны примеры нахождения равнодействующей двух сил, направленных вдоль одной прямой.
 - а) В каком случае модуль равнодействующей $\vec{F}_1 + \vec{F}_2$ равен *сумме* модулей сил \vec{F}_1 и \vec{F}_2 : когда эти силы направлены одинаково или противоположно?

- б) Как направлена равнодействующая двух противоположно направленных сил \vec{F}_1 и \vec{F}_2 , если модули этих сил не равны?
 в) В каком случае равнодействующая двух сил равна нулю?

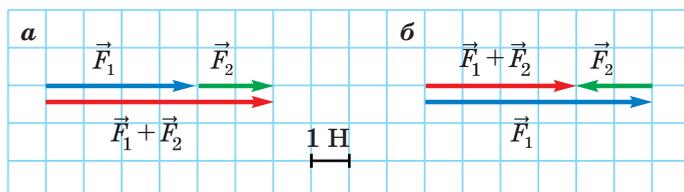


Рис. 7.2

2. Изобразите на чертеже две силы, равные по модулю 3 Н и 4 Н, направленные *перпендикулярно* друг другу. Найдите равнодействующую этих сил. Чему она равна по модулю?

Соотношение между силой и ускорением

Если равнодействующая приложенных к телу сил не равна нулю, то тело движется с *ускорением*.

Поставим опыт

На рисунке 7.3 изображён опыт, с помощью которого можно определить, как связано ускорение тела \vec{a} с равнодействующей приложенных к нему сил \vec{F} .

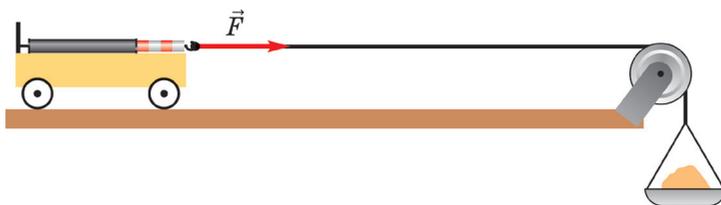


Рис. 7.3

Измеряя пути, проходимые тележкой за разные промежутки времени, можно установить, что под действием *постоянной* равнодействующей тело движется *равноускоренно*.

Изменяя груз, можно изменять действующую на тележку силу. Опыт показывает, что *ускорение тела пропорционально равнодействующей приложенных к телу сил*.

2. Масса



Поставим опыт

Если повторить описанные выше опыты с двумя соединёнными вместе одинаковыми тележками (рис. 7.4), то мы заметим: чтобы сообщить *двум* тележкам такое же ускорение, что и одной, к ним надо приложить в 2 раза бóльшую силу.

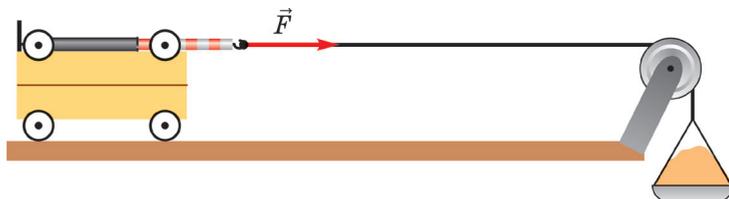


Рис. 7.4

Это выражают так: *инертность* двух соединённых вместе тележек в 2 раза больше, чем инертность одной тележки. Физический смысл понятия инертности состоит в том, что чем больше инертность тела, тем бóльшую силу надо приложить к нему, чтобы сообщить ему заданное ускорение.

Мерой инертности тела является его *масса*.

Единицей массы в СИ является *килограмм* (кг). В качестве эталона (образца) тела массой 1 кг взяли цилиндр, сделанный из нержавеющей сплава, который хранится в Международном бюро мер и весов во Франции. Точные копии этого эталона имеются в других странах, в том числе в России. Приблизённо 1 кг равен массе 1 л пресной воды.

Используют также такие единицы массы как 1 грамм (г), равный 0,001 кг, а также 1 тонна (т), равная 1000 кг.

Массу тел измеряют *взвешиванием* — по силе притяжения тел к Земле. Этот самый распространённый способ измерения массы основан на том, что *масса является также мерой гравитационного взаимодействия тел*. Ниже мы рассмотрим это подробнее.

Рассмотрим красивый опыт, который демонстрирует свойство инертности тела, обладающего значительной массой.



3. На нити подвешен массивный шар, к которому снизу прикреплена такая же нить. Если *резко* дёрнуть вниз нижнюю

нить, то она и разорвётся. А если тянуть за нижнюю нить *плавно*, постепенно увеличивая силу, то разорвётся верхняя нить. Объясните этот опыт.

3. Второй закон Ньютона

Соотношение между равнодействующей приложенных к телу сил \vec{F} , массой тела m и ускорением тела \vec{a} впервые было сформулировано Ньютоном.

Равнодействующая всех приложенных к телу сил равна произведению массы тела на его ускорение:

$$\vec{F} = m\vec{a}.$$

Это утверждение называют *вторым законом Ньютона*.

Второй закон Ньютона справедлив только в *инерциальных системах отсчёта*.

Единицу силы *ньютон* определяют с помощью второго закона Ньютона:

1 Н равен силе, которая телу массой 1 кг сообщает ускорение $1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$. Отсюда следует, что

$$1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \cdot 1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Используя второй закон Ньютона, можно найти *любую* из трёх входящих в него величин, если известны две остальные.

Например, если известны равнодействующая приложенных к телу сил и его масса, то ускорение тела можно найти по формуле

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}.$$

Если известно, что тело приобретает ускорение \vec{a} под действием равнодействующей \vec{F} , то массу тела можно найти по формуле

$$m = \frac{F}{a}.$$

Обратите внимание: в эту формулу входят *модули* равнодействующей и ускорения.



Исаак Ньютон
(1643–1727)



4. Составьте по одной задаче на нахождение равнодействующей, ускорения и массы тела с использованием второго закона Ньютона и решите их.
5. На тело массой 2 кг действуют две силы, равные по модулю 6 Н и 8 Н, направленные перпендикулярно друг другу. Изобразите эти силы на чертеже.
 - а) Чему равна по модулю равнодействующая приложенных к телу сил? Постройте её на чертеже.
 - б) Чему равно по модулю ускорение тела?
6. На тело действуют две силы. При каком соотношении между этими силами тело движется равномерно и прямолинейно в инерциальной системе отсчёта?

Важное следствие второго закона Ньютона

Второй закон Ньютона устанавливает соотношение между равнодействующей приложенных к телу сил, массой тела и его ускорением, но в нём *не фигурирует скорость тела!*

Из второго закона Ньютона следует, что равнодействующая \vec{F} приложенных к телу сил и ускорение тела \vec{a} *направлены одинаково* (такие векторные величины называют также *сонаправленными*). Обратите внимание: *модуль и направление скорости тела при этом не имеют значения*. В следующем пункте мы убедимся в этом на конкретных примерах.

4. Применение второго закона Ньютона на примере движения тела под действием силы тяжести

Как вы знаете из курса физики 7-го класса, на *все* тела, расположенные у поверхности Земли, действует *сила тяжести* \vec{F}_T со стороны Земли. Мы не можем «выключить» силу тяжести, но зато мы можем рассмотреть движение тела под действием только *одной* этой силы.



7. Опыт показывает, что при *свободном падении* (так называют падение тела в случае, когда можно пренебречь сопротивлением воздуха) *все* тела вблизи поверхности Земли движутся под действием силы тяжести \vec{F}_T с *одинаковым* ускорением \vec{g} , которое называют *ускорением свободного падения*. Исходя из этого и используя второй закон Ньютона, выразите силу тяжести через массу тела и ускорение свободного падения.

Итак, мы приходим к выводу, что *сила тяжести пропорциональна массе тела*. Благодаря этому массу тела можно опре-

делять *взвешиванием*: взвешивая тело, мы измеряем действующую на него силу тяжести, которая пропорциональна массе (рис. 7.5).

Если тело брошено с *любой* скоростью и можно пренебречь сопротивлением воздуха, то во время *всего полёта* на тело действует только одна сила — сила тяжести. Следовательно, во время всего полёта тело движется с ускорением свободного падения.



Рис. 7.5



8. На рисунках 7.6, *а—в* изображено летящее с некоторой скоростью тело, указаны¹⁾ скорость тела \vec{v} и действующая на него сила тяжести \vec{F}_T . Примите, что силой сопротивления воздуха можно пренебречь. Перенесите рисунки в тетрадь и укажите на каждом из них ускорение тела (рядом с телом).

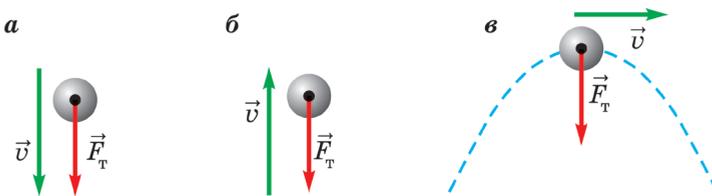


Рис. 7.6

Эти примеры показывают, что равнодействующая и ускорение тела могут быть направлены так же, как скорость тела (см. рис. 7.6, *а*), противоположно скорости тела (см. рис. 7.6, *б*), перпендикулярно скорости тела (см. рис. 7.6, *в*), и вообще под *любым* углом к скорости.

Итак, *ускорение тела определяется только равнодействующей приложенных к нему сил*²⁾.

9. Как направлена равнодействующая сил, приложенных к телу, которое равномерно движется по окружности?
10. Как направлено ускорение Земли при её движении вокруг Солнца?



1) Обратите внимание: на чертежах точку приложения силы совмещают обычно с центром тела (если оно имеет правильную форму), а скорость тела указывают рядом с телом.

2) В некоторых случаях приложенные к телу силы зависят от направления скорости тела (например, сила трения скольжения) и модуля скорости (например, сила сопротивления воздуха или воды).



ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Сила — *векторная* величина: она характеризуется числовым значением (*модулем*) и *направлением*. Измеряют силы *динамометром*.
- *Единицей силы* в СИ является *ньютон* (Н): $1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \cdot 1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.
- Векторную сумму приложенных к телу сил называют *равнодействующей* этих сил.
- *Масса* является мерой инертности тела, а также мерой гравитационного взаимодействия тел. *Единицей массы* в СИ является *килограмм* (кг).
- *Второй закон Ньютона*: равнодействующая всех приложенных к телу сил равна произведению массы тела на его ускорение: $\vec{F} = m\vec{a}$.
- Второй закон Ньютона справедлив только *в инерциальных системах отсчёта*.
- Равнодействующая \vec{F} приложенных к телу сил и ускорение тела \vec{a} *направлены одинаково* (сонаправлены).
- Под действием только силы тяжести все тела движутся с одинаковым ускорением, равным *ускорению свободного падения* \vec{g} .
- *Сила тяжести* выражается формулой $\vec{F}_T = m\vec{g}$.

? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

Базовый уровень

11. По какому признаку можно определить, что на тело действует сила? Приведите примеры, подтверждающие ваш ответ.
12. На тело действуют три силы, направленные вдоль одной прямой. Модули сил равны 1 Н, 2 Н и 3 Н. Могут ли эти силы уравновесить друг друга? Сделайте поясняющий рисунок.
13. Чему может быть равен модуль равнодействующей двух горизонтально направленных сил, модули которых 100 Н и 200 Н? Сделайте поясняющий рисунок.

14. Чему может быть равен модуль равнодействующей двух вертикально направленных сил, модули которых равны 100 Н и 150 Н? Сделайте рисунки, поясняющие все возможные варианты.
15. Равнодействующая приложенных к телу сил равна нулю. Что можно сказать о скорости и ускорении этого тела в инерциальной системе отсчёта?
16. Можно ли утверждать что-то о направлении скорости тела, зная направление равнодействующей приложенных к нему сил? Обоснуйте свой ответ.
17. Чему равен модуль силы, сообщающей телу массой 2 кг ускорение 5 м/с^2 ?
18. Сила, равная по модулю 16 Н, сообщает телу ускорение, равное по модулю 2 м/с^2 . Чему равна масса тела?
19. Под действием одной и той же горизонтально направленной равнодействующей пустая тележка движется с ускорением 2 м/с^2 , а тележка с бруском — с ускорением $0,5 \text{ м/с}^2$. Во сколько раз масса бруска больше массы тележки?
20. На рисунках 7.7, *a–в* изображены силы, действующие на тело массой 0,5 кг. Чему равно ускорение тела в каждом случае, если $F_1 = 1,5 \text{ Н}$, $F_2 = 2 \text{ Н}$?

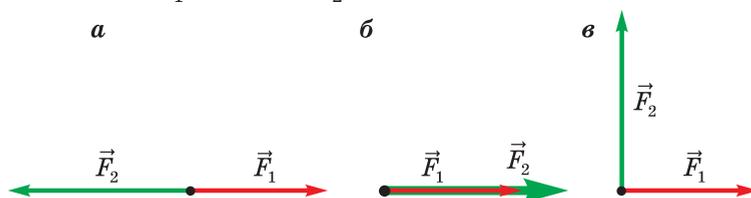


Рис. 7.7

21. На рисунках 7.8, *a–в* изображены векторы скорости тела и равнодействующей приложенных к телу сил. Перенесите рисунки в тетрадь и укажите на них направление вектора ускорения тела.

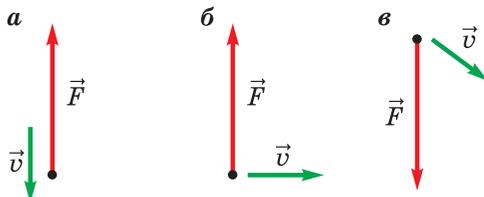


Рис. 7.8

22. На рисунках 7.9, *a–в* изображены векторы скорости тела и ускорения шара. Перенесите рисунки в тетрадь и укажите на них направление равнодействующей сил, приложенных к шару.

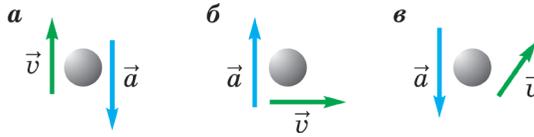
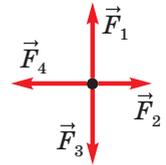


Рис. 7.9

Повышенный уровень

23. Чему равен модуль ускорения тела массой 5 кг, если приложенные к нему силы направлены так, как показано на рисунке 7.10, а модули этих сил равны:



- а) $F_1 = F_3 = F_4 = 40$ Н, $F_2 = 32$ Н;
 б) $F_1 = F_4 = 40$ Н, $F_2 = 32$ Н, $F_3 = 34$ Н?

Рис. 7.10

24. Объясните, почему для увеличения скорости артиллерийского снаряда увеличивают длину ствола орудия.
25. К телу приложены две силы, направленные перпендикулярно друг другу. Подберите массу тела и модули сил так, чтобы ускорение тела было равно 3 м/с². Сделайте пояснительный рисунок.
26. Хоккейной шайбе массой 160 г ударом клюшки сообщили скорость 10 м/с. После этого шайба скользила по льду до остановки 5 с. Чему была равна равнодействующая приложенных к шайбе сил во время скольжения?
27. Грузовик разогнался на прямом проспекте после остановки у светофора до скорости 36 км/ч за 10 с, потом ехал с постоянной скоростью, а перед следующим светофором затормозил за 8 с. Масса грузовика 4 т, при разгоне и торможении он двигался равноускоренно. Чему была равна равнодействующая приложенных к нему сил:
- а) при разгоне;
 б) при прямолинейном равномерном движении;
 в) при торможении?
28. На алюминиевый брусок действует сила тяжести, равная 540 Н. Чему равен объём бруска? Плотность алюминия равна 2700 кг/м³.
29. На тело объёмом 1,5 дм³ действует сила тяжести 60 Н. Чему равна плотность тела?

Высокий уровень

30. Равнодействующая приложенных к первоначально покоящемуся телу массой 500 г сил равна 5 Н. Чему равна скорость этого тела в момент, когда оно прошло путь, равный 80 см?
31. Колёса самолёта касаются посадочной полосы, когда скорость самолёта равна 144 км/ч. Чему равна равнодействующая приложенных к самолёту сил при движении по посадочной полосе, если самолет до остановки проезжает 800 м, а его масса равна 30 т?
32. Поезд массой 2000 т, движущийся со скоростью 54 км/ч, начал тормозить до полной остановки. Равнодействующая приложенных к поезду при торможении сил равна 2 МН. На каком расстоянии *от места остановки* находился поезд через 10 с после начала торможения? через 30 с?
33. Чему равна средняя сила давления пороховых газов на снаряд массой 15 кг в стволе орудия длиной 1,8 м при выстреле, если снаряд вылетает из ствола со скоростью 600 м/с? Примите, что снаряд движется в стволе с постоянным ускорением.

§ 8. Третий закон Ньютона

1. Третий закон Ньютона

Из повседневного опыта мы знаем, что тела *действуют друг на друга*, то есть *взаимодействуют*. Например, когда вы ударяете рукой по мячу, то ощущаете рукой и «удар» мяча по вашей руке.

Как же связаны силы, с которыми тела действуют друг на друга?

Поставим опыт

Если соединить два динамометра и тянуть их в противоположные стороны, то мы увидим, что показания динамометров *равны* (рис. 8.1).

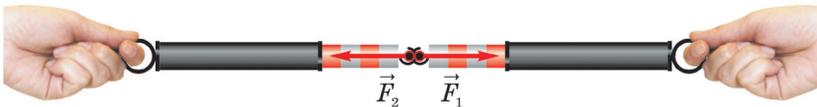


Рис. 8.1



Кроме того, действующие на динамометры силы \vec{F}_1 и \vec{F}_2 направлены *противоположно*.

Этот и другие подобные опыты свидетельствуют, что

тела действуют друг на друга силами, равными по модулю и противоположными по направлению:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2.$$

Это — *третий закон Ньютона*. Он дополняет уже известные вам первый и второй законы Ньютона до полной системы основных законов динамики.

Свойства сил, с которыми тела взаимодействуют друг с другом

Силы, с которыми взаимодействующие тела действуют друг на друга:

- имеют *одинаковую физическую природу*,
- направлены *противоположно вдоль одной прямой*,
- *не могут уравновешивать друг друга*, так как приложены к различным телам.

Рассмотрим эти свойства сил на конкретных примерах.

2. Примеры применения третьего закона Ньютона

Вес и сила нормальной реакции

Лежащая на столе книга давит на стол с силой \vec{P} , которая по своей физической природе является *силой упругости* (рис. 8.2). Это — *вес* книги.

С понятием веса тела вы знакомы из курса физики 7-го класса. Напомним, что

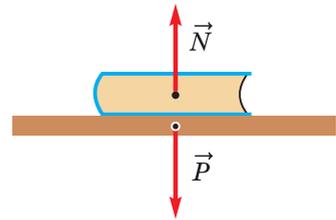


Рис. 8.2

весом называют силу, с которой тело давит на горизонтальную опору или растягивает вертикальный подвес вследствие притяжения к Земле¹⁾.

Вес *покоящегося* тела равен действующей на это тело силе тяжести:

$$\vec{P} = m\vec{g}.$$

Мы докажем это утверждение в разделе «Хочешь узнать больше?».

¹⁾ В некоторых задачах рассматриваются случаи, когда тело одновременно давит на опору и растягивает подвес.

1. Чем *отличается* вес покоящегося тела от силы тяжести?
2. Чему равен ваш вес? Ответ укажите в единицах *силы*, потому что вес является силой.



Стол действует на лежащую на нём книгу силой \vec{N} , направленной вверх¹⁾. По своей физической природе она является силой упругости. Её называют *силой нормальной реакции*, потому что она направлена *перпендикулярно* поверхности опоры (в данном случае — стола), а перпендикуляр называют иногда *нормалью*.

Вес и сила нормальной реакции — пример двух сил, о которых идёт речь в третьем законе Ньютона: это силы *взаимодействия* двух тел — книги и стола. Они направлены противоположно друг другу и равны по модулю.

3. Уравновешивают ли друг друга вес и сила нормальной реакции? Обоснуйте свой ответ.
4. Лошадь тянет телегу.
 - а) Сделайте в тетради схематический рисунок, на котором изобразите силы, с которыми лошадь и телега действуют друг на друга.
 - б) Каковы свойства этих сил?
 - в) Уравновешивают ли они друг друга?



Сила тяжести как частный случай силы всемирного тяготения

На любое тело со стороны Земли действует сила тяжести, которая является частным случаем сил всемирного тяготения. На рисунке 8.3 схематически, без соблюдения масштаба, изображена сила тяжести \vec{F}_1 , действующая на книгу со стороны Земли.

Со стороны книги на Землю действует также сила притяжения \vec{F}_2 , равная по модулю силе тяжести \vec{F}_1 , действующей на книгу со стороны Земли. Силы \vec{F}_1 и \vec{F}_2 направлены противоположно.

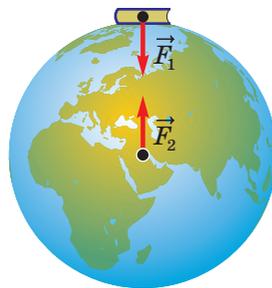


Рис. 8.3

5. Уравновешивают ли друг друга силы \vec{F}_1 и \vec{F}_2 ?



1) Если тело рассматривается как материальная точка, на чертежах *все* действующие на это тело силы изображаются приложенными в *одной* точке (обычно совпадающей с геометрическим центром тела, если оно имеет правильную форму). Это необходимо для того, чтобы на чертежах можно было строить векторные суммы сил, а также находить их проекции на оси координат.

6. На падающий камень действует со стороны Земли такая же по модулю сила, что и сила \vec{F}_2 , действующая на Землю со стороны камня (рис. 8.4; для наглядности масштаб не соблюден). Почему же ускорение падающего камня заметно, а ускорение Земли — нет?

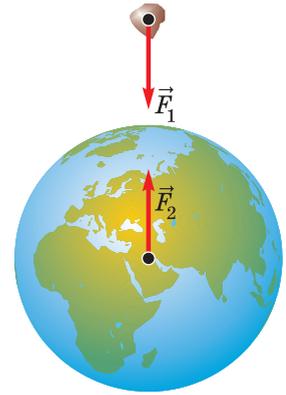


Рис. 8.4

Силы трения

Толкнём лежащий на столе брусок. Он проскользит по столу некоторое расстояние и остановится. Скорость бруска при его движении по столу уменьшалась вследствие действия *силы трения скольжения* \vec{F}_1 (рис. 8.5).

Такая же по модулю, но противоположно направленная сила трения скольжения \vec{F}_2 действует и на стол со стороны бруска.

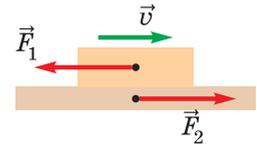


Рис. 8.5

7. Почему действие силы \vec{F}_1 заметно, а действие силы \vec{F}_2 незаметно?
8. Встаньте и сделайте шаг. Какая сила сообщила вам ускорение? Какая сила связана с ней по третьему закону Ньютона?

👍 ХОЧЕШЬ УЗНАТЬ БОЛЬШЕ?

3. Сила натяжения троса

9. Два человека тянут в противоположные стороны трос с силами \vec{F}_1 и \vec{F}_2 (рис. 8.6). Будем считать, что *массой троса можно пренебречь*.



Рис. 8.6

- а) Равны ли силы \vec{F}_1 и \vec{F}_2 по модулю?
 б) Чему равна сила натяжения троса, если $F_1 = 100$ Н?

При решении этой задачи часто делают ошибку, считая, что сила натяжения троса в 2 раза больше каждой из равных по модулю сил, приложенных к его концам. Чтобы эта ошибка стала очевидной, представьте себе, что один из двоих тянущих трос людей привязал конец троса к столбу. Теперь, когда его сопер-

ник будет тянуть трос, другой конец троса будет «тянуть» столб, причём с той же самой силой, с какой прежде тянул человек. И теперь то, что сила натяжения троса равна по модулю силе, с которой конец троса тянет человек, уже не вызывает сомнения.

10. Мама говорит сыну-малышу: «Не тяни щенка за хвост!»
Сын отвечает: «Я не тяну, а только держу: он сам тянет».
Кто прав: мама, сын или они оба?

4. Почему вес покоящегося тела равен силе тяжести?

11. На столе лежит книга массой m .

- Изобразите в тетради силы, с которыми действуют друг на друга книга и стол. Запишите соотношение для этих сил. Обоснуйте его.
- Изобразите в тетради все силы, действующие на книгу. Запишите соотношение для этих сил. Обоснуйте его.
- Запишите соотношение между весом и силой тяжести, которое следует из уже записанных соотношений.

Итак, на этом примере вы убедились, что вес покоящегося тела равен действующей на это тело силе тяжести. Но это вовсе не означает, что вес и сила тяжести — одна и та же сила! Выше мы уже рассматривали, чем они *отличаются* даже для покоящегося тела, когда эти две силы равны по модулю и одинаково направлены (вспомните или найдите соответствующее место в этом параграфе). А если тело движется *с ускорением*, то, как мы сейчас убедимся, *вес тела не равен силе тяжести*.

5. Вес тела, движущегося с ускорением

Ставим и решаем задачи

12. Груз массой m лежит на полу лифта, движущегося с ускорением \vec{a} , направленным вертикально¹⁾.
- Изобразите в тетради силы, с которыми взаимодействуют груз и лифт. Запишите соотношение для этих сил. Обоснуйте это соотношение.
 - Изобразите в тетради силы, действующие на груз. Запишите соотношение для этих сил с учётом второго закона Ньютона.
 - Запишите выражение для веса тела, которое следует из полученных формул.
 - Запишите выражение для модуля веса груза, если ускорение лифта направлено *вверх*.

¹⁾ Для ускорения, направленного вниз, ограничимся случаем, когда оно меньше по модулю ускорения свободного падения.

Итак, если ускорение груза направлено *вверх*, то вес груза *больше* по модулю, чем действующая на груз сила тяжести, и модуль веса выражается формулой $P = m(g + a)$.

Если вес тела больше силы тяжести, говорят, что тело испытывает *перегрузку*. Так, трёхкратной перегрузке соответствует вес, превышающий силу тяжести в 3 раза.

Похожие задачи



13. С каким ускорением движется тело, которое испытывает трёхкратную перегрузку? Как оно направлено?

14. Запишите выражение для модуля веса груза, если ускорение лифта направлено *вниз* и не превышает по модулю ускорения свободного падения.

Итак, если ускорение груза направлено *вниз* и не превышает по модулю ускорения свободного падения, то вес груза *меньше*, чем действующая на груз сила тяжести; модуль веса выражается формулой $P = m(g - a)$.

Если тело движется с постоянной по модулю и направлению скоростью, его вес также равен силе тяжести, потому что ускорение тела при этом равно нулю.

Обратите внимание: направление и модуль *скорости* груза *не имеют значения* для нахождения *веса груза*! Значение имеют только направление и модуль *ускорения* груза. Учтите это при решении следующих задач.

Ставим и решаем задачи



15. Человек массой 60 кг входит в кабину лифта, становится на весы и нажимает кнопку «10 этаж». Ускорение лифта при разгоне и торможении равно 1 м/с^2 .

- Чему был равен вес человека, пока лифт покоился?
- Чему равен вес человека при разгоне лифта?
- Какими будут показания весов при разгоне лифта?
- Какими будут показания весов при движении лифта с постоянной скоростью?
- Какими будут показания весов при торможении лифта у 10-го этажа?

Похожая задача



16. Лифт трогается с места на 10-м этаже и спускается на 1-й этаж. В лифте на напольных весах стоит человек массой 60 кг. Ускорение лифта при разгоне и торможении равно 1 м/с^2 .

- Какими будут показания весов при разгоне лифта?
- Какими будут показания весов при движении лифта с постоянной скоростью?

- в) Какими будут показания весов при торможении лифта у 1-го этажа?

6. Невесомость

17. Тело свободно падает. Давит ли оно при этом на опору? Растягивает ли оно при этом подвес?



18. Чему равен вес свободно падающего тела?

На примере предыдущей задачи мы видим, что вес тела может быть равен нулю, хотя действующая на него сила тяжести не равна нулю.

Состояние, при котором вес тела равен нулю, называют *невесомостью*.

Как мы видели, *тело находится в состоянии невесомости, если на него действует только сила тяжести*.

В длительном состоянии невесомости пребывают космонавты, когда они находятся в космическом корабле с *выключенными двигателями*.

А кратковременное состояние невесомости можно испытать, не улетая в космос: для этого достаточно только подпрыгнуть! С момента, когда ваши ноги оторвутся от земли и до момента, когда они коснутся земли снова, на вас будет действовать только сила тяжести (силой сопротивления воздуха при этом можно пренебречь). Следовательно, во время *всего* полёта ваш вес будет равен нулю.

19. Камень брошен под углом к горизонту. В какие моменты полёта вес камня равен нулю, если можно пренебречь сопротивлением воздуха?



20. Человек лежит на воде. Равен ли его вес нулю?

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- *Третий закон Ньютона*. Тела действуют друг на друга с силами, равными по модулю и противоположными по направлению: $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$.
- Силы, с которыми тела действуют друг на друга, имеют *одинаковую физическую природу*, направлены *противоположно вдоль одной прямой*, не могут уравнивать друг друга, так как приложены к различным телам.



- *Весом* называют силу, с которой тело давит на горизонтальную опору или растягивает вертикальный подвес вследствие притяжения к Земле.
- Вес покоящегося тела или тела, движущегося прямолинейно и равномерно, равен действующей на это тело силе тяжести: $\vec{P} = m\vec{g}$.
- Если ускорение тела направлено *вверх*, то модуль веса тела выражается формулой $P = m(g + a)$. Если ускорение тела направлено *вниз* и меньше по модулю, чем ускорение свободного падения, то модуль веса тела выражается формулой $P = m(g - a)$.
- Состояние, при котором вес тела равен нулю, называют *невесомостью*. Тело находится в состоянии невесомости, если на него действует только сила тяжести.

? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

Базовый уровень

21. Два тела взаимодействуют друг с другом с некоторыми силами. Можно ли говорить о равнодействующей этих сил?
22. От чего отталкивается ракета, разгоняясь в открытом космосе?
23. Мяч ударяется о стену. На какое из этих двух тел действует во время соударения бóльшая сила?
24. Рыбак в лодке отталкивается веслом от причала. В начальный момент лодка покоилась. За 0,5 с лодка приобретает скорость 0,5 м/с. С какой силой весло давит на причал, если масса лодки с рыбаком равна 200 кг? Примите, что лодка движется равноускоренно.
25. С какой силой люстра массой 12 кг действует на подвес? Как называется эта сила? Сделайте пояснительный рисунок.
26. Запишите, чему равны масса и вес трёх различных животных, когда они находятся в покое. Для нахождения нужных сведений воспользуйтесь Интернетом или другими источниками.
27. Перенесите рисунки 8.7, *a*, *b* в тетрадь и изобразите на них силу тяжести, действующую на шар массой 5 кг. Изобрази-

те также вес шара. Выберите масштаб: 10 Н соответствуют одной клетке.

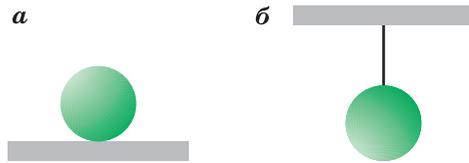


Рис. 8.7

28. Изобразите на чертеже вес лежащего на столе яблока массой 200 г и действующую на яблоко силу нормальной реакции. Удобный масштаб выберите сами.

Повышенный уровень

29. Школьник и его братик тянут верёвку за противоположные концы. Школьник может тянуть с максимальной силой 200 Н, а его братик — с силой, не превышающей 50 Н. С какой максимальной силой они могут натянуть верёвку, не сдвигаясь с места?
30. Спортсмен делает прыжок в высоту.
- Запишите соотношение между весом спортсмена и действующей на него силой тяжести во время отталкивания от земли.
 - Запишите выражения для веса спортсмена и действующей на него силы тяжести, когда он не касается земли.
31. Чему равен вес бензина в цистерне объёмом 60 м³?
32. Чему равен объём подсолнечного масла в бутылке, если вес масла с бутылкой равен 15 Н, а масса бутылки равна 300 г?
33. Стоящий на столе сосуд массой 1,8 кг и объёмом 2 л наполнили доверху некоторой жидкостью. Какая это может быть жидкость, если вес полного сосуда равен 290 Н?
34. Медный шар объёмом 120 см³ покоится на столе. Вес шара равен 8,5 Н. Сплошной шар или полый? Если полый, то чему равен объём полости?
35. Одинаковая ли сила тяжести действует на футбольный мяч в следующие моменты:
- мяч лежит на поле;
 - вратарь отбивает мяч вертикально вверх;
 - мяч катится по футбольному полю;
 - мяч летит вверх;
 - мяч летит вниз?
- Одинаков ли вес мяча в эти моменты? Сделайте пояснительные рисунки.

36. Изобразите схематически на рисунке график зависимости от времени веса пассажира — с момента, когда он вошёл в лифт на верхнем этаже, до момента, когда он вышел из лифта на первом этаже.
37. Человек массой 70 кг стоит на напольных пружинных весах в лифте. Когда лифт начал двигаться, показания весов стали равными 66,5 кг. В каком направлении начал двигаться лифт и с каким ускорением?

Высокий уровень

38. По третьему закону Ньютона сила, с которой тягач тянет прицеп, равна силе, с которой прицеп действует на тягач. Объясните, почему же тогда прицеп движется за тягачом, а не наоборот? Сделайте пояснительный рисунок.
39. На соревнованиях по перетягиванию каната два школьника прикладывают к канату равные по модулю силы. Массой каната можно пренебречь.
- а) Чему равна равнодействующая этих сил?
 - б) Когда оба школьника тянули канат с силами по 300 Н, канат порвался. Можно ли на таком канате поднимать груз массой 40 кг?
40. На уравновешенных весах стоит неполная чашка с водой. Нарушится ли равновесие весов, если в воду погрузить палец, не касаясь им стен и дна чашки?
41. Можно ли утверждать, что рыба в воде находится в состоянии невесомости? Обоснуйте свой ответ. Сделайте пояснительный рисунок.
42. Космонавт во время вертикального старта испытывает четырёхкратную перегрузку. Чему равно и как направлено ускорение ракеты?
43. Парашютист массой 80 кг в затыжном прыжке раскрывает парашют, и его скорость за 2 с уменьшается с 60 м/с до 10 м/с. Чему равен при этом вес парашютиста?
44. Чему равен модуль ускорения колеблющегося на вертикальной пружине груза массой 200 г в нижней точке траектории, если его вес в этот момент равен 3 Н? Как направлено ускорение груза в этот момент?

§ 9. Силы упругости

1. Закон Гука

Деформацией твёрдого тела называют изменение его формы и (или) размеров. При деформации тела изменяются расстояния между его частицами — атомами или молекулами. Вследствие этого возникают силы, стремящиеся *вернуть* тело в недеформированное состояние. Эти силы называют *силами упругости*.

Часто деформации, связанные с силами упругости, незаметны: например, когда вы стоите на полу, вы не замечаете деформацию пола, обусловленную вашим весом. Для изучения деформаций обычно используют *пружины*: они имеют такую форму, что их деформация заметна даже при сравнительно небольшой силе упругости. В дальнейшем мы будем предполагать, что массой пружин можно пренебречь.

Поставим опыт

Будем подвешивать к пружине одинаковые гирьки и измерять удлинение пружины под весом гирек (рис. 9.1).

Мы заметим, что удлинение пружины пропорционально числу гирек. Следовательно, *деформация пружины пропорциональна силе упругости*.

Деформация пружины $x = l - l_0$, где l — длина деформированной пружины, а l_0 — длина недеформированной пружины (рис. 9.2).

Мы убедились на опыте, что

модуль силы упругости пропорционален модулю деформации пружины:

$$F = k|x|.$$

Это утверждение называют *законом Гука* в честь английского физика Р. Гука.

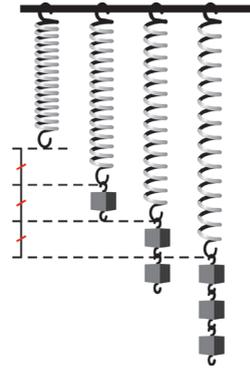


Рис. 9.1

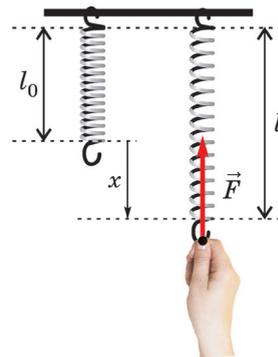


Рис. 9.2

Коэффициент k в законе Гука называют *жёсткостью пружины*. Он зависит от материала пружины, её размеров и формы.

Отметим, что закон Гука справедлив только для не очень больших деформаций. Деформации, для которых справедлив закон Гука, называют *упругими*.

1. Докажите, что *единицей жёсткости* в СИ является Н/м.

Закон Гука можно записать в проекциях так:

$$F_x = -kx.$$

Знак «минус» означает здесь, что действующая со стороны пружины сила упругости направлена *противоположно* её деформации.

При решении задач чаще используют соотношение, связывающее *модуль* силы упругости с *модулем* деформации.

2. К пружине жёсткостью 100 Н/м подвешен груз массой 100 г. Чему равно удлинение пружины, если груз покоится?
3. Когда к недеформированной пружине подвешивают груз массой 1 кг, её длина увеличивается на 2 см. Чему равна жёсткость пружины?
4. Груз какой массы надо подвесить к пружине жёсткостью 300 Н/м, чтобы удлинение пружины стало равным 3 см?
5. К пружине длиной 8 см и жёсткостью 200 Н/м подвешивают груз массой 600 г. Чему равна длина пружины, когда груз находится в равновесии?
6. На рисунке 9.3 приведены графики зависимости модуля силы упругости от модуля деформации для трёх пружин.
- У какой пружины наименьшая жёсткость?
 - Во сколько раз жёсткость первой пружины больше, чем жёсткость второй?
 - Чему равна жёсткость третьей пружины?

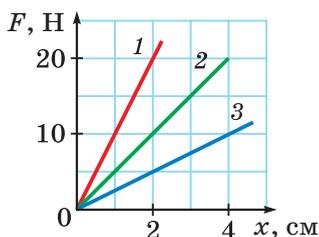


Рис. 9.3

ХОЧЕШЬ УЗНАТЬ БОЛЬШЕ?

2. Удлинение и длина пружины

Рассмотрим ситуацию, в которой речь идёт не об удлинении, а о *длине* пружины.

Ставим и решаем задачи

7. Когда к пружине подвешен покоящийся груз массой 100 г, её длина равна 10 см, а когда подвешен груз массой 200 г, её длина равна 12 см.
 - а) Обозначьте длину недеформированной пружины l_0 , жёсткость пружины k , модули веса первого и второго грузов P_1 и P_2 . Запишите систему уравнений, связывающих эти величины с величинами, данными в описании ситуации.
 - б) Выразите длину недеформированной пружины через величины, данные в описании ситуации.
 - в) Выразите жёсткость пружины через величины, данные в описании ситуации.
 - г) Чему равны длина недеформированной пружины и её жёсткость?

Похожая задача

8. На рисунке 9.4 изображены два положения брусков, соединённых пружиной. Массы брусков 1 кг и 2 кг, длина пружины при первом положении брусков равна 14 см, а при втором положении — 10 см.

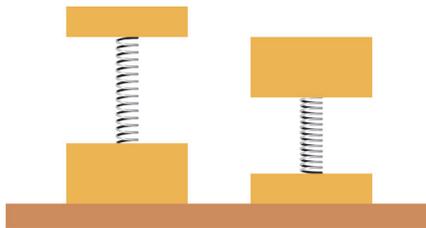


Рис. 9.4

- а) Чему равна длина недеформированной пружины?
- б) Чему равна жёсткость пружины?

3. Последовательное и параллельное соединение пружин

Ставим и решаем задачи



9. На рисунке 9.5 изображены *последовательно* соединённые одинаковые пружины жёсткостью 100 Н/м каждая. К пружинам подвешен груз массой 100 г .

- Чему равно удлинение каждой пружины?
- Чему равно удлинение двух последовательно соединённых пружин?
- Чему равна жёсткость системы данных последовательно соединённых пружин?

Обратите внимание на полученный результат: жёсткость системы двух *последовательно* соединённых пружин *меньше* жёсткости любой из этих пружин.

Похожая задача



10. Пружину жёсткостью 80 Н/м разрезали пополам. Чему равна жёсткость каждой из получившихся пружин?



Рис. 9.5

Ставим и решаем задачи



11. На рисунке 9.6 изображены *параллельно* соединённые одинаковые пружины жёсткостью 50 Н/м каждая. К пружинам подвешен груз массой 200 г .

- Чему равна сила упругости для каждой пружины?
- Чему равно удлинение каждой пружины?
- Чему равно удлинение системы двух параллельно соединённых пружин?
- Чему равна жёсткость системы данных параллельно соединённых пружин?

Обратите внимание: жёсткость системы двух *параллельно* соединённых пружин *больше* жёсткости любой из этих пружин.

Похожая задача



12. Пружину жёсткостью $k = 50 \text{ Н/м}$ разрезали на две равные части и соединили их параллельно. Чему равна жёсткость этой системы пружин?



Рис. 9.6

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Деформацией твёрдого тела называют изменение его формы и (или) размеров.
- Деформация пружины $x = l - l_0$, где l — длина деформированной пружины, а l_0 — длина недеформированной пружины.
- Закон Гука: модуль силы упругости пропорционален модулю деформации пружины $F = k|x|$.
- Единицей жёсткости k в СИ является Н/м.
- Жёсткость системы двух последовательно соединённых пружин меньше жёсткости любой из этих пружин.
- Жёсткость системы двух параллельно соединённых пружин больше жёсткости любой из этих пружин.



? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

Базовый уровень

- Объясните, почему расстояния между соседними штрихами на шкале динамометра одинаковы.
- Запишите формулу закона Гука и выразите с помощью этой формулы жёсткость пружины через модуль силы упругости и модуль деформации пружины.
- Какую силу надо приложить, чтобы растянуть пружину жёсткостью 80 Н/м на 5 см?
- Какую силу надо приложить, чтобы сжать пружину жёсткостью 120 Н/м на 2 см?
- Чему равна жёсткость пружины, если под действием силы 10 Н она удлинилась на 0,5 см?
- Чему равно удлинение пружины под действием силы 10 Н, если жёсткость пружины равна 500 Н/м?
- На рисунке 9.7 приведены графики зависимости модуля силы упругости от модуля деформации для двух пружин. Чему равна жёсткость каждой пружины?

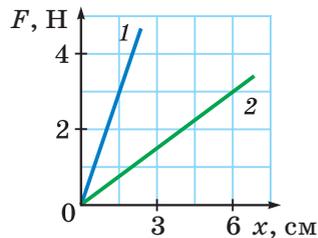
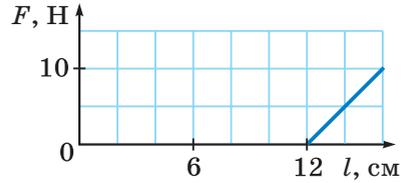


Рис. 9.7

Повышенный уровень

20. Чтобы увеличить длину пружины на 12 см, надо приложить силу, равную 4 Н. Чему равно удлинение пружины, когда сила упругости равна 10 Н?
21. На рисунке 9.8 приведён график зависимости модуля силы упругости от длины пружины. Чему равна жёсткость пружины?
22. К двум висящим рядом пружинам подвешены одинаковые грузы. При этом удлинение первой пружины на 2 см больше, чем удлинение второй. Чему равно удлинение каждой пружины, если жёсткость одной из них в 3 раза больше жёсткости другой?
23. Под действием силы, равной 10 Н, пружина 1 удлиняется на 2 см, а пружина 2 — на 3 см. Чему будет равна жёсткость системы этих двух последовательно соединённых пружин?
24. Когда к пружине подвесили гирьку массой 100 г, длина пружины стала равной 15 см. Когда к этой гирьке подвесили ещё две такие же, длина пружины стала равной 19 см. Чему равна длина недеформированной пружины?

**Рис. 9.8****Высокий уровень**

25. При растяжении пружины силой 10 Н длина пружины равна 14 см, а при растяжении этой же пружины силой 14 Н длина пружины стала равной 16 см. Чему будет равна длина пружины, если её растягивать силой 22 Н?
26. Пружина длиной 88 мм под действием силы 120 Н удлиняется до 120 мм. Какой станет длина этой пружины, когда к ней подвешат груз массой 9 кг?
27. Подвешенный к пружине жёсткостью 500 Н/м груз массой 1 кг поднимают вверх. При этом удлинение пружины равно 3 см. Увеличивается или уменьшается скорость груза? Чему равно ускорение груза?
28. Подвешенный к вертикальной пружине жёсткостью 20 Н/м груз массой 100 г совершает вертикальные колебания. При этом удлинение пружины изменяется от 3 см до 7 см. Чему равен вес груза в верхней и нижней точках траектории?
29. Пружиной какой жёсткости можно заменить три последовательно соединённые пружины жёсткостью 300 Н/м каждая?

30. Пружину разрезали на пять равных частей и соединили их параллельно. Жёсткость образовавшейся системы пружин равна 2,5 кН/м. Чему была равна жёсткость неразрезанной пружины?

§ 10. Силы тяготения

1. Закон всемирного тяготения

О силах тяготения вы уже знаете из курса физики 7-го класса. Их называют *силами всемирного тяготения*, потому что они действуют между *любыми* телами — в том числе между планетами и звёздами.

Первым, кто догадался о том, что притяжение нас и всех окружающих предметов к Земле имеет ту же физическую природу, что и притяжение Луны к Земле, а также Земли и остальных планет к Солнцу, был Исаак Ньютон.

Существует знаменитая легенда, что эта мысль пришла ему в голову, когда он сидел в саду, глядя, может быть, на Луну и размышляя о проблемах мироздания. Из размышлений его вывело падение яблока, — оно навело молодого Ньютона на мысль, что яблоко падает на Землю, а Луна не улетает от Земли по одной и той же причине: вследствие *притяжения* к Земле, что является частным случаем *всемирного тяготения*.

Чтобы разработать эту идею и изучить её следствия, Ньютону пришлось создать новый раздел математики — дифференциальное и интегральное исчисление. Используя имеющиеся в его время данные астрономических наблюдений, Ньютон сформулировал *закон всемирного тяготения*:

две материальные точки массами m_1 и m_2 , находящиеся на расстоянии R друг от друга, притягиваются с силами, прямо пропорциональными произведению их масс и обратно пропорциональными квадрату расстояния между ними. Модуль каждой силы равен

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}.$$

Из закона всемирного тяготения следует, что масса тела является также мерой его *гравитационных*¹⁾ свойств: способности *притягивать* другие тела и *испытывать притяжение* со стороны других тел.

1) От латинского *гравитас* — тяжесть.

Коэффициент пропорциональности G в законе всемирного тяготения называют *гравитационной постоянной*. Измерения показали, что

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2.$$

Далее мы расскажем о том, как была измерена гравитационная постоянная.



1. С какими силами притягиваются два шара массой по 1 кг каждый, находящиеся на расстоянии 1 м друг от друга?
2. С какой силой Солнце притягивает Землю? А Земля Солнце?
3. Какое тело человек массой 60 кг притягивает с силой 600 Н?

Результаты этих задач объясняют, почему силы всемирного тяготения заметны только тогда, когда хотя бы одно из двух взаимодействующих тел имеет *огромную* массу, то есть является звездой или планетой.

Ньютон доказал, что формулу закона всемирного тяготения, справедливую для сил притяжения двух материальных точек, можно применять также для

— *однородных шаров*¹⁾ (тогда R — расстояние между *центрами* шаров; рис. 10.1, а);

— *однородного шара и материальной точки* (тогда R — расстояние от *центра* шара до материальной точки; рис. 10.1, б).



4. Как изменятся силы притяжения двух шаров, если расстояние между центрами шаров увеличить в три раза?
5. Два одинаковых шара A и B притягиваются с силами, равными по модулю F . С какими силами будут притягиваться шары C и D , масса каждого из которых в 2 раза больше массы шара A , если расстояние между центрами шаров C и D в 2 раза больше, чем между центрами шаров A и B ?

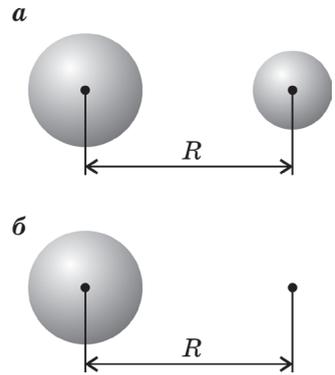


Рис. 10.1

2. Движение планет вокруг Солнца

Ставим и решаем задачи



6. Обозначим M_C массу Солнца, m — массу планеты, R — радиус её орбиты, v — модуль скорости планеты.

¹⁾ Более точно: для тел, плотность которых имеет сферическую симметрию (важными частными случаями таких тел являются Солнце и планеты). В дальнейшем мы будем предполагать, что все рассматриваемые шары однородны.

- Выразите модуль ускорения a планеты через радиус её орбиты и её скорость.
- Выразите модуль F силы притяжения планеты Солнцем через массы Солнца и планеты и гравитационную постоянную.
- Выразите скорость планеты через гравитационную постоянную, массу Солнца и радиус орбиты планеты.

Ответ этой задачи показывает: *чем больше радиус орбиты, тем меньше скорость планеты*. Обратите внимание: скорость движения планеты не зависит от её массы.

Похожая задача

- Используя полученную при решении предыдущей задачи формулу, вычислите скорость движения Земли при её движении вокруг Солнца. Правильность расчёта проверьте, используя Интернет.

Получив выражение для скорости планеты, можно найти выражение и для периода её обращения.

- Выразите период T обращения планеты через гравитационную постоянную, массу Солнца и радиус орбиты планеты.
- Вычислите период обращения Юпитера вокруг Солнца. Правильность расчёта проверьте, используя Интернет.

3. Сила тяжести и закон всемирного тяготения

Силу тяжести, действующую на тело, находящееся вблизи поверхности Земли, можно выразить через гравитационную постоянную, массы тела и Земли, а также радиус Земли (рис. 10.2).

- Выразите модуль силы тяжести через массу тела m , массу Земли $M_{\text{Зем}}$ и радиус Земли $R_{\text{Зем}}$ (см. рис. 10.2).

С другой стороны, мы знаем, как выражается модуль силы тяжести через массу тела и ускорение свободного падения:

$$F_{\text{т}} = mg.$$

Сравнивая эту формулу с формулой для силы тяжести, полученной при решении предыдущей задачи, получаем:

$$g = G \frac{M_{\text{Зем}}}{R_{\text{Зем}}^2}.$$

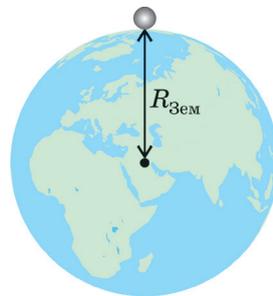


Рис. 10.2

При подъёме над поверхностью Земли значение ускорения свободного падения уменьшается.



11. Докажите, что ускорение свободного падения на высоте h над поверхностью Земли выражается формулой

$$g(h) = G \frac{M_{\text{Зем}}}{(R_{\text{Зем}} + h)^2}.$$

12. На каком расстоянии от поверхности Земли ускорение свободного падения уменьшается в 4 раза по сравнению с ускорением свободного падения на поверхности Земли?

4. Первая космическая скорость

В одной из своих книг Ньютон предложил такой мысленный эксперимент: из огромной пушки, установленной на очень высокой горе, стреляют в горизонтальном направлении (рис. 10.3).

При этом можно подобрать скорость снаряда так, чтобы он двигался вокруг Земли по *окружности* — такой снаряд станет *искусственным спутником* Земли.

Первый искусственный спутник Земли был запущен в СССР в 1957 году с помощью ракеты. Далее мы расскажем об этом подробнее.

Скорость спутника на орбите, радиус которой можно приблизительно считать равным радиусу Земли, называют *первой космической скоростью*¹⁾ и обозначают v_1 .

Центростремительное ускорение спутнику сообщает сила тяжести, поэтому второй закон Ньютона для спутника массой m имеет вид

$$\frac{mv_1^2}{R_{\text{Зем}}} = mg.$$

Отсюда

$$v_1 = \sqrt{R_{\text{Зем}}g}.$$

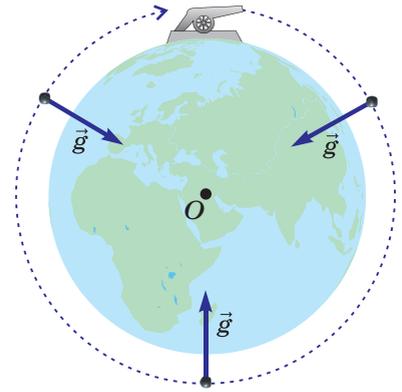


Рис. 10.3

1) С такой скоростью движутся искусственные спутники Земли на орбитах, высота которых над Землёй во много раз меньше радиуса Земли.

Подставляя численные данные, получаем, что первая космическая скорость равна примерно 8 км/с.

13. Оцените первую космическую скорость для Луны. Примите, что ускорение свободного падения вблизи поверхности Луны в 6 раз меньше, чем вблизи поверхности Земли.

Второй космической скоростью называют скорость, которую надо сообщить телу, чтобы оно покинуло окрестности Земли. Она равна примерно 11,2 км/с.

👍 ХОЧЕШЬ УЗНАТЬ БОЛЬШЕ?

5. «Взвешивание Земли»

Первым измерил значение гравитационной постоянной английский учёный Г. Кавендиш.

На рисунке 10.4 изображена схема опыта Кавендиша.

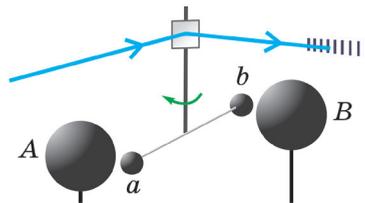


Рис. 10.4

На концах лёгкого горизонтального стержня укреплены небольшие металлические шары a и b известной массы. Сам стержень подвешен на тонкой нити. По углу закручивания этой нити учёный определял силу, с которой шары a и b притягивались к массивным металлическим шарам A и B . Чтобы увеличить чувствительность сконструированного им прибора, Кавендиш прикрепил к нити зеркальце. По смещению отражённого этим зеркалом луча можно было измерить даже малый угол поворота нити.

Опыт Кавендиша образно назвали «взвешиванием Земли», потому что по найденному им значению гравитационной постоянной и уже известным к тому времени ускорению свободного падения и радиусу Земли можно было определить массу Земли.

14. Докажите, что масса Земли выражается через гравитационную постоянную, ускорение свободного падения и радиус Земли формулой

$$M_{\text{Зем}} = \frac{gR_{\text{Зем}}^2}{G}.$$



ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- *Закон всемирного тяготения:* две материальные точки массами m_1 и m_2 , находящиеся на расстоянии R друг от друга, притягиваются с силами, модуль каждой из которых выражается формулой $F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$.
- *Гравитационная постоянная* $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$.
- Ускорение свободного падения на высоте h над поверхностью Земли $g(h) = G \frac{M_{\text{Зем}}}{(R_{\text{Зем}} + h)^2}$.
- Скорость спутника на круговой орбите, радиус которой можно приближённо считать равным радиусу Земли, называют *первой космической скоростью*: $v_1 = \sqrt{R_{\text{Зем}} g} = 8 \text{ км/с}$.

? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

Базовый уровень

- Кратко опишите примеры двух-трёх наблюдаемых на Земле явлений, которые объясняются действием силы тяготения.
- Изобразите на рисунке схематически, как двигалась бы Земля, если бы сила притяжения Солнца внезапно исчезла.
- Вычислите силу, с которой притягиваются два автомобиля, находящиеся на одной улице. Необходимые для расчёта величины подберите сами.
- Масса Луны примерно в 81 раз меньше массы Земли. Космический корабль находится в некоторый момент на отрезке, соединяющем центры Земли и Луны, и при этом он притягивает Землю и Луну с одинаковыми по модулю силами. К центру какого из этих двух небесных тел корабль ближе? Во сколько раз?
- С какими силами притягиваются соприкасающиеся шары массой 200 г каждый, если радиус каждого шара равен 2 см?
- Расстояние между центрами двух одинаковых шаров равно 10 м. Чему равна масса одного шара, если шары притягиваются с силами, равными $2,4 \cdot 10^{-9} \text{ Н}$?

21. На каком расстоянии от орбитальной станции находится космический корабль, если станция и корабль притягиваются с силами, равными по модулю 2 мкН ? Масса корабля равна 8 т , масса орбитальной станции — 20 т .
22. Изменяются ли (и если изменяются, то как: увеличиваются или уменьшаются) масса тела, действующая на тело сила тяжести и ускорение свободного падения при удалении от Земли?
23. Искусственный спутник Земли массой 1 т находится на высоте одного земного радиуса над её поверхностью. С какой силой спутник притягивает Землю?
24. Сделайте в тетради схематический рисунок спутника, движущегося вокруг Земли по круговой орбите, и покажите на нём, как направлены скорость и ускорение спутника в трёх точках траектории.

Повышенный уровень

25. Объясните, почему воздушные шары поднимаются вверх, несмотря на их притяжение к Земле.
26. Станет ли искусственным спутником Земли ракета, которой сообщили скорость 8 км/с , направленную вертикально вверх?
27. На каком расстоянии от центра Луны на отрезке, соединяющем центры Земли и Луны, находится космический корабль, если Земля и Луна притягивают его с равными по модулю силами?
28. На каком расстоянии от *поверхности* Земли сила притяжения тела к Земле уменьшается в 2 раза по сравнению с силой тяжести у поверхности Земли?

Высокий уровень

29. Вычислите скорость движения по орбите одной из планет Солнечной системы (выберите планету сами). Расстояние от этой планеты до Солнца узнайте с помощью Интернета. С его же помощью вы сможете проверить правильность своего ответа.
30. На какой высоте над поверхностью Земли ускорение свободного падения равно ускорению свободного падения на поверхности Луны? Для расчёта примите, что масса Луны в 81 раз меньше массы Земли.

31. Вычислите ускорение свободного падения вблизи поверхности одной из планет Солнечной системы, кроме Земли (планету выберите сами). Данные о массе и размере этой планеты возьмите из Интернета. С его помощью вы сможете проверить также правильность своего расчёта.
32. Вычислите первую космическую скорость для одной из планет Солнечной системы, кроме Земли (планету выберите сами). Данные о массе и размере этой планеты возьмите из Интернета. С его помощью вы сможете проверить также правильность своего расчёта.
33. К чему Луна притягивается сильнее — к Земле или к Солнцу? Во сколько раз? Для расчёта примите расстояние от Луны до Солнца равным расстоянию от Земли до Солнца, массу Солнца примите равной $2 \cdot 10^{30}$ кг.
34. Немецкий учёный Кеплер на основе наблюдений датского астронома Браге установил закономерность, которую назвали третьим законом Кеплера. В упрощённом виде третий закон Кеплера состоит в том, что для всех планет Солнечной системы отношение квадрата периода обращения к кубу радиуса орбиты *одно и то же*. Докажите, что эта закономерность следует из закона всемирного тяготения. Справедлив ли этот закон для планет, обращающихся по круговым орбитам вокруг другой звезды?
35. Почему запуск космических кораблей обычно осуществляют с запада на восток? Сделайте пояснительный рисунок.
36. Почему космодромы стараются расположить как можно ближе к экватору Земли? Сделайте пояснительный рисунок.
37. Для изучения поверхности Луны планируют запустить искусственный спутник Луны, движущийся по круговой орбите на высоте 200 км над поверхностью. Чему будут равны скорость и период обращения такого спутника?

§ 11. Силы трения

1. Сила трения скольжения

Напомним основные свойства сил трения, с которыми вы познакомились в курсе физики 7-го класса.

Силы трения скольжения действуют на каждое из двух соприкасающихся тел, когда они движутся друг относительно друга (рис. 11.1).

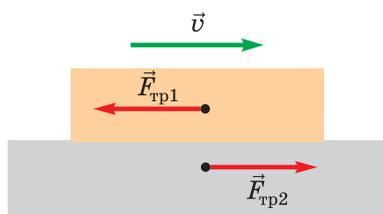


Рис. 11.1

Сила трения скольжения, действующая на данное тело, направлена противоположно скорости этого тела относительно тела, по которому оно скользит.

Главная причина сил трения скольжения — зацепление и разрушение неровностей на поверхностях тел. Поэтому силы трения между шероховатыми поверхностями больше, чем между гладкими. Но для очень гладких поверхностей (например, отшлифованных) сила трения скольжения может быть достаточно большой вследствие действия сил межмолекулярного притяжения.

Поставим опыт

Измерим силу трения скольжения между бруском и столом. Для этого будем тянуть брусок с помощью динамометра по столу с *постоянной* скоростью (рис. 11.2, а), прикладывая к нему *горизонтальную* силу $\vec{F}_{\text{упр}}$.

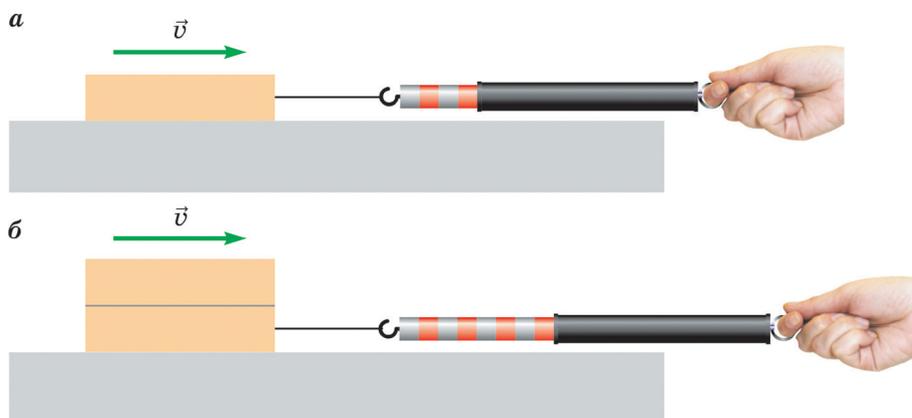


Рис. 11.2

Поскольку брусок движется прямолинейно равномерно, действующую на брусок силу трения скольжения уравнивает равная ей по модулю сила, приложенная со стороны динамометра.

Естественно предположить, что сила трения скольжения увеличивается при увеличении силы нормальной реакции. Поэтому повторим опыт, положив на брусок другой такой же (рис. 11.2, б). При этом сила трения скольжения *увеличится в 2 раза*. И сила нормальной реакции в этом опыте по сравнению с предыдущим опытом *тоже увеличивается в 2 раза*. Этот и другие подобные опыты показывают, что *сила трения скольжения пропорциональна силе нормальной реакции*.

Поэтому

сила трения скольжения выражается формулой

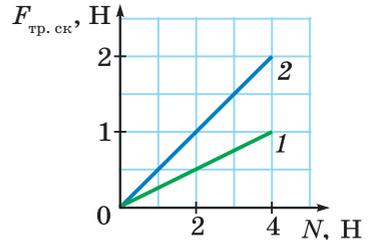
$$F_{\text{тр}} = \mu N.$$

Численный коэффициент пропорциональности μ называют *коэффициентом трения*. Значения коэффициента трения для некоторых поверхностей приведены в справочных данных на форзаце учебника.



1. Можно ли соотношение между силой трения скольжения и силой нормальной реакции записывать в векторном виде?

2. На рисунке 11.3 приведены графики зависимости силы трения скольжения от силы нормальной реакции для двух брусков, скользящих по столу.



а) Для какого бруска коэффициент трения между бруском и столом больше?

б) Чему равны коэффициенты трения между каждым из брусков и столом?

Рис. 11.3

Как показывает опыт, *сила трения скольжения практически не зависит от скорости движения соприкасающихся тел и от площади их соприкосновения*.

Ставим и решаем задачи



3. По столу скользит брусок массой 400 г. Начальная скорость бруска 1 м/с. Коэффициент трения между бруском и столом 0,2.

а) Изобразите на чертеже все действующие на брусок силы. Какие из них уравновешивают друг друга?

б) Чему равна действующая на брусок сила нормальной реакции?

- в) Чему равна действующая на брусок сила трения?
- г) Чему равна равнодействующая всех приложенных к бруску сил?
- д) Чему равно ускорение бруска и как оно направлено?
- е) Какой путь проедет брусок до остановки?

Похожая задача

4. Лежащему на столе бруску сообщили скорость 2 м/с, после чего он скользил по столу до остановки 80 см.
 - а) С каким по модулю ускорением двигался брусок?
 - б) Чему равен коэффициент трения между бруском и столом?



2. Сила трения покоя

Попробуйте сдвинуть стул, прикладывая к нему небольшую горизонтально направленную силу, — стул будет оставаться в покое.

Какая же сила в точности уравнивает приложенную вами силу? Это — сила трения *покоя*, действующая на стул со стороны пола.

Силы трения покоя возникают при попытке сдвинуть одно из соприкасающихся тел относительно другого, если тела остаются при этом в *покое* друг относительно друга. Силы трения покоя препятствуют *относительному* движению соприкасающихся тел.

Причины возникновения сил трения покоя такие же, как и сил трения скольжения.

Если вы будете постепенно увеличивать приложенную к стулу силу, то он всё-таки сдвинется с места. Это означает, что модуль силы трения покоя $F_{\text{тр.пок}}$ не превышает некоторого предельного значения, которое называют *максимальной силой трения покоя*. При решении школьных задач её принимают равной силе трения скольжения¹⁾.

Таким образом, сила трения покоя удовлетворяет *двум* соотношениям:

а) она равна по модулю силе $F_{\text{сдв}}$, направленной вдоль соприкасающихся поверхностей и стремящейся сдвинуть тело:

$$F_{\text{тр.пок}} = F_{\text{сдв}};$$

б) она не превышает максимальную силу трения покоя, которую мы принимаем равной силе трения скольжения:

$$F_{\text{тр.пок}} \leq \mu N.$$

1) В действительности максимальная сила трения покоя несколько превышает силу трения скольжения, но этим при решении задач в школьном курсе физики пренебрегают.

Из этих двух соотношений следует, что *тело сдвинется с места только при условии, что сдвигающая сила больше максимальной силы трения покоя*. Если мы принимаем максимальную силу трения покоя равной силе трения скольжения, то приходим к выводу: тело сдвинется с места, если

$$F_{\text{сдв}} > \mu N.$$

Если же $F_{\text{сдв}} \leq \mu N$, то тело останется в покое.



5. На столе лежит брусок массой 400 г. Коэффициент трения между бруском и столом равен 0,25.
- Чему равна максимальная сила трения покоя между бруском и столом?
 - Сдвинется ли брусок, если приложить к нему горизонтальную силу, равную 0,5 Н? 1 Н? 2 Н?
6. К лежащему на столе бруску массой 200 г прикладывают горизонтальную силу, равную по модулю F . Коэффициент трения между бруском и столом равен 0,2. Чему равна действующая на брусок со стороны стола сила трения, если:
- $F = 0,2$ Н;
 - $F = 0,5$ Н?

Сила трения покоя препятствует только *относительному* движению соприкасающихся тел. Но при этом она может *приводить в движение* одно из этих тел относительно других тел.

Например, когда человек разгоняется, он *отталкивается* от дороги силой трения *покоя*, толкая её *назад*. Согласно третьему закону Ньютона дорога при этом толкает человека *вперёд*.

Ведущие колёса автомобиля (приводимые во вращение двигателем) также отталкивают дорогу *назад* силой трения *покоя*. А дорога при этом согласно третьему закону Ньютона толкает автомобиль *вперёд*.

Иногда в задаче требуется определить максимально возможное ускорение автомобиля при заданном коэффициенте трения между шинами и дорогой. Обычно при этом указывается, что *все* колёса автомобиля — ведущие. В таком случае максимально возможная сила трения покоя, действующая на автомобиль со стороны дороги, равна произведению силы нормальной реакции на коэффициент трения. При движении по горизонтальной дороге сила нормальной реакции равна по модулю силе тяжести.



7. Чему равно максимально возможное ускорение автомобиля, если коэффициент трения между колёсами и дорогой равен 0,5? Все колёса автомобиля — ведущие.

3. Другие виды сил трения

Имя изобретателя колеса не сохранилось в истории, хотя это было великое изобретение: всякий знает, что тащить груз волоком труднее, чем катить тележку с тем же грузом.

На катящееся колесо тоже действует сила трения — её называют *силой трения качения*. Она обычно намного меньше силы трения скольжения.

Сила трения качения обусловлена, в частности, деформацией колеса и поверхности, по которой оно катится. Поэтому чем твёрже поверхность и колесо, тем меньше сила трения качения.

8. Почему стальной шарик долго катится по стеклу?
9. Почему железные дороги делают «железными» — точнее, стальными?
10. С какой целью используют шариковые и роликовые подшипники?

На тело, движущееся в жидкости или газе (в том числе в воздухе), со стороны жидкости или газа действует *сила сопротивления*. В отличие от силы трения скольжения, сила сопротивления, действующая со стороны жидкости или газа, *увеличивается с увеличением скорости тела*.

Сила трения покоя для тела, находящегося в жидкости или газе, отсутствует.

11. Почему даже ребёнку под силу сдвинуть плавающую на воде лодку?

Сила сопротивления движению тела в жидкости или газе значительно уменьшается, если придать телу «обтекаемую» форму. Это используют при проектировании самолётов и автомобилей, особенно гоночных (рис. 11.4).



Рис. 11.4

 ХОЧЕШЬ УЗНАТЬ БОЛЬШЕ?

4. Движение по горизонтали под действием силы, направленной под углом к горизонту

Ставим и решаем задачи



12. Брусок массой $m = 400$ г *равномерно* перемещают по столу, прикладывая силу \vec{T} , направленную под углом $\alpha = 30^\circ$ к горизонту (рис. 11.5). Коэффициент трения между бруском и столом $\mu = 0,4$.

- Перенесите рисунок 11.6 в тетрадь и изобразите на нём все силы, действующие на брусок.
- Запишите выражения для проекций всех приложенных к бруску сил.
- Чему равна равнодействующая приложенных к бруску сил?
- Запишите второй закон Ньютона для бруска в проекциях на оси x , y .
- Как выражается сила трения скольжения через силу нормальной реакции и коэффициент трения?
- Используя полученную систему трёх уравнений, выразите T , N , $F_{\text{тр}}$ через m , α , μ .
- Чему равна по модулю сила T ?

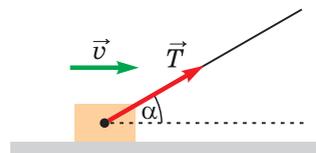


Рис. 11.5

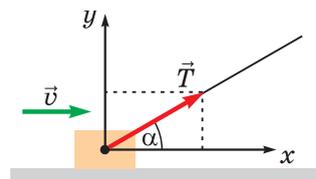


Рис. 11.6

Похожая задача



13. По столу движется брусок массой 250 г под действием силы, равной по модулю 1 Н и приложенной вверх под углом 30° к горизонту. Коэффициент трения между бруском и столом 0,3. Чему равно ускорение бруска?



ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Силы трения скольжения действуют на каждое из двух соприкасающихся тел, когда они движутся друг относительно друга. Силы трения скольжения направлены вдоль поверхности соприкосновения тел.

- Сила трения скольжения пропорциональна силе нормальной реакции: $F_{\text{тр}} = \mu N$. Коэффициент пропорциональности μ называют *коэффициентом трения*.
- Сила трения скольжения практически не зависит от скорости движения соприкасающихся тел и от площади их соприкосновения.
- *Силы трения покоя* возникают при попытке сдвинуть одно из соприкасающихся тел относительно другого, если тела остаются в *покое* друг относительно друга. Эти силы препятствуют относительному движению соприкасающихся тел.
- Модуль силы трения покоя $F_{\text{тр.пок}}$ не превышает предельного значения, которое называют *максимальной силой трения покоя*. При решении школьных задач максимальную силу трения покоя принимают равной силе трения скольжения.
- На тело, движущееся в жидкости или газе, со стороны жидкости или газа действует *сила сопротивления*. Она увеличивается с увеличением скорости тела. Сила трения покоя для тела, находящегося в жидкости или газе, отсутствует.

? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

Базовый уровень

14. Запишите формулу для силы трения скольжения. Напишите, что означают буквы, входящие в эту формулу.
15. Запишите равенство и неравенство, справедливые для силы трения покоя.
16. Чтобы равномерно перемещать брусок по столу, к нему надо прикладывать горизонтальную силу, равную 3 Н . Какую силу надо прикладывать для равномерного перемещения этого бруска, если положить на него такой же брусок?
17. На столе лежит брусок массой 400 г . Какую горизонтально направленную силу надо приложить к бруску, чтобы сдвинуть его с места, если коэффициент трения между бруском и столом равен $0,5$?

18. Груз массой 90 кг равномерно опускается на парашюте. Чему равна суммарная сила сопротивления воздуха, действующая на парашют и груз? Сделайте в тетради схематический чертёж и изобразите на нём силы, действующие на груз.

Повышенный уровень

19. Деревянный брусок движется с постоянной скоростью по столу под действием некоторой горизонтально направленной силы. С каким ускорением будет двигаться этот брусок, если силу увеличить в 2 раза? Коэффициент трения между бруском и столом равен 0,2.
20. Когда к бруску массой 0,5 кг прикладывают горизонтально направленную силу, равную 3 Н, брусок движется по столу с ускорением 2 м/с^2 . Чему равен коэффициент трения между бруском и столом?
21. К лежащему на столе бруску массой 200 г прикладывают горизонтально направленную силу, равную по модулю F . Коэффициент трения между бруском и столом равен 0,3. Постройте график зависимости модуля ускорения тела от F .
22. Попробуйте объяснить, почему тормозной путь на мокром асфальте значительно больше, чем на сухом.
23. Кирпич массой 4 кг лежит на столе. Коэффициент трения между кирпичом и столом равен 0,4. Чему будет равна действующая на кирпич сила трения, если к нему приложить горизонтально направленную силу, равную 5 Н? 10 Н? 20 Н?
24. Когда с помощью горизонтальной пружины по столу равномерно перемещают брусок массой 600 г, удлинение пружины равно 5 мм. Коэффициент трения между бруском и столом равен 0,3. Чему равна жёсткость пружины?

Высокий уровень

25. Когда к находящемуся на столе бруску прикладывают горизонтально направленную силу, равную 3 Н, брусок движется с ускорением 2 м/с^2 , а когда эту силу увеличивают на 1 Н, ускорение бруска увеличивается в 2 раза. Чему равен коэффициент трения между бруском и столом?
26. Коэффициент трения между шинами автомобиля и мокрым асфальтом равен 0,2. С каким максимально возможным ускорением может двигаться этот автомобиль по такой горизонтальной дороге? Все колёса автомобиля — ведущие.

27. На столе лежит лист бумаги, а на листе лежит брусок. Если потянуть лист с небольшим ускорением, то брусок будет перемещаться вместе с листом как одно тело, а если резко дернуть лист, то его можно вытащить из-под бруска. Объясните, почему так происходит.
28. С какой скоростью можно ехать в густом тумане, когда видимость равна 20 м? Коэффициент трения между шинами и мокрым асфальтом примите равным 0,25.
29. На рисунке 11.7 приведён график зависимости силы трения скольжения, действующей на сани, от массы саней с грузом. Чему равен коэффициент трения между полозьями саней и снегом, если сани движутся по горизонтальной дороге?

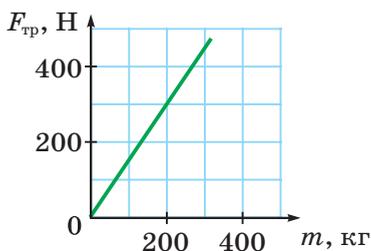


Рис. 11.7

30. Коэффициент трения между шинами автомобиля и дорогой равен 0,5. Какой максимальной скорости сможет достичь автомобиль за 3 с, разгоняясь с места, если все колёса автомобиля ведущие?
31. Чему равны время торможения и тормозной путь автомобиля, если его скорость перед началом торможения равна 25 м/с, а коэффициент трения между шинами и дорогой равен 0,5? При торможении на все колёса автомобиля действует со стороны дороги максимальная сила трения покоя.
32. С какой целью мотогогонщик на старте поднимает свой мотоцикл «на дыбы»?
33. До какой максимальной скорости может разогнаться с места мотоциклист за 10 с, если коэффициент трения между шинами и дорогой равен 0,6? Примите для расчёта, что колёса мотоцикла давят на дорогу с равными силами.

§ 12. Тело на наклонной плоскости¹⁾

1. Тело на гладкой наклонной плоскости

Когда говорят, что тело находится на *гладкой* поверхности, имеют в виду, что *трением между телом и поверхностью можно пренебречь*.



Поставим опыт

Если тело в начальный момент покоится на гладкой наклонной плоскости, оно начнёт соскальзывать с неё, причём скорость тела будет *увеличиваться* (рис. 12.1, а).

Тело может двигаться и вверх по наклонной плоскости — если сообщить ему начальный толчок (рис. 12.1, б). В таком случае скорость тела будет *уменьшаться*.

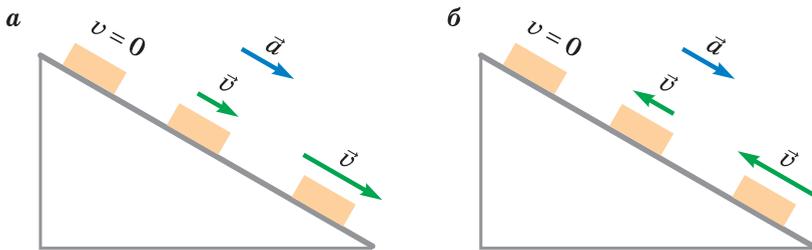


Рис. 12.1

Наш опыт показывает, что ускорение тела, находящегося на гладкой наклонной плоскости, направлено вдоль наклонной плоскости *вниз*. Согласно второму закону Ньютона это означает, что равнодействующая приложенных к телу сил направлена вдоль наклонной плоскости *вниз*.

Найдём выражение для ускорения тела, находящегося на гладкой наклонной плоскости.

Ставим и решаем задачи



1. На рисунке 12.2 изображены силы, действующие на брусок массой m , находящийся на гладкой наклонной плоскости с углом наклона α .

¹⁾ Материал этого параграфа изучается по усмотрению учителя.

- а) Назовите действующие на брусок силы.
 б) Запишите второй закон Ньютона для бруска в векторной форме.

Векторное уравнение можно превратить в систему «обычных» уравнений, если записать его в проекциях на оси координат. Для этого найдём сначала проекции действующих на тело сил и проекции ускорения тела.

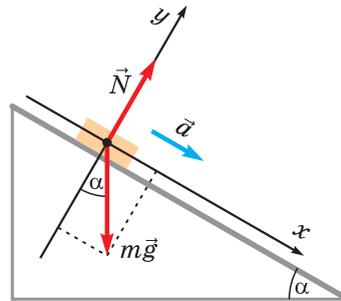


Рис. 12.2

- в) Запишите выражения для проекций сил, действующих на брусок, и ускорения бруска на показанные на рисунке 12.2 оси координат.
 г) Запишите второй закон Ньютона для бруска в проекциях на оси координат в виде системы уравнений.
 д) Найдите выражение для модуля ускорения бруска.
 е) Почему ускорение бруска не зависит от его массы?
 ж) При каком угле наклона плоскости модуль ускорения бруска в 2 раза меньше модуля ускорения свободного падения?
 з) Найдите выражение для модуля действующей на брусок силы нормальной реакции. Оно нам понадобится далее, когда надо будет учитывать силу трения.
 и) При каком угле наклона плоскости модуль действующей на брусок силы нормальной реакции в 2 раза меньше силы тяжести?

Похожие задачи

2. Брусок кладут на гладкую наклонную плоскость длиной 40 см. Угол наклона плоскости 30° .
- С каким ускорением будет двигаться брусок?
 - Сколько времени будет скользить брусок?
 - Чему равна скорость бруска в конце спуска?
3. Брусок скользит вверх по гладкой наклонной плоскости после толчка и возвращается в начальную точку. Начальная скорость бруска v_0 , угол наклона плоскости α .
- Запишите выражение для модуля ускорения бруска при его движении вверх.
 - Запишите выражение для времени t_1 движения бруска по наклонной плоскости *вверх*.



- в) Запишите выражение для пути, пройденного бруском при его движении по наклонной плоскости *вверх*.

2. Условие покоя тела на шероховатой наклонной плоскости

Если тело покоится на наклонной плоскости, это означает, что равнодействующая приложенных к нему сил равна нулю.

Ставим и решаем задачи



4. На рисунке 12.3 изображены силы, действующие на брусок массой m , покоящийся на наклонной плоскости с углом наклона α .

- Назовите действующие на брусок силы.
- Почему сила трения покоя направлена вдоль наклонной плоскости *вверх*?
- Запишите второй закон Ньютона для покоящегося бруска в векторной форме.
- Запишите выражения для проекций всех сил, действующих на брусок.
- Запишите второй закон Ньютона для бруска в проекциях на оси координат в виде системы уравнений.
- Получите из этой системы уравнений выражения для силы трения покоя и силы нормальной реакции.

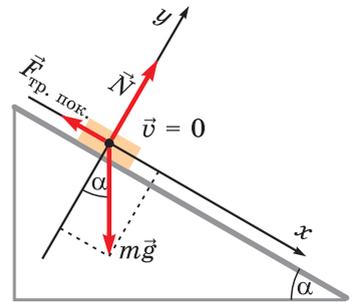


Рис. 12.3

В полученное вами выражение для силы трения *покоя* не входит коэффициент трения. Но это не означает, что условие покоя тела на наклонной плоскости не зависит от значения коэффициента трения! Вспомним, что *сила трения покоя не превышает максимальной силы трения покоя*, которую в школьном курсе физики принимают равной силе трения скольжения. Поэтому должно выполняться неравенство

$$F_{\text{тр.пок}} \leq \mu N.$$

- ж) Подставьте в это неравенство полученные вами выражения для силы трения покоя и силы нормальной реакции: вы получите неравенство, которое связывает угол наклона плоскости α с коэффициентом трения μ .

Итак, тело может находиться в покое на наклонной плоскости, если для угла наклона плоскости α и коэффициента трения μ выполняется неравенство

$$\operatorname{tg} \alpha \leq \mu.$$

Заметим, что это неравенство можно использовать для *измерения коэффициента трения* на опыте.

Похожая задача

5. На доске длиной 40 см лежит брусок. Когда один из концов доски подняли чуть больше, чем на 20 см, брусок начал соскальзывать с доски. Чему равен коэффициент трения между доской и бруском?



3. Движение тела по наклонной плоскости вниз с учётом трения

Найдём выражение для ускорения тела, скользящего по наклонной плоскости вниз.

Ставим и решаем задачи

6. На рисунке 12.4 изображены силы, действующие на брусок массой m , скользящий вниз по наклонной плоскости с углом наклона α .

- Назовите действующие на брусок силы.
- Почему сила трения скольжения направлена вдоль наклонной плоскости *вверх*?
- Запишите второй закон Ньютона для скользящего бруска в векторной форме.
- Запишите второй закон Ньютона для бруска в проекциях на оси координат в виде системы уравнений.
- Выразите силу трения скольжения через коэффициент трения и силу нормальной реакции.
- Подставьте выражение для силы трения скольжения в систему уравнений, выражающих второй закон Ньютона. Вы получите систему двух уравнений. Считая в них неизвестными ускорение бруска a и силу нормальной реакции N , выразите ускорение бруска через угол наклона плоскости и коэффициент трения.

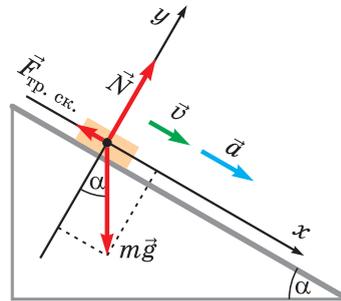


Рис. 12.4



Похожая задача



7. На доске длиной 40 см лежит брусок. Коэффициент трения между доской и бруском равен 0,4. С каким ускорением будет скользить брусок по доске, если один из её концов поднять на 20 см?

? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

Повышенный уровень

8. На рисунке 12.5 изображён брусок, скользящий по наклонной плоскости вниз из состояния покоя. Какая из показанных на рисунке сил является равнодействующей всех приложенных к бруску сил?
9. На рисунке 12.6 изображён брусок массой m , скользящий с ускорением \vec{a} по наклонной плоскости вниз из состояния покоя. Чему равен модуль равнодействующей всех приложенных к бруску сил?
10. Брусок кладут на гладкую наклонную плоскость и отпускают без толчка. Угол наклона плоскости 30° .
- С каким ускорением будет двигаться брусок?
 - Чему равна длина наклонной плоскости, если брусок скользил вдоль всей плоскости в течение 0,5 с?
 - Чему равна скорость бруска в конце спуска?

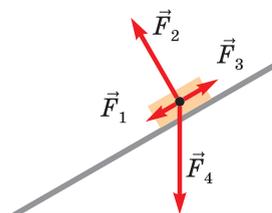


Рис. 12.5

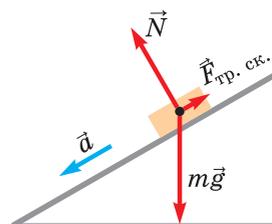


Рис. 12.6

Высокий уровень

11. Брусок начинает скользить по доске длиной 1 м, когда один конец доски приподнимают на 50 см по сравнению с другим. Какую скорость надо сообщить бруску, чтобы он смог проскользить вдоль всей этой доски, расположенной горизонтально?
12. Мальчик массой 40 кг скатывается на санках с ледяной горки, угол наклона которой равен 30° . Длина горки равна 18 м. Чему равна сила трения между санками и горкой, если по этой горке из состояния покоя мальчик скатывается за 3 с?

13. Бусинку нанизали на гладкую спицу, наклонённую под углом 30° к горизонту, и толкнули вверх вдоль спицы. Начальная скорость бусинки 2 м/с. Какой путь пройдёт бусинка до возвращения в начальное положение?

§ 13. Движение системы тел¹⁾

1. Тела движутся в одном направлении

Системой тел называют несколько тел, взаимодействующих друг с другом.

Ставим и решаем задачи

1. По гладкому столу тянут два бруска массами m_1 и m_2 , связанные лёгкой нерастяжимой нитью, прикладывая горизонтально направленную силу \vec{F} (рис. 13.1).

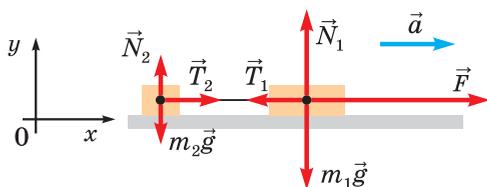


Рис. 13.1

- Используя рисунок, назовите силы, действующие на каждый брусок.
- Какие силы уравновешивают друг друга?
- Почему силы \vec{T}_1 и \vec{T}_2 равны по модулю?
- Равны ли ускорения брусков? Обоснуйте свой ответ.
- Запишите уравнение второго закона Ньютона для первого бруска в проекциях на показанные оси координат. Модуль силы натяжения нити обозначьте T , а модуль ускорения брусков обозначьте a .
- Запишите уравнение второго закона Ньютона для второго бруска в проекциях на показанные оси координат.
- Используя полученные системы уравнений, найдите выражения для модуля ускорения брусков a и модуля силы натяжения нити T .

¹⁾ Материал этого параграфа изучается по усмотрению учителя.

Разобранный пример показывает, что при рассмотрении движения системы тел надо:

- изобразить на чертеже все силы, действующие на *каждое* тело системы;
- записать уравнения второго закона Ньютона для *каждого* тела в проекциях на выбранные оси координат; учесть при этом третий закон Ньютона;
- учесть уточняющие слова в условии: например, что связывающая тела нить является лёгкой и нерастяжимой, а стол — гладким.

В результате получится *система уравнений*. С её помощью можно вывести *соотношения между величинами, входящими в описание ситуации*.

Похожая задача



2. Два бруска, связанные лёгкой нерастяжимой нитью, скользят с ускорением 1 м/с^2 по гладкому столу под действием горизонтальной силы 3 Н , приложенной к первому бруску. Чему равны массы брусков, если сила натяжения нити равна 1 Н ?

2. Тела движутся в разных направлениях

Ставим и решаем задачи



3. Брусок массой m_6 находится на *гладком* столе (рис. 13.2). Он связан лёгкой нерастяжимой нитью, переброшенной через блок, с грузом массой m_r . Трением в блоке можно пренебречь.

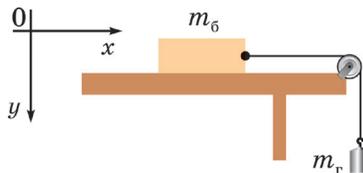


Рис. 13.2

- Перенесите рисунок в тетрадь и изобразите на нём силы, действующие на брусок и на груз. Назовите эти силы.
- Равны ли по модулю ускорения тел? Равны ли по модулю силы натяжения нити, действующие на брусок и на груз? Обоснуйте свои ответы.

- в) Запишите второй закон Ньютона для бруска и груза в проекциях на показанные на рисунке оси координат (обозначьте a модуль ускорения тел, T — модуль силы натяжения нити).
- г) Используя полученные уравнения, выразите модуль ускорения тел и силу натяжения нити через $m_б$ и $m_г$.

Похожая задача

4. В описанной выше ситуации $m_б = 2$ кг, $m_г = 3$ кг.

- а) Чему равен вес груза?
- б) Равен ли вес груза действующей на него силе тяжести? Обоснуйте свой ответ.

Рассмотрим теперь другую ситуацию, также часто встречающуюся в задачах о движении системы тел.

Ставим и решаем задачи

5. Два груза массами m и M подвешены на концах лёгкой нерастяжимой нити, переброшенной через блок (рис. 13.3). $M > m$. Трением в блоке и его массой можно пренебречь.

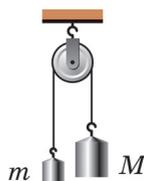


Рис. 13.3

- а) Перенесите рисунок в тетрадь и изобразите на нём силы, действующие на каждый груз. Назовите эти силы.
- б) Как направлены ускорения грузов? Изобразите их на чертеже.
- в) Равны ли по модулю ускорения грузов? Равны ли по модулю силы натяжения нити, действующие на грузы? Обоснуйте свои ответы.
- г) Запишите второй закон Ньютона для грузов в проекциях на ось x , направленную вертикально вниз (обозначьте a модуль ускорения грузов, T — модуль силы натяжения нити).
- д) Используя полученные уравнения, выразите модуль ускорения грузов и силу натяжения нити через M и m .
- е) Одинаков ли вес грузов? Обоснуйте свой ответ.

Похожая задача

6. Два груза массами $M = 900$ г каждый подвешены на концах лёгкой нерастяжимой нити, переброшенной через блок. Когда на один из грузов положили перегрузок массой m , грузы стали двигаться с ускорением, модуль которого $a = 1$ м/с².

- а) Чему равна масса перегрузка m ?
- б) Чему равен вес перегрузка P ?

? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

Повышенный уровень

7. Бруски массами m_1 и m_2 , связанные лёгкой нерастяжимой нитью, равномерно поднимают вертикально вверх, прикладывая к бруску массой m_1 силу, равную по модулю F .
 - а) Сделайте в тетради схематический рисунок и укажите все силы, действующие на каждое тело системы.
 - б) Чему равно ускорение брусков?
8. По гладкому столу тянут два бруска массами 2 кг и 3 кг, связанных лёгкой нерастяжимой нитью, прикладывая к бруску массой 2 кг горизонтально направленную силу 20 Н.
 - а) Чему равен модуль ускорения брусков?
 - б) Чему равна сила натяжения нити?
9. В условиях предыдущей задачи найдите, чему будут равны модуль ускорения брусков и сила натяжения нити, если силу 20 Н приложить к бруску массой 3 кг.
10. Бруски массами 100 г и 200 г, связанные нерастяжимой нитью, поднимают вертикально вверх, прикладывая к бруску массой 100 г силу 5 Н.
 - а) Чему равен модуль ускорения брусков?
 - б) Чему равен модуль силы натяжения нити?
11. По столу тянут два бруска массами 2 кг и 3 кг, связанные лёгкой нерастяжимой нитью, прикладывая к бруску массой 2 кг горизонтально направленную силу 20 Н. Коэффициент трения между брусками и столом равен 0,2.
 - а) Чему равен модуль ускорения брусков?
 - б) Чему равна сила натяжения нити?

Высокий уровень

12. Через лёгкий блок перекинута лёгкая нерастяжимая нить с грузами массой 0,1 кг и 0,15 кг на её концах. Чему равны модуль ускорения грузов и сила натяжения нити?
13. Брусок, соединённый с гирькой нерастяжимой нитью, переброшенной через неподвижный блок (рис. 13.4), движется по гладкому горизонтальному столу. Чему равно ускорение гирьки и бруска, если масса бруска в 3 раза больше массы гирьки?

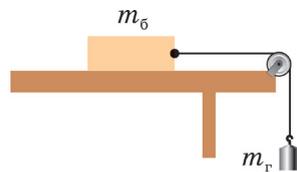


Рис. 13.4

14. К бруску массой $m = 1$ кг с помощью нитей привязаны две гириками массами m и $2m$ соответственно (рис. 13.5). Чему равно ускорение такой системы тел и силы натяжения обеих нитей, если коэффициент трения между бруском и столом равен $0,2$?

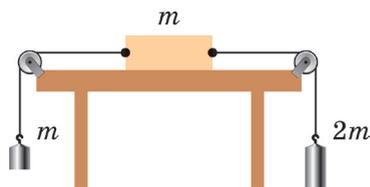


Рис. 13.5

ГЛАВНОЕ В ГЛАВЕ II

- *Динамикой* называют раздел механики, в котором изучают взаимодействие тел.
- *Закон инерции*: если на тело не действуют другие тела или действия других тел скомпенсированы, то тело движется равномерно и прямолинейно или покоится.
- *Явление инерции* проявляется в том, что тело сохраняет свою скорость.
- Системы отсчёта, в которых выполняется закон инерции, называют *инерциальными*.
- *Первый закон Ньютона*: существуют системы отсчёта (называемые инерциальными), относительно которых тела сохраняют свою скорость неизменной, если на них не действуют другие тела или действия других тел скомпенсированы.
- Сила — *векторная величина*. *Единицей силы* в СИ является *ньютон* (Н): $1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \cdot 1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.
- Векторную сумму приложенных к телу сил называют *равнодействующей* этих сил.
- *Масса* является мерой инертности тела, а также мерой гравитационного взаимодействия тел. *Единицей массы* в СИ является *килограмм* (кг).
- *Второй закон Ньютона*: равнодействующая всех приложенных к телу сил равна произведению массы тела на его ускорение: $\vec{F} = m\vec{a}$.
- Второй закон Ньютона справедлив только *в инерциальных системах отсчёта*.

- Равнодействующая \vec{F} приложенных к телу сил и ускорение тела \vec{a} *направлены одинаково* (сонаправлены), модуль и направление скорости тела при этом не имеют значения.
- Под действием только силы тяжести все тела движутся с одинаковым ускорением, равным *ускорению свободного падения* \vec{g} .
- *Сила тяжести* пропорциональна массе тела: $\vec{F}_T = m\vec{g}$.
- *Третий закон Ньютона*: телá действуют друг на друга силами, равными по модулю и противоположными по направлению: $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$.
- Силы, с которыми тела действуют друг на друга, имеют *одинаковую физическую природу*, направлены *противоположно вдоль одной прямой, не могут уравновешивать друг друга*, так как приложены к различным телам.
- *Весом* называют силу, с которой тело давит на горизонтальную опору или растягивает вертикальный подвес вследствие притяжения к Земле.
- Вес покоящегося тела равен действующей на это тело силе тяжести: $\vec{P} = m\vec{g}$.
- Состояние, при котором вес тела равен нулю, называют *невесомостью*. Тело находится в состоянии невесомости, если на него действует только сила тяжести.
- Если ускорение тела направлено *вверх*, то модуль веса тела выражается формулой $P = m(g + a)$. Если ускорение тела направлено *вниз* и меньше по модулю, чем ускорение свободного падения, то модуль веса тела выражается формулой $P = m(g - a)$.
- *Деформацией* твёрдого тела называют изменение его формы и (или) размеров.
- *Закон Гука*: модуль силы упругости пропорционален модулю деформации пружины: $F = k|x|$.
- *Единицей жёсткости* k в СИ является Н/м.

- Жёсткость двух *последовательно* соединённых пружин *меньше* жёсткости любой из этих пружин. Жёсткость системы двух *параллельно* соединённых пружин *больше* жёсткости любой из этих пружин.
- *Закон всемирного тяготения*: две материальные точки массами m_1 и m_2 , находящиеся на расстоянии R друг от друга, притягиваются с силами, модуль каждой из которых выражается формулой $F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$, где G — гравитационная постоянная.
- Ускорение свободного падения на высоте h над поверхностью Земли $g(h) = G \frac{M_{\text{Зем}}}{(R_{\text{Зем}} + h)^2}$.
- Скорость спутника на орбите, радиус которой можно приближённо считать равным радиусу Земли, называют *первой космической скоростью*: $v_1 = \sqrt{R_{\text{Зем}} g} = 8 \text{ км/с}$.
- *Силы трения скольжения* действуют на каждое из двух соприкасающихся тел, когда они движутся друг относительно друга. Силы трения скольжения направлены вдоль поверхности соприкосновения тел.
- Сила трения скольжения пропорциональна силе нормальной реакции: $F_{\text{тр}} = \mu N$. Коэффициент пропорциональности μ называют *коэффициентом трения*.
- Сила трения скольжения практически не зависит от скорости движения соприкасающихся тел и от площади их соприкосновения.
- *Силы трения покоя* возникают при попытке сдвинуть одно из соприкасающихся тел относительно другого, когда тела остаются в *покое* друг относительно друга. Эти силы препятствуют относительному движению тел.
- Модуль силы трения покоя $F_{\text{тр.пок}}$ не превышает некоторого предельного значения, которое называют *максимальной силой трения покоя*. При решении школьных задач по физике максимальную силу трения покоя принимают равной силе трения скольжения.
- При движении тела в жидкости или газе на него действует *сила сопротивления*, которая увеличивается при увеличении скорости тела.