

# 1 Физические величины

Слово "физика" переводится с древнегреческого языка как природа. Поэтому физика – это наука о природе, она изучает свойства и законы движения окружающих нас тел.

Основная задача физики заключается в изучении и объяснении физических явлений. Кипение воды, гром и молния, притяжение магнита к железу – все это примеры физических явлений.

*А какие еще физические явления Вы знаете? Какие явления кажутся Вам наиболее удивительными?*

Для описания физических явлений используют физические величины. К ним относятся время, длина, скорость, масса, температура и многие другие. Все физические величины имеют размерность. Размерность отражает смысл физической величины. Например, все расстояния и длины имеют одинаковую размерность – размерность длины. Также существуют величины с размерностью времени, массы, скорости и другими. Сравнить между собой можно только физические величины с одинаковой размерностью. Величины с различной размерностью имеют принципиально разный физический смысл, поэтому, например, бессмысленно спрашивать, что больше: 3 километра или 5 часов?

Мы умеем оперировать числами, поэтому было бы удобно выразить физическую величину в виде числа. Но как узнать числовое значение физической величины? Разобраться в этом может помочь мультфильм "38 попугаев".

В начале мультфильма Мартышка говорит Удаву: "Какой ты ... длинный". В ответ Удав спрашивает: "А какой длинный?" Так у героев мультфильма появляется задача определить рост Удава. Но как это сделать? Чтобы узнать значение физической величины нужно ее измерить. Поэтому Удав говорит: "Я хочу измерить свой рост".

Измерение – это всегда сравнение неизвестной величины с известной величиной, которая называется эталоном. Сравнить можно только величины с одинаковой размерностью. Поэтому в качестве эталона можно использовать только величины, размерность которых совпадает с размерностью измеряемой величины. Тогда отношение измеряемой величины и эталона будет искомым числом.

Но физическая величина – это не просто число. Числовое значение физической величины зависит от выбранного эталона, то есть от той величины, значение которой принимается равным единице. Поэтому физическая величина определяется числовым значением и соответствующей единицей измерения.

Вернемся к мультфильму. Мартышка предложила Удаву сложиться пополам, а затем еще раз пополам. Что же получилось? Мартышка измерила рост Удава в удавах.

$$1 \text{ удав} = 2 \cdot \left( \frac{1}{2} \text{ удава} \right) = 4 \cdot \left( \frac{1}{4} \text{ удава} \right)$$

Это выражение является тождеством и не дает никакой новой информации о росте Удава.

Тогда Попугай предложил: "Я могу измерить твой рост в попугаях". В этом случае единицей измерения является один шаг попугая. Попугай измерил рост удава и получил 38 попугаев и еще одно попугайское крылышко. В результате измерения Попугай сравнил неизвестную величину – рост Удава с эталоном. Очевидно, что такое измерение дает новую информацию о росте Удава.

Теперь обратим внимание на то, что у всех без исключения измерений есть очень важная особенность. Когда попугай измерял Удава, он получил "38 попугаев и еще одно попугайское крылышко, но крылышко можно не считать". Процесс измерения всегда происходит с некоторой ошибкой, поэтому невозможно узнать точное значение физической величины. Более подробно мы поговорим о причинах появления ошибок измерения в одной из следующих глав.

"А чем еще можно мерить рост? Всем!" Действительно, одну и ту же физическую величину можно сравнивать с различными эталонами. При этом значение неизвестной величины будет выражено в различных единицах измерения.

Герои мультфильма измерили рост удава в попугаях, мартышках и слонёнках.

1 удав = 38 попугаев

1 удав = 5 мартышек

1 удав = 2 слонёнка

В конце мультфильма Удав говорит: "А в попугаях-то я гораздо длиннее!" Прав ли Удав? Что он хотел этим сказать и как правильно сформулировать мысль Удава?

Очевидно, что Удав не стал длиннее от того, что его рост измерили в попугаях. Просто один попугай - самая маленькая единица измерения. Поэтому числовое значение роста Удава, выраженное в попугаях, самое большое.

В мультфильме герои измеряли рост Удава с помощью различных эталонов. Также люди раньше использовали множество различных эталонов для измерения одних и тех же физических величин. Например, длину измеряли в дюймах, милях, аршинах, сажнях и т. д. Часто различные единицы измерения даже имели одинаковые название. Например, британская миля равна приблизительно 1609 метров, древнерусская миля равна 7468 метров, морская миля равна 1809 метров, французская миля равна 4448 метров. Это создавало огромные проблемы, поэтому люди договорились использовать одни и те же единицы измерения. В большинстве стран мира, в том числе в России, используют единицы системы СИ.

Система СИ (Система Интернациональная, французское название *Le Système International d'Unités*, дословно переводится как международная система единиц) была разработана во Франции в конце XVIII века. Система СИ включает семь основных единиц измерения, но мы будем использовать только три из них: единицу длины - метр, единицу массы - килограмм и единицу времени - секунду.

Изначально метр был определен как одна десятимиллионная часть расстояния от северного полюса до экватора по меридиану, проходящему через Париж. Килограмм - как масса 1 дм<sup>3</sup> чистой воды при температуре 4 °С и нормальном атмосферном давлении. Секунда - как одна 86400 часть Земных суток.

С помощью основных единиц измерения можно определить единицы измерения остальных физических величин. В качестве примера рассмотрим, как можно определить единицу измерения скорости. Скорость - это физическая величина, которая показывает, насколько изменяется расстояние за единицу времени. Поэтому размерность скорости - это расстояние, деленное на время. Отсюда следует, что единица измерения скорости - это отношение единицы измерения расстояния к единице измерения времени. Таким образом, единица измерения скорости - это метр, деленный на секунду, или метр в секунду (обозначается как м/с).

Использование единиц системы СИ значительно упрощает жизнь, но эти величины не всегда удобны. Например, расстояние от Санкт-Петербурга до Москвы приблизительно равно 634000 метров. Чтобы не писать много нулей в конце числа удобно использовать кратные единицы, которые отличаются в 10 в целой степени раз и получаются добавлением приставки к названию физической величины. Например, расстояния между городами удобно измерять в километрах. Поэтому говорят, что расстояние от Санкт-Петербурга до Москвы равно 634 километров.

Как мы уже говорили, одну и ту же физическую величину можно измерить с помощью разных единиц измерения. Например, длину можно измерить в метрах, сантиметрах, дюймах, футах, и.т.д. Поэтому нужно уметь переводить величины из одних единиц измерения в другие.

Разберем два важных примера на перевод единиц измерения.

Переведем 12 км/ч в единицы системы СИ.

$$12 \text{ км/ч} = \frac{12 \text{ км}}{1 \text{ час}} = \frac{12000 \text{ м}}{60 \text{ мин}} = \frac{12000 \text{ м}}{3600 \text{ с}}$$

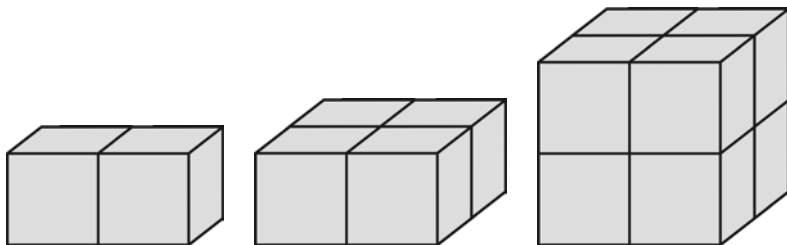
Если разделить на калькуляторе, получится 3,3333333 м/с. На первый взгляд этот ответ кажется абсолютно верным, но на самом деле допущена серьезная физическая ошибка. Дело в том, что значение физической величины можно узнать только с помощью измерения, поэтому любое числовое значение физической величины может быть известно только приближенно. По условию задачи значение скорости равно 12 км/ч, то есть известны две значащие цифры. Можно понимать, что скорость измерена с точностью до наименьшего знака, поэтому в ответе так же следует оставить только два знака.

Поэтому правильно говорить, что  $12 \text{ км/ч} \approx 3,3 \text{ м/с}$ .

Второй важный пример - переведем  $1 \text{ м}^3$  в  $\text{см}^3$ .

Для начала разберем более простой пример. Посчитаем, сколько маленьких кубиков размером 1 см потребуется, чтобы собрать из них большой куб размером 2 см.

Из двух кубиков мы сможем сложить фигуру с размерами 2 см × 1 см × 1 см. (кстати, такая фигура называется прямоугольным параллелепипедом). Из двух таких параллелепипедов, то есть из четырех кубиков, мы сможем сложить параллелепипед с размерами 2 см × 2 см × 1 см. Наконец нам потребуется 2 таких параллелепипеда, или 8 кубиков, чтобы сложить куб размером 2 см.



Всего потребовалось  $2 \times 2 \times 2 = 2^3$  маленьких кубиков, чтобы сложить из них куб вдвое большего размера.

1 метр равен 100 сантиметрам. Поэтому потребуется  $100^3$  маленьких кубиков размером 1 см, чтобы сложить куб размером 1 метр. Поэтому  $1 \text{ м}^3 = 100^3 \text{ см}^3 = 10^6 \text{ см}^3$ .

То есть в одном кубическом метре миллион кубических сантиметров!

Перед тем, как перейти к решению задач, нужно договориться об обозначениях физических величин. Для многих физических величин существуют общепринятые обозначения. Их нужно знать, потому что часто они не оговариваются отдельно. Координату принято обозначать латинскими буквами  $x$ ,  $y$  и  $z$ . Пройденный телом путь обычно обозначают большими буквами  $S$  или  $L$ . Скорость принято обозначать буквой  $v$  (от латинского *velocitas* или английского *velocity*), время обозначают буквой  $t$  (от латинского *tempus* или английского *time*).

## 2 Движение

### 2.1 Равномерное движение

Движение – одно из наиболее распространенных физических явлений. В повседневной жизни мы постоянно наблюдаем за движением окружающих нас предметов и сами постоянно движемся.

Что же такое движение? Движением называют изменение положения тела в пространстве.

А как можно определить положение тела в пространстве? Представьте, что Вы гуляете по лесу. Со всех сторон Вас окружают деревья, и на первый взгляд лес вокруг кажется одинаковым. Поэтому в лесу очень легко заблудиться. Определить свое положение в лесу помогают ориентиры, например дороги, водоемы или возвышенности.

Аналогично невозможно определить положение тела в пустом пространстве. Положение тела можно определить только относительно другого тела (ориентира), которое называется точкой отсчета и считается неподвижным.

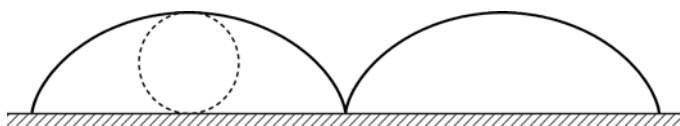
Поэтому движение в физике понимают как изменение положения тела относительно другого тела, выбранного в качестве точки отсчета.

Движение всегда относительно. Неправильно говорить, что тело движется, не указывая относительно какого тела происходит движение. Например, пассажир поезда движется относительно Земли, но покоится относительно поезда. С другой стороны, пассажиру кажется, что деревья за окном поезда движутся, хотя они покоятся относительно Земли. Наконец Земля сама движется вокруг Солнца с огромной скоростью около 30 км/с. Но мы совершенно не замечаем этого движения потому, что мы сами и все окружающие нас предметы движемся вместе с Землей.

Строго говоря, одной только точки отсчета недостаточно чтобы описать движение тела. Нужны приборы для измерения расстояния от тела до точки отсчета и времени, в течение которого происходит движение. Точка отсчета и приборы для измерения расстояния и времени образуют систему отсчета.

Во многих случаях движение удобно рассматривать в системе отсчета Земли. Всегда найдется неподвижный относительно Земли объект, который удобно использовать как точку отсчета. Поэтому часто просто говорят о движении, подразумевая движение относительно Земли.

Линию, по которой движется тело, называют **траекторией** движения тела. Например, траекторию самолета можно увидеть по белому следу, который самолет оставляет на небе. Зимой Вы можете увидеть свою траекторию по следам на снегу. Интересно, что в разных системах отсчета траектория одного и того же движения может выглядеть совершенно по-разному. Например, в системе отсчета автомобиля точка на ободке колеса движется по окружности. В системе отсчета Земли эта точка движется по линии, которая называется циклоидой и показана на рисунке.



Расстояние между начальной и конечной точками траектории называется **перемещением** тела. Важно понимать, что перемещение имеет направление, оно направлено из начальной точки траектории в конечную. Длина траектории называется **пройденным путем**, в отличие от перемещения, пройденный путь не имеет направления.



Оцените, какой путь Вы проходите за день? Чему равно Ваше перемещение за день?

Очень важный частный случай движения - это **равномерное движение**.

**Равномерным** называется такое движение, при котором тело за любые равные промежутки времени проходит одинаковые расстояния.

Можно заметить, что при равномерном движении, величина, равная отношению пути  $L$ , пройденного за некоторый промежуток времени  $t$ , к величине этого промежутка времени сохраняется. Эта величина называется скоростью движения,  $v = \frac{L}{t}$ . Скорость показывает насколько быстро изменяется расстояние от тела до точки отсчета.

В системе СИ единицей измерения скорости является метр в секунду. Поскольку многие расстояния удобно измерять в километрах, скорость часто измеряют в километрах в час.

Иногда удобно определять среднюю скорость на некотором участке пути. Средняя скорость равна отношению перемещения тела  $S$  ко времени  $t$ , в течение которого тело прошло этот участок пути

$$v_{\text{cp}} = \frac{S}{t}.$$

## 2.2 Сложение скоростей

Дальше мы еще больше упростим себе жизнь и будем рассматривать только равномерное прямолинейное движение. Для наглядности можно представить, что движение происходит по длинной прямой дороге. Тогда в качестве точки отсчета удобно выбрать любой неподвижный объект. Например, растущее около дороги дерево, или любую, даже самую незаметную точку на дороге.

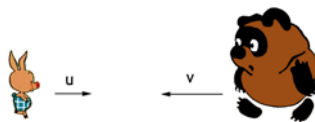
На рисунке скорость тела удобно обозначать стрелкой, длина которой показывает величину скорости, а направление - совпадает с направлением движения тела.

Пусть Винни-Пух идет влево со скоростью  $v$ , а Пятачок идет вправо со скоростью  $u$ . В таком случае расстояние между Винни-Пухом и Пятачком увеличивается со скоростью  $v + u$ . Относительно Винни-Пуха Пятачок удаляется вправо со скоростью  $v + u$ , поэтому говорят о скорости удаления.



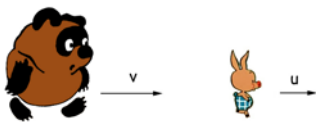
Скорость удаления  $v + u$

Если Винни-Пух и Пятачок идут навстречу друг другу, то скорость Пятачка относительно Винни-Пуха равна  $v + u$  и направлена вправо. В таком случае говорят о скорости сближения.



Скорость сближения  $v + u$

Теперь предположим, что Винни-Пух и Пятачок идут в одну сторону, причем скорость Винни-Пуха  $v$  больше, чем скорость Пятачка  $u$ . Тогда относительно Винни-Пуха скорость Пятачка будет равна  $v - u$  и направлена влево. Если Винни-Пух слева от Пятачка и догоняет его, можно говорить о скорости сближения. Если Винни-Пух уже обогнал Пятачка, то говорят о скорости удаления.



Скорость сближения  $v - u$



Скорость удаления  $v - u$

## 2.3 Графики движения

Рассмотрим пример. Автобус выехал с автовокзала в 12 часов и ехал по прямой дороге с постоянной скоростью 50 км/ч без остановок.

Считается, что графическая информация воспринимается гораздо лучше, чем текст. А как графически показать движение автобуса? Можно было бы нарисовать автобус, подпрыгивающий на кочках, но физики предпочитают строить график движения автобуса. Для этого на горизонтальной оси (оси абсцисс) обозначают время, а на вертикальной оси (оси ординат) - расстояние, которое автобус проехал от автовокзала.



Кстати, а почему не наоборот? Есть две величины, координата автобуса и время, именно координата автобуса зависит от времени. Водитель автобуса легко знает координату автобуса в различные моменты времени, но не может влиять на ход времени. На вертикальной оси обозначают зависимую величину, в нашем примере это координата автобуса. Соответственно, независимую величину обозначают на горизонтальной оси.

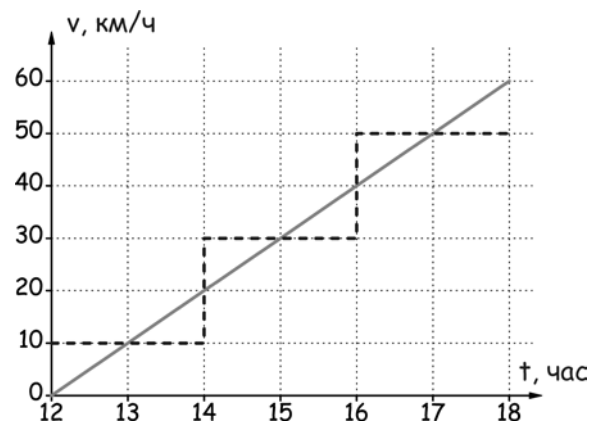
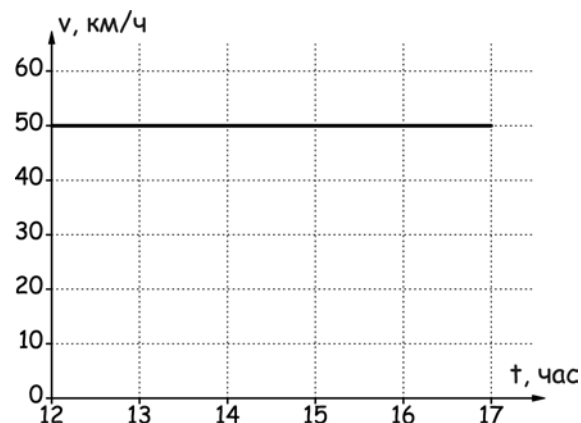
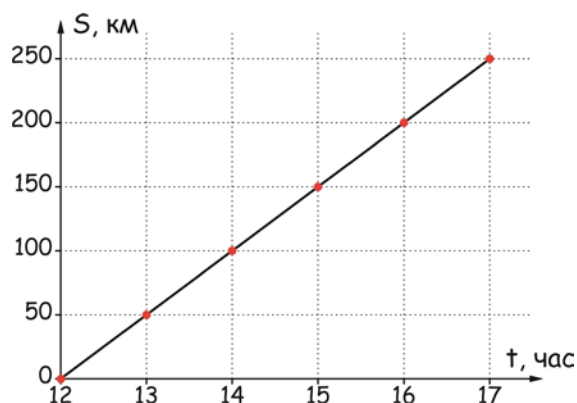
Вернемся к нашему примеру. В 12 часов расстояние от автобуса до автовокзала равно нулю. Отметим соответствующую точку на графике. В 13 часов расстояние от автобуса до автовокзала будет равно 50 км, в 14 часов это расстояние будет равно 100 км, и так далее. Также обозначим на графике соответствующие точки.

Можно заметить, что все отмеченные точки лежат на одной прямой. Действительно, пройденный автобусом путь за время  $t$  равен  $S = vt$ . График этой зависимости является отрезком прямой. Поэтому если соединить все точки прямой линией, мы получим график положения автобуса в произвольные (не равные целому количеству часов) моменты времени.

Кроме графика зависимости положения автобуса от времени можно построить график скорости автобуса. В нашем примере скорость автобуса постоянна, поэтому график зависимости скорости автобуса от времени будет горизонтальной прямой, как показано на рисунке.

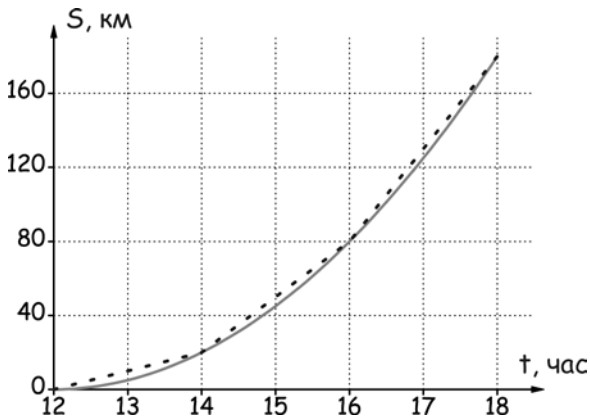
При равномерном движении пройденный путь равен произведению скорости и времени движения  $S = v \cdot t$ . Заметьте, это произведение можно представить как площадь под графиком скорости!

Важно, что площадь под графиком скорости равна пройденному пути даже в случае неравномерного движения. Рассмотрим в качестве примера случай, когда скорость автобуса постепенно увеличивается. График скорости автобуса показан на рисунке сплошной серой линией. Можно все время движения разбить на небольшие участки, на которых скорость автобуса изменялась не сильно. Тогда на каждом участке скорость автобуса можно считать постоянной, а движение - равномерным. Приближенный график скорости автобуса показан на рисунке пунктиром. На каждом участке движение равномерное, поэтому пройденный путь можно вычислить как площадь под графиком зависимости



скорости от времени. Теперь можно уменьшать шаг разбиения, при этом приближенный график будет все ближе к настоящей зависимости.

На рисунке сплошной серой линией показан точный график зависимости положения автобуса от времени. Пунктиром показан график, посчитанный с помощью приближенной зависимости скорости от времени.



Мы научились вычислять пройденный путь с помощью графика скорости от времени. Теперь нужно понять, как по графику зависимости координаты тела от времени определить скорость тела в некоторой точке. В качестве примера рассмотрим движение, график которого показан сплошной серой линией, и найдем скорость тела через 2 секунды после начала движения. Соответствующая точка отмечена на графике как точка  $A$ . За небольшой промежуток времени скорость тела изменяется незначительно, поэтому в течение этого промежутка времени можно рассматривать движение как равномерное.

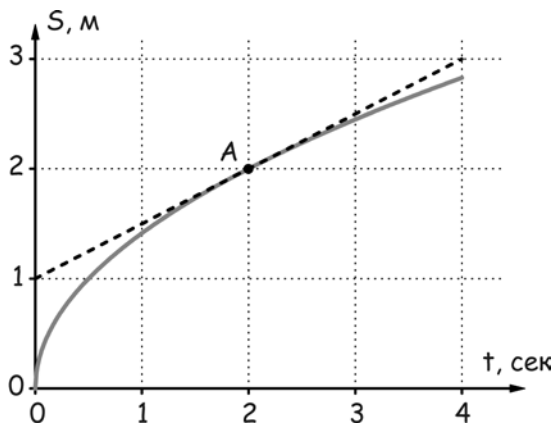


График равномерного движения - это прямая линия. Поэтому в небольшой окрестности точки  $A$  график будет похож на отрезок прямой. Но через точку  $A$  проходит бесконечное множество различных прямых. Нужно выбрать из них такую, которая будет лучше всего совпадать с графиком в окрестности точки  $A$ . Такая прямая называется касательной к графику. По наклону касательной можно определить скорость в точке  $A$ .

Касательная пересекает вертикальную ось (ось ординат) в точке 1 м, а моменту времени 4 секунды соответствует путь 3 м. За 4 секунды тело проходит путь, равный 2 метрам, следовательно, скорость тела равна 0,5 м/с.



### 3 Масса и плотность

Масса – это одна из характеристик физических тел. Понятие массы было введено Исааком Ньютоном как мера количества вещества. Однако в современной физике количество вещества понимается буквально, как число одинаковых частичек (молекул), составляющих тело. Поэтому масса может рассматриваться как мера количества вещества только для однородных тел. Более подробно мы поговорим о понятии массы в следующих главах.

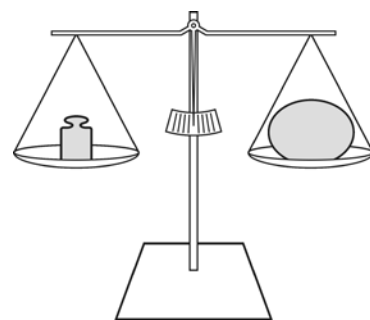
Единицей измерения массы в системе СИ является килограмм. Первоначально килограмм был определен как масса 1 литра воды. В 1880 г. для удобства измерений был изготовлен международный эталон килограмма – небольшой цилиндр из сплава платины и иридия. С 1889 г. килограмм определяют как массу международного эталона килограмма.

В середине XX века было замечено, что масса международного эталона килограмма из-за ряда причин постепенно уменьшается. С 1889 г. эталон стал легче приблизительно на одну тридцатимиллионную часть своей массы. Поэтому килограмм постепенно уменьшается вместе с эталоном, а значит, все остальные тела становятся тяжелее!

В настоящий момент килограмм – единственная из основных единиц измерения, которая определяется с помощью искусственно изготовленного эталона. Такое определение килограмма неудобно тем, что невозможно определить массу тела, если под рукой не оказалось эталона. Поэтому интересно обсудить, как можно определить единицу измерения массы с помощью фундаментальных физических постоянных и законов, не используя искусственно созданных эталонов.

Известно, что вещество состоит из атомов. Массы одинаковых атомов в точности равны, поэтому можно было бы определить килограмм как массу тела, состоящего из определенного количества одинаковых атомов. Главный недостаток такого определения заключается в том, что количество атомов в теле массой 1 кг будет огромным, приблизительно  $10^{25}$  штук. Поэтому необходимо научиться, во-первых, отделять атомы одного типа от всех остальных, и, во-вторых, достаточно точно определять количество атомов в макроскопическом теле. Пока эти трудности не позволяют нам использовать такое определение килограмма.

Существует множество способов измерения массы тела, но проще всего измерить массу с помощью весов. Самые простые рычажные весы были известны еще в Древнем Египте. Такие весы находятся в равновесии, если массы грузов на левой и правой чашке одинаковы. Чтобы измерить массу тела, его кладут на одну чашку весов, а на другую чашку весов помещают гири известной массы, подбирая их так чтобы уравновесить весы. Если весы уравновешены, масса тела равна сумме масс гирек на противоположной чашке весов.



Спросите кого-нибудь что тяжелее, железо или дерево? Часто, не задумываясь, отвечают, что железо тяжелее. Но в действительности нельзя говорить о весе железа вообще, можно говорить только о весе определенного тела, сделанного из железа. Когда говорят, что железо тяжелее дерева, имеют в виду, что железное тело тяжелее деревянного тела такого же объема. Полезно ввести новую физическую величину, которая равна отношению массы тела к его объему. Эта величина называется **плотностью** тела и обычно обозначается греческой буквой  $\rho$  (читается как ро).

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Заметьте, что плотность не зависит от размеров и формы тела. Если масса и объем – это характеристики самого тела, то плотность – это характеристика вещества из которого тело состоит. Поэтому правильнее говорить не о плотности тела, а о плотности вещества. Теперь мы можем физически грамотно сказать, что плотность железа больше плотности дерева.

*В каких единицах измеряется плотность в системе СИ?*

Плотность – это отношение массы к объему. В СИ масса измеряется в килограммах, а объем – в кубических метрах. Поэтому в СИ плотность измеряется в килограммах на кубический метр (обозначается  $\text{кг}/\text{м}^3$ ). Также плотность измеряют в граммах на кубический сантиметр.

*Чему равна плотность воды?*

Килограмм определяют как массу 1 литра воды. 1 литр – это  $1 \text{ дм}^3$ , поэтому в  $1 \text{ м}^3$  содержится 1000 литров. Следовательно, масса  $1 \text{ м}^3$  воды равна 1000 кг. Отсюда плотность воды равна  $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

*Какие значения может принимать плотность различных веществ?*

Самая маленькая плотность у газов. Плотность воздуха при нормальных условиях равна  $1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$ . В зависимости от температуры и давления плотность воздуха может значительно изменяться. Зимой плотность воздуха увеличивается до  $1,3\text{-}1,4 \text{ кг}/\text{м}^3$ , а летом уменьшается до  $1,1 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Один из самых легких газов – гелий (которым надувают воздушные шары) имеет плотность около  $0,18 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Плотность большинства пород древесины изменяется в пределах от 400 до  $800 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Но есть и такие, плотность которых больше плотности воды.

Плотность большинства жидкостей близка к  $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Так плотность бензина равна  $740 \text{ кг}/\text{м}^3$ , плотность масла около  $900 \text{ кг}/\text{м}^3$ , плотность воды  $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ , плотность молока около  $1030 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Плотность ртути значительно больше, чем у других жидкостей и равна  $13600 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Средняя плотность Земли равна  $5520 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Интересно, что плотность Земли больше, чем у остальных планет Солнечной системы.

Считается, что самая большая плотность у металлов, так плотность алюминия равна  $2700 \text{ кг}/\text{м}^3$ , плотность железа  $7900 \text{ кг}/\text{м}^3$ , плотность меди  $8900 \text{ кг}/\text{м}^3$ , плотность золота  $19300 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Но есть и легкие металлы, например плотность лития всего  $530 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

## 4 Инерция

### 4.1 Инерция и первый закон Ньютона.

Хорошо известно, что сами по себе предметы не могут начать движение. Любое движение возникает в результате внешнего воздействия. (вперед) Например, чтобы мяч полетел, нужно ударить по нему ногой. Для того чтобы плыть на лодке, необходимо отталкиваться веслами от воды. Величину воздействия описывают с помощью физической величины – **силы** (говорят, что к телу приложена сила).

Но движение, кажется, не может продолжаться бесконечно долго. Как бы сильно Вы не ударили по мячу, он пролетит некоторое расстояние и остановится. Также лодка всегда останавливается после того, как вы перестаете грести.

Древнегреческий ученый Аристотель объяснял это тем, что положение покоя относительно Земли (которую Аристотель считал центром Мира) является естественным. Соответственно движение относительно Земли является насильственным. Аристотель утверждал: **“Всё, что находится в движении, движется благодаря воздействию другого. Движущееся тело останавливается, если сила, его толкающая, прекращает свое действие”**.

Итальянский ученый Галилео Галилей, напротив, утверждал, что движущееся тело может остановиться только под действием внешних сил. По легенде Галилей наблюдал за движением планет в Солнечной системе. Он обратил внимание на то, что скорость вращения планет вокруг Солнца несколько не замедляется. Анализируя эти наблюдения, Галилей пришел к выводу, что **остановка или изменение скорости движения происходит лишь в результате внешнего воздействия на тело**.

*Как вы считаете, кто из двух ученых оказался прав?*

Давайте постараемся разобраться в этом вопросе. На самом деле каждое тело взаимодействует со многими другими, хотя мы часто этого не замечаем. Например, летящий мячик останавливается не сам по себе, а под действием силы сопротивления воздуха. Почувствовать эту силу вы можете во время езды на велосипеде, или при спуске с горы на лыжах. Аналогично лодку останавливает сила сопротивления воды. Очевидно, что чем слабее внешнее воздействие, тем медленнее изменяется скорость тела. А если внешние силы вообще отсутствуют, скорость тела будет оставаться постоянной. Это значит, что Галилей оказался прав.

Можно привести еще одно важное соображение не в пользу представлений Аристотеля. Аристотель считал Землю центром Мира, центром Вселенной. Поэтому положение покоя относительно Земли, то есть относительно центра Мира, представлялось ему естественным состоянием тела. Однако сегодня мы знаем, что Земля – это всего лишь одна из огромного числа планет во Вселенной. У Вселенной нет четко определенного центра, а это значит, что свободно движущееся тело просто не может знать, где ему следует остановиться!

Явление сохранения скорости тела в случае, если внешние воздействия на него отсутствуют или взаимно скомпенсированы, называется **инерцией** (с латинского *inertia* можно перевести как бездеятельность). Соответственно утверждение Галилея называют **законом инерции**. Более удачная формулировка этого закона была предложена Ньютоном и получила название **первого закона Ньютона**:

**Любое свободное тело, на которое не действуют силы со стороны других тел, находится в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения.**

Часто говорят “тело движется по инерции”. Подумайте, что означает это выражение? Что можно сказать о движении по инерции?

Рассмотрим хорошо всем знакомый пример. Пусть автобус едет по ровной прямой дороге с постоянной скоростью. В таком случае пассажиры движутся с постоянной скоростью вместе с автобусом, и для этого им совершенно не приходится прикладывать силу. Но когда автобус начинает резко тормозить, пассажиры продолжают двигаться вперед "по инерции". Поэтому для того, чтобы остановиться вместе с автобусом, пассажирам приходится держаться за поручни и прикладывать силу. Таким образом, движение пассажиров автобуса прекрасно согласуется с законом инерции.

Мы рассмотрели движение пассажиров в системе отсчета Земли. Но мы уже знаем, что движение можно рассматривать в различных системах отсчета. Например, можно рассмотреть движение пассажиров в системе отсчета автобуса. Тогда во время торможения пассажиры начинают падать вперед относительно автобуса, хотя никакие силы на них не действуют. Это рассуждение показывает, что в системе отсчета автобуса закон инерции может не выполняться.

Важно понимать, что Галилей и Ньютон сформулировали закон инерции для движений относительно Земли. Систему отсчета связанную с Землей называют инерциальной, потому что в такой системе отсчета закон инерции выполняется. Соответственно, систему отсчета автобуса называют неинерциальной. В дальнейшем мы будем рассматривать движение в инерциальных системах отсчета, а про движение в неинерциальных системах отсчета мы отдельно поговорим в главе 13.

Обсудим еще один важный вопрос. Подбросьте теннисный мяч вертикально вверх. Очевидно, что мяч упадет Вам точно в руки. А что будет, если подбросить мяч в автобусе, который движется по прямой дороге с постоянной скоростью? Часто считают, что пока мяч будет находиться в воздухе, автобус успеет проехать на некоторое расстояние вперед. Поэтому мяч упадет сзади по ходу движения автобуса. Попробуйте проделать этот простой эксперимент, и Вы с удивлением обнаружите, что мяч снова упадет точно в руки. Дело в том, что когда Вы держите мяч в руках перед броском, он движется вместе с автобусом. Поэтому когда Вы подбросите мяч вверх, он по инерции будет продолжать двигаться вперед.

Согласно закону инерции, для того чтобы изменить скорость тела, нужно приложить к нему внешнюю силу. Но даже под действием силы изменение скорости тела происходит не мгновенно. Свойство тела в большей или меньшей степени препятствовать изменению своей скорости при воздействии на него внешних сил называется **инертностью**. Мерой инертности в физике является масса тела. Поэтому, чем тяжелее тело, тем сложнее изменить его скорость. Например, легкий мячик для настольного тенниса остановить значительно проще, чем тяжелую гирю. Не следует путать инерцию и инертность. Инерция - это явление, а инертность - это характеристика тела.

## 5 Сила

### 5.1 Второй и третий законы Ньютона

Если на неподвижное тело не действуют внешние силы, то по закону инерции оно будет сохранять состояние покоя. Но "укрыться" от действия всех внешних сил еще никому не удавалось. Поэтому если неподвижное тело сохраняет состояние покоя, значит, все действующие на него внешние силы скомпенсированы. Равенство нулю суммы всех действующих на тело внешних сил называют **условием равновесия тела**.

**Замечание.** При сложении сил важно учитывать не только их величину, но и направление. Например, в знаменитой басне лебедь, рак и щука тянут воз в разные стороны. Силы героев басни компенсируют друг друга. Поэтому, как известно, "воз и ныне там".

А что будет в случае, если на тело действует не скомпенсированная внешняя сила? Будем считать, что она постоянна по величине и направлению. Очевидно, что под действием внешней силы скорость тела будет изменяться. Чтобы понять, как изменение скорости связано с величиной силы ответим на следующий вопрос: *От каких физических величин может зависеть изменение скорости тела в результате действия на него силы?*

Во-первых, очевидно, что тяжелое тело сложнее заставить двигаться. Поэтому изменение скорости должно зависеть от массы.

Во-вторых, даже большая сила не может мгновенно изменить скорость тела. Скорость под действием силы изменяется постепенно, поэтому изменение скорости должно зависеть от времени воздействия.

*А зависит ли изменение скорости от величины скорости?*

Как мы знаем, движение можно рассматривать в различных системах отсчета. Согласно принципу относительности, во всех инерциальных системах отсчета формула для изменения скорости выглядит одинаково. Очевидно, что в различных инерциальных системах отсчета величина начальной скорости тела будет различной, однако изменение скорости тела во всех инерциальных системах отсчета будет одинаковым. Отсюда следует, что изменение скорости не зависит от ее величины.

Вы можете возразить, что автомобиль на небольшой скорости разгоняется легко. Но чем больше становится скорость автомобиля, тем медленнее он набирает скорость. Наконец, автомобиль достигает максимальной скорости, двигатель продолжает работать и толкать автомобиль вперед, но скорость не увеличивается!

*Почему в этом случае изменение скорости зависит от скорости автомобиля? Что мешает автомобилю разгоняться дальше?*

В системе отсчета автомобиля воздух движется назад со скоростью, равной скорости автомобиля относительно Земли. Даже при сравнительно небольшой для автомобиля скорости, около 120 км/ч, скорость встречного потока воздуха равна скорости ветра при урагане! Сила сопротивления воздуха быстро возрастает с увеличением скорости автомобиля, поэтому при движении на высокой скорости двигателю приходится тратить значительную часть мощности на преодоление сопротивления воздуха. Поэтому чем больше скорость автомобиля, тем медленнее он разгоняется.

Итак, чем больше сила и чем дольше она действует, тем больше будет изменение скорости, а чем больше масса тела, тем изменение его скорости меньше. Согласно **второму закону Ньютона**, изменение скорости тела под действием силы пропорционально величине силы, времени воздействия и обратно пропорционально массе. Запишем это с помощью формулы.

$$\Delta v = \frac{F \cdot t}{m}$$

Здесь значок  $\Delta$  (это греческая буква дельта) обозначает изменение, поэтому  $\Delta v$  – это изменение скорости тела под действием силы  $F$ . Обратите внимание, мы никак не доказали эту формулу, а лишь привели соображения почему с точки зрения здравого смысла зависимость должна быть именно такой.

Мы знаем, что скорость имеет величину и направление. Также сила имеет не только величину, но и направление. Изменение скорости тела  $\Delta v$  направлено так же, как и действующая сила.

В честь английского физика Исаака Ньютона, сформулировавшего законы движения, единица измерения силы в системе СИ называется ньютон (обозначается большой буквой Н).

*Выразите ньютон через основные единицы системы СИ.*

Формулу  $\Delta v = \frac{F \cdot t}{m}$  можно переписать в виде  $F = \frac{m \cdot \Delta v}{t}$ . Отсюда следует, что единица измерения

силы – это килограмм, умноженный на метр в секунду и поделенный на секунду, или  $1 \text{ Н} = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}$ .

Выше мы говорили о воздействии одного тела на другое. Однако воздействие не бывает односторонним. Всегда два тела одновременно воздействуют друг на друга, поэтому говорят о взаимодействии между двумя телами. Согласно **третьему закону Ньютона: "Силы, с которыми два тела воздействуют друг на друга, равны по модулю и противоположны по направлению"**.

Легко запомнить краткую формулировку этого закона: **"Сила действия равна силе противодействия"**.

В справедливости третьего закона Ньютона легко убедиться на нескольких простых примерах.

Когда на перемене один шестиклассник врзается в другого, у обоих на лбу появляются шишки.

Когда Вы стреляете из пистолета, то чувствуете силу отдачи. Ровно такая же по величине и толкающая вперед сила действует на вылетающую пулю и разгоняет её.

Когда человек выпрыгивает из лодки на берег, он толкается в сторону берега, а лодка отплывает назад.

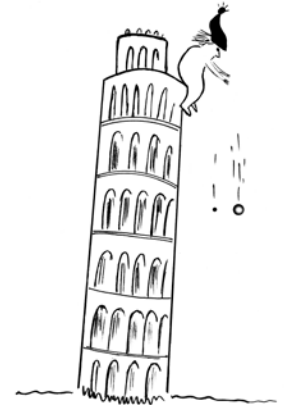
При игре в бильярд, когда один шар ударяет другой точно в центр, первый шар останавливается, а второй начинает катиться. На оба шара действует одинаковая сила, поэтому по величине изменение скорости шаров одинаково. Но если первый шар останавливается (сила на него действует назад), то второй начинает катиться со скоростью первого шара вперед (на него во время столкновения сила действует вперед).

Наконец каждый из Вас притягивается к Земле с довольно большой силой. Но оказывается, что Земля также притягивается к Вам с точно такой же по величине силой! Тогда почему Земля не отскакивает каждый раз, когда мы подпрыгиваем? Дело в том, что масса Земли приблизительно в  $10^{23}$  раз больше массы человека. Поэтому, даже если все население Земли будет подпрыгивать одновременно, они смогут сообщить Земле лишь очень незначительную скорость.

## 5.2 Сила тяжести

Хорошо известно, что все тела притягиваются к Земле. Древнегреческий ученый Аристотель считал падение тел на Землю естественным движением тяжелых тел к центру Мира. По мнению Аристотеля, такое движение не нуждается в силе. Но мы уже знаем, что без внешних сил тело не будет изменять свою скорость, а значит, не будет падать. Поэтому мы можем сделать вывод, что существует сила, которая притягивает тела к Земле. Эта сила называется силой **тяжести**.

Кроме того по мнению Аристотеля, тяжелое тело должно падать быстрее. Поэтому два сложенных вместе кирпича будут падать вдвое быстрее, чем один. Галилео Галилей экспериментально проверил это рассуждение Аристотеля. Галилей исследовал падение тел со знаменитой Пизанской башни и установил, что время падения тела не зависит от его размеров и массы. Это кажется удивительным, ведь тяжелые тела притягиваются к Земле сильнее. Однако мы с вами уже знаем, что тяжелые тела обладают большей инертностью, поэтому их сложнее заставить двигаться.



В рассуждениях Аристотеля все же есть доля правды, часто легкие тела действительно падают медленнее из-за действия на них силы сопротивления воздуха. Например, гусиное перышко падает медленнее, чем металлический шарик. Но если поместить их в закрытую колбу и откачать из колбы воздух, то шарик и перышко будут падать с одинаковой скоростью.

В 1971 году американский астронавт Дэвид Скотт показал, что на Луне, где нет атмосферы, а значит и сопротивления воздуха, легкое перышко и тяжелый молоток падают с одинаковой скоростью. Этим экспериментом он подтвердил выводы Галилея.

Теперь мы знаем, что под действием силы тяжести, тела разной массы падают с одинаковой скоростью. Согласно 2-му закону Ньютона скорость тела при падении пропорциональна силе тяжести, времени падения и обратно пропорциональна массе тела  $v = \frac{F_{\text{тяж}} \cdot t}{m}$ .

При каком условии два тела разной массы будут падать с одинаковой скоростью? Для этого нужно, чтобы отношение силы тяжести к массе было одинаковым. Следовательно, действующая на некоторое тело сила тяжести должна быть пропорциональна массе этого тела  $F_{\text{тяж}} = mg$ . В этом выражении  $m$  - масса тела, а величина  $g$  называется **ускорением свободного падения** (дочитав до конца книги, Вы поймете, почему эту величину называют именно так).

*В каких единицах измеряются сила тяжести и ускорение свободного падения в системе СИ?*

Сила тяжести, впрочем как и любая сила, измеряется в ньютонах. Из формулы  $F_{\text{тяж}} = mg$  следует, что ускорение свободного падения можно измерять в Н/кг. Мы знаем, что ньютон можно выразить через килограммы, метры и секунды. Поэтому единицу измерения ускорения свободного падения можно представить как  $1 \frac{\text{Н}}{\text{кг}} = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2 \cdot \text{кг}}$ . Теперь сократим килограммы и окончательно получим, что единица измерения ускорения свободного падения в системе СИ может быть представлена как  $1 \text{ м/с}^2$ .

Мы помним, что сила характеризуется величиной и направлением. Конечно сила тяжести не исключение, она всегда направлена вниз к центру Земли, так же как и ускорение свободного падения. Средняя величина ускорения свободного падения на поверхности Земли равна  $9,8 \text{ м/с}^2$ . Однако в разных местах оно немного отличается, из-за вращения Земли ускорение свободного падения на экваторе немного меньше  $g = 9,78 \text{ м/с}^2$ , а на полюсах - больше  $g = 9,83 \text{ м/с}^2$ . При решении задач мы не будем стремиться как можно точнее рассчитать траекторию движения тела, поэтому для удобства вычислений мы будем считать  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .

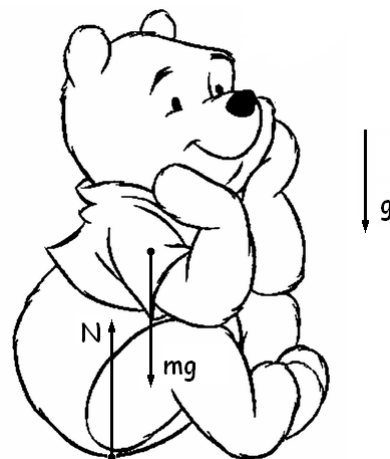
Но если на каждого из нас действует сила тяжести, тогда почему мы не движемся вниз под действием этой силы и не проваливаемся под землю? Потому, что стоим на полу. Сила, с которой мы давим на пол называется **весом**. Со стороны пола на нас действует сила, которая по величине равна весу и направлена вверх. Эта сила называется силой реакции опоры и обычно обозначается большой буквой  $N$ . По третьему закону Ньютона вес тела и сила реакции опоры равны по величине и направлены в противоположные стороны, поэтому они компенсируют друг друга.

Кстати, вес тела не всегда равен силе тяжести. *Подумайте, в каких случаях вес будет больше или меньше силы тяжести.*

Часто вес путают с массой тела. Строго говоря, неправильно спрашивать, сколько человек весит, нужно спрашивать, чему равна его масса. Но так никто не делает. Отчасти эта путаница связана с тем, что массу измеряют на весах. То есть вначале измеряют вес тела, а затем делят результат на ускорение свободного падения  $g$ . Поэтому пружинные и электронные весы правильно показывают массу только на Земле. Если такие весы привезти на Луну, где ускорение свободного падения примерно в 6 раз меньше, то показания весов будут в 6 раз меньше истинного значения массы. Кстати, рычажные весы непосредственно сравнивают вес тела с весом эталонных гирек. Поскольку на Луне вес гирек также уменьшится, рычажные весы будут работать даже на Луне.

Во многих задачах полезно нарисовать картинку, на картинке принято указывать все действующие на тело силы. Для этого рисуют жирную точку в месте приложения силы, если сила приложена ко всему телу, то точку ставят в середине тела (в центре масс). Из точки рисуют стрелку, направление которой показывает направление действия силы. Длина стрелки качественно показывает величину силы, чем больше сила, тем длиннее должна быть стрелка.

На рисунке справа сила тяжести обозначена как  $mg$  и направлена вниз, эта сила приложена в равной степени ко всем точкам тела, поэтому точка приложения силы находится в центре тела. Так же на рисунке показана сила реакции опоры  $N$ . Она приложена в месте соприкосновения с полом и направлена вверх. Если в задаче важно учитывать силу тяжести, принято сбоку картинку показывать направление силы тяжести.



Легко поверить в то, что Земля притягивает предметы, которые находятся на ее поверхности. Но трудно себе представить, как Солнце может притягивать планеты, которые расположены на огромном расстоянии от него. Например, Галилей так и не сумел понять, что заставляет планеты вращаться вокруг Солнца. Он считал, что "круговое движение естественно присуще телам, составляющим Вселенную". То есть Галилей считал, что для планет справедливы совершенно иные законы движения, чем для обычных земных тел.

По легенде Исаак Ньютон, сидя в саду, размышлял о том, что заставляет Луну вращаться вокруг Земли и увидел падающее яблоко. Он подумал, что если сила тяжести действует на яблоко, которое висит высоко на дереве, то возможно сила тяжести действует и на Луну. Ньютон первым догадался о том, что сила притяжения, аналогичная силе тяжести, действует между любыми двумя телами. Это объясняет, почему Луна вращается вокруг Земли, а планеты вращаются вокруг Солнца.

Ньютон проанализировал наблюдения немецкого астронома Иоганна Кеплера и понял, что действующая между телами сила гравитационного притяжения пропорциональна массам этих тел и обратно

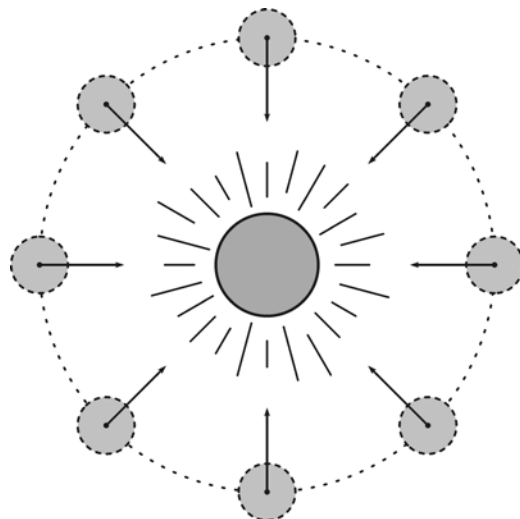




пропорциональна квадрату расстояния между ними.  $F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$ . В этом выражении величина  $G$  называется гравитационной постоянной и равна  $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{М}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}$ .

Но вот вопрос, почему же планеты до сих пор не упали на Солнце? Ответ в том, что планеты вращаются вокруг Солнца. В каждый момент времени сила притяжения направлена строго к центру Солнца. Но во время вращения положение планеты изменяется, а вместе с ним изменяется направление силы притяжения.

Силы притяжения в противоположных точках орбиты равны по величине и противоположны по направлению. Можно сказать, что они компенсируют друг друга. За время полного оборота планеты вокруг Солнца сила притяжения оказывается одинаковое время направленной во все стороны, поэтому средняя (с учетом направления) сила притяжения планеты к Солнцу равна нулю.

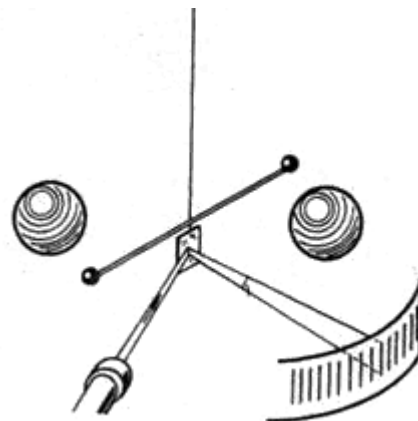


*В качестве упражнения оцените величину силы гравитационного притяжения, которая действует между Вами и Вашим соседом по парте.*

Силы гравитации очень слабые, сила гравитационного притяжения между телами обычных размеров очень мала, поэтому мы просто не замечаем действия этой силы. Например, два школьника, сидящие за одной партой на расстоянии 1 метр друг от друга, притягиваются с силой около  $10^{-7}$  Н. Эта сила ничтожно мала и никак не может повлиять на человека. Однако если мы представим, что эти два школьника находятся в космосе, где нет никаких сил сопротивления движению, то за первый час они приблизятся друг к другу на 4 см, в течение следующего часа они сблизятся еще на 16 см, а столкнутся они только через три с половиной часа.

В 1788 году английский физик Генри Кавендиш экспериментально измерил силу притяжения между свинцовыми шарами. Проведенный им эксперимент получил название "Взвешивание Земли".

Кавендиш сконструировал специальные крутильные весы. Схема таких весов показана на рисунке. Маленькие шары массой  $m$  под действием силы гравитации притягиваются к большим шарам массой  $M$ . Поворот весов фиксируется с помощью отклонения луча света небольшим зеркальцем. Далее по величине угла поворота вычисляется сила притяжения, действующая между шарами. Этот эксперимент впервые позволил узнать величину гравитационной постоянной и массу Земли.



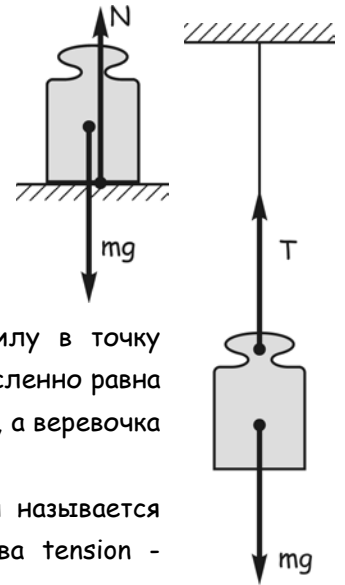
### 5.3 Силы натяжения и упругости

Представим себе гирьку массой 100 грамм. Сила тяжести такой гирьки равна 1 Н и направлена вниз. Когда гирька стоит на столе, сила тяжести уравновешивается силой реакции опоры  $N$ , которая равна 1 Н и направлена вверх.

Теперь подвесим гирьку на веревочке. На гирьку больше не действует сила реакции опоры со стороны стола. Но тогда почему гирька не падает под действием силы тяжести?

Сила тяжести гирьки растягивает веревочку, которая передает эту силу в точку подвеса. В точке подвеса веревочки возникает сила реакции опоры, которая численно равна весу гирьки и направлена вверх. Эта сила растягивает верхний конец веревочки, а веревочка передает силу реакции опоры гирьке.

В результате на гирьку действует сила со стороны веревочки, которая называется **силой натяжения** и обозначена на рисунке буквой  $T$  (от английского слова *tension* - натяжение). Сила натяжения численно равна весу гирьки и направлена вертикально вверх.



В задачах мы будем считать веревочки идеальными, то есть невесомыми и нерастяжимыми. Такая веревочка всегда натянута строго по прямой (реальные веревки могут провисать под действием собственной силы тяжести). Кроме того идеальная веревочка в каждой точке натянута с одинаковой силой, поэтому можно говорить просто о силе натяжения веревочки.

Рассмотрим важный пример. Пусть Влад с силой 100 Н тянет за один конец веревки, второй конец которой привязан к дереву. Очевидно, что в этом случае сила натяжения веревки равна 100 Н.

Теперь рассмотрим случай, когда за один конец веревки тянет Влад, а за второй - Гоша, оба с силой 100 Н. Часто ошибочно считают, что ребята вместе натягивают веревку с силой 200 Н. Однако, это не так. Давайте разберемся, почему в этом случае силы ребят не складываются.

Вначале заметим, что невозможно натянуть веревку, если ее второй конец не закреплен. Когда Влад натягивал веревку, привязанную к дереву, на закрепленный конец веревки действовала сила со стороны дерева, равная 100 Н.

Вернемся к случаю, когда Влад и Гоша тянут за разные концы веревки. Влад тянет за веревку с силой 100 Н, веревка передает эту силу Гоше. Поэтому на Гошу со стороны веревки действует сила 100 Н. Аналогично Гоши с помощью веревки тянет Влада с силой 100 Н. Таким образом, на каждого из ребят со стороны веревки действует сила 100 Н. А это значит, что сила натяжения веревки равна 100 Н. Для того чтобы натянуть веревку с силой 200 Н, Влад и Гоша должны вместе тянуть за один конец веревки, которая вторым концом привязана к дереву.

В отличие от веревок, резинки и пружины растягиваются под действием приложенной силы. Изменение формы тела под действием силы называют **деформацией**. Пружины и резинки деформируются упруго, это значит, что они возвращаются к начальной длине после того, как прекращается действие силы. Сила, которая возникает в растянутой пружине, называется силой упругости. Эта сила направлена противоположно растяжению и стремится сжать пружину.

Английский физик Роберт Гук установил, что при достаточно малых деформациях сила упругости пропорциональна растяжению  $F=k \cdot \Delta x$ . Это выражение называется законом Гука, здесь  $\Delta x$  - удлинение пружины или резинки, а коэффициент пропорциональности  $k$  называется **жесткостью**.

В каких единицах измеряется жесткость в системе СИ? Из закона Гука видно, что жесткость равна отношению силы натяжения к удлинению пружины. Поэтому в СИ жесткость измеряется в Н/м.

Закон Гука справедлив не только для растяжений, но и для всех видов упругой деформации, например для деформаций кручения и изгиба. Если деформированное тело не восстанавливает форму после прекращения действия силы, то деформация называется неупругой, или пластической. Например, пластическая деформация наблюдается в пластилине или глине.

## 5.4 Трение

Вы никогда не задумывались, почему ходить по асфальту легко, а на льду ноги все время скользят и разъезжаются в разные стороны?

Чтобы ответить на этот вопрос нужно вначале понять, как мы ходим. При ходьбе мы отталкиваем ногу назад. На рисунке сила, с которой мы отталкиваемся, обозначена  $F$ . Но сцепление с асфальтом не позволяет ноге двигаться назад. Между ботинком и асфальтом возникает сила, которая уравнивает силу отталкивания. Эта сила называется **силой трения** и обозначена на рисунке  $F_{\text{тр}}$ .



На льду сила трения недостаточно большая, поэтому ботинки проскальзывают. В настоящий момент до конца не понятно, почему лед скользкий. Но известно, что на поверхности льда существует тонкий слой (толщиной порядка  $10^{-7}$  метра), который по своим свойствам близок к жидкой воде. Этот слой выступает в качестве смазки и уменьшает силу трения между льдом и ботинком. Кстати, при уменьшении температуры толщина поверхностного слоя льда уменьшается (при температуре  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  его толщина приблизительно равна  $10^{-8}$  метра). Поэтому при низких температурах лед становится менее скользким.

Как мы знаем, для движения необходима внешняя сила. А какая сила действует на нас при ходьбе? Сила, с которой мы отталкиваем ногу назад является внутренней силой. Эта сила может заставить ногу двигаться назад относительно туловища, но не может заставить человека двигаться. Аналогично нельзя вытащить себя за волосы из болота, как это сделал Барон Мюнхгаузен.

Единственная внешняя сила, которая действует на человека при ходьбе – это сила трения между ботинками и асфальтом. Как видно из картинке, сила трения направлена вперед, и именно эта сила заставляет человека двигаться.

Когда мы идем по асфальту, ботинок относительно асфальта не проскальзывает. В этом случае принято говорить о силе трения покоя. Сила трения покоя в точности равна по величине силе, с которой мы отталкиваемся ногой от асфальта и направлена в противоположную сторону. Поэтому сила трения покоя компенсирует силу отталкивания.

Но величина силы трения покоя не может быть больше некоторого значения. Если сила отталкивания превышает максимальную силу трения покоя, нога начинает проскальзывать.

*От чего может зависеть максимальная сила трения покоя?*

В общем случае трение возникает между двумя прижатыми друг к другу поверхностями. Очевидно, что величина силы трения зависит от характеристик этих поверхностей. Сила трения тем больше, чем сильнее поверхности цепляются друг за друга, то есть чем более шероховатые поверхности. Во-вторых, сила трения зависит от того, насколько сильно поверхности прижаты друг к другу.

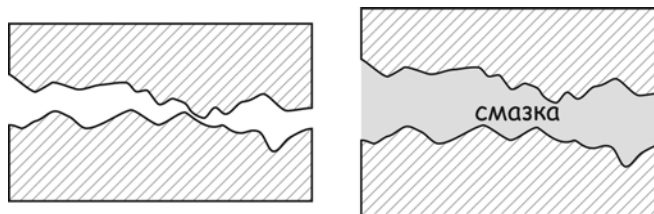
Силу трения можно представить как произведение коэффициента трения  $\mu$  и силы  $N$ , с которой две поверхности прижаты друг к другу  $F_{\text{тр макс}} = \mu N$ .

Сила трения покоя не может быть больше  $F_{\text{тр макс}} = \mu N$ . На льду коэффициент трения маленький, поэтому сила отталкивания больше максимальной силы трения покоя и ботинок начинает скользить. В этом случае говорят о силе трения скольжения. Сила трения скольжения всегда равна по величине  $F_{\text{тр}} = \mu N$  и направлена противоположно движению.

**Замечание.** Обычно коэффициент трения покоя немного больше коэффициента трения скольжения. Но во многих задачах эти коэффициенты для простоты считаются равными и называются просто коэффициентом трения.

Между двумя соприкасающимися поверхностями неизбежно возникает сила трения. Во многих случаях присутствие трения нежелательно. Например, в различных механизмах трение приводит к износу деталей.

Полностью избавиться от сил трения невозможно, но силу трения можно значительно уменьшить. Для этого можно использовать различные смазки. Тонкая пленка смазки разделяет две поверхности и не позволяет микроскопическим неровностям, которые находятся на этих поверхностях, соприкасаться друг с другом (смотри рисунок). Для снижения трения между вращающимися частями механизмов также используют подшипники.



Часто возникает мнение, что сила трения всегда мешает движению. На самом деле это не так. Мы знаем, что именно сила трения позволяет двигаться вперед при ходьбе. Именно сила трения между колесами и дорогой заставляет двигаться автомобиль. Когда зимой коэффициент трения между колесами и дорогой снижается, сила сцепления с дорогой становится недостаточной. Поэтому зимой автомобилем трудно управлять. Для увеличения силы сцепления колес с асфальтом зимой используют более мягкие шины.

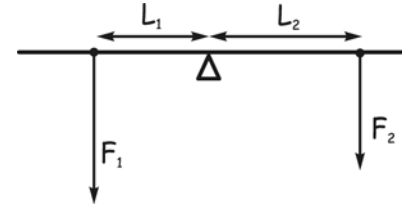
## 6 Моменты

### 6.1 Правило рычага

**Твердое тело, способное вращаться вокруг неподвижной опоры, называют рычагом.**

Перед объяснением теории можно предложить ребятам самостоятельно найти условие равновесия рычага. Для этого потребуется рычаг, гири и динамометр. Нужно попросить ребят провести несколько опытов, подвешивая гири на различном расстоянии от центра рычага.

На рисунке показана схема рычага. Точка, в которой рычаг закреплен, называется точкой опоры, она обозначена на рисунке треугольником. Расстояние от точки опоры до линии, вдоль которой приложена сила, называется плечом силы. На рисунке  $L_1$  и  $L_2$  - это **плечи** сил  $F_1$  и  $F_2$  соответственно.



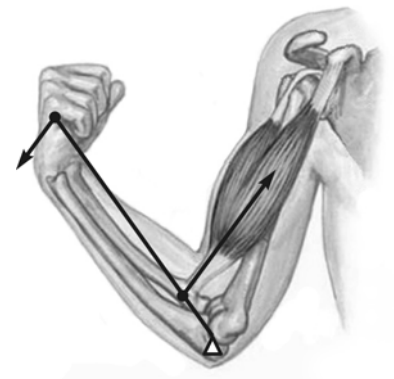
Экспериментально можно установить, что рычаг находится в равновесии, когда  $F_1 \cdot L_1 = F_2 \cdot L_2$ . Это условие называется **правилом рычага**.

В равновесии отношение приложенных к рычагу сил равно отношению противоположных плеч  $\frac{F_1}{F_2} = \frac{L_2}{L_1}$ .

Поэтому прикладывая силу к длинному концу рычага, на коротком конце можно уравновесить значительно большую по величине силу. Это свойство рычага используют для поднятия тяжестей. По легенде Архимед, когда открыл правило рычага, воскликнул: «Дайте мне точку опоры, и я переверну Землю!».

Однако нужно понимать, что одновременно с выигрышем в силе рычаг дает проигрыш в расстоянии. Во сколько раз рычаг увеличивает силу, во столько же раз он уменьшает скорость и высоту подъема. Этот закон называется **золотым правилом механики**.

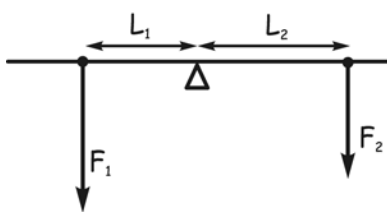
Например, для того чтобы с помощью рычага поднять тяжелый предмет, нужно опустить длинный конец рычага на большее расстояние.



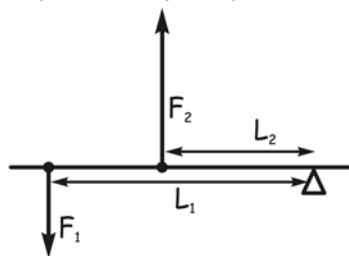
Заметим, что рычаг можно использовать не только для увеличения силы. Прикладывая силу к короткому концу рычага, можно получить выигрыш в скорости (одновременно с проигрышем в силе). В качестве примера можно рассмотреть строение человеческой руки. Мышцы крепятся к кости на расстоянии около  $1/7$  от длины руки от локтя. Это в 7 раз уменьшает силу, но зато в 7 раз увеличивает скорость, с которой рука сгибается.

Рычаг, в котором силы приложены с разных сторон от точки опоры, называется рычагом первого рода. А рычаг, в котором обе силы приложены с одной стороны от точки опоры называется рычагом второго рода.

рычаг первого рода



рычаг второго рода



Заметим, что рычаг первого рода изменяет направление действия силы. Например, для того чтобы при помощи такого рычага поднять груз, нужно опускать свободный конец рычага.

Теперь рассмотрим силу, которая возникает в точке опоры рычага. Если рычаг находится в равновесии, сила, которая действует на рычаг в точке опоры, уравнивает силы, приложенные к рычагу. В случае рычага первого рода, силы  $F_1$  и  $F_2$  сонаправлены (см. рисунок). Поэтому сила в точке опоры равна их сумме  $F_1 + F_2$ . В случае рычага второго рода, силы  $F_1$  и  $F_2$  направлены в противоположные стороны, а величина силы  $F_2$  всегда больше, чем  $F_1$  (см. рисунок). Поэтому сила в точке опоры рычага второго рода равна разности  $F_2 - F_1$ .

Под действием приложенных сил рычаг может вращаться вокруг точки опоры. Поэтому правило рычага можно понимать как условие равновесия рычага относительно вращений вокруг этой точки.

Заметим, что если рычаг находится в равновесии, он не вращается не только относительно точки опоры, но и относительно любой другой точки. Поэтому правило рычага можно записать относительно любой точки на рычаге. Однако, если раньше мы не учитывали силу в точке опоры, потому что плечо этой силы было равно нулю, то теперь нужно будет записывать условие равновесия рычага с учетом всех действующих на рычаг сил.

## 6.2 Центр масс

Уравновесим на рычаге тело произвольной формы. На каждую точку этого тела действует сила тяжести. Для того чтобы тело находилось в равновесии, силы тяжести различных точек тела должны уравновешивать друг друга.

Но рассматривать отдельно каждую точку тела очень сложно. Можно считать, что вся сила тяжести тела приложена в одной точке, которая называется **центром тяжести** тела. Для равновесия нужно чтобы центр тяжести находился точно над точкой опоры рычага, тогда плечо силы тяжести тела будет равно нулю.

*Как определить положение центра тяжести тела?*

Очевидно, что центр тяжести симметричного тела, например куба или шара, находится в середине тела.

*Как определить положение центра тяжести у тела неправильной формы?*

Вырежем из картона или плотной бумаги фигурку. Если ее подвесить, то центр тяжести будет находиться точно под точкой подвеса. Проведем из точки подвеса вниз вертикальную линию. Центр тяжести будет находиться где-то на этой линии. Теперь подвесим тело за другую точку и снова проведем вертикальную линию. Центр тяжести фигурки будет находиться на пересечении линий. Чтобы это проверить подвесим фигурку за третью точку и снова проведем вертикальную линию. Мы увидим, что все три линии пересекутся в одной точке - центре тяжести.

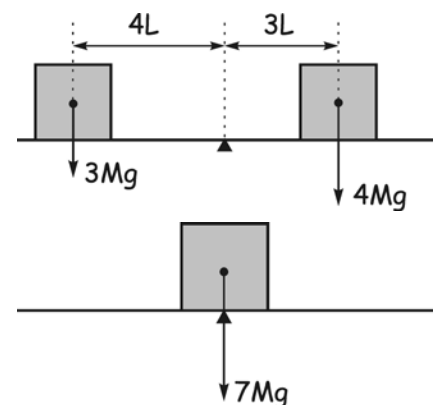
Есть еще один интересный способ найти центр тяжести тела. Положим карандаш на два указательных пальца и будем медленно сдвигать их. Если в некоторый момент центр тяжести карандаша оказывается ближе к одному из пальцев, то по правилу рычага на этот палец приходится большая часть веса карандаша. Поэтому между пальцем и карандашом возникает большая сила трения и карандаш проскальзывает относительно другого пальца. Когда мы сведем пальцы вместе, центр тяжести тела будет находиться между пальцами.

Подумайте, а что будет если теперь начать разводить пальцы?

Если тело состоит из нескольких частей, положение центра тяжести которых известно, можно использовать следующий способ определения центра тяжести.

Если мы уравновесим два тела на рычаге, значит, их общий центр тяжести будет расположен строго над точкой опоры. Поэтому эти два тела можно заменить на один эквивалентный груз с суммарной массой и расположенный точно над точкой опоры.

Пусть теперь у нас есть несколько грузов. Мы можем по очереди заменять любые два на один эквивалентный груз, который расположен по правилу рычага и масса которого равна сумме масс двух грузов. В результате мы все грузы заменим на один эквивалентный, расположенный в центре тяжести.



У тела есть еще одна особенная точка, которая называется **центром масс**. Обычно сила тяжести пропорциональна массе тела, поэтому центр масс совпадает с центром тяжести. Для того чтобы понять различие между центром масс и центром тяжести рассмотрим очень высокий небоскреб прямоугольной формы. Очевидно, что центр масс такого небоскреба будет расположен точно в середине. Теперь найдем положение центра тяжести небоскреба. Как мы знаем, сила тяжести уменьшается с высотой. Поэтому на нижнюю часть небоскреба будет действовать большая по величине сила тяжести, чем на верхнюю его часть. Следовательно, центр тяжести небоскреба будет немного смещен вниз относительно его середины.



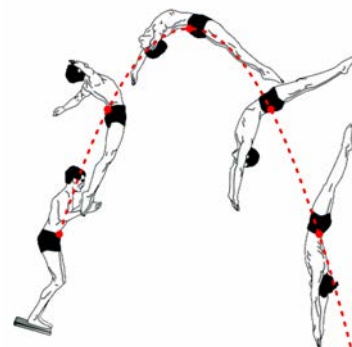
### Чем же замечателен центр масс?

Раньше мы говорили, что тело будет двигаться с постоянной скоростью или покоиться, если на него не действуют внешние силы. На самом деле это верно, только если в задаче можно пренебречь размерами тела. Реальные тела могут вращаться, при этом различные точки тела движутся с разной скоростью.

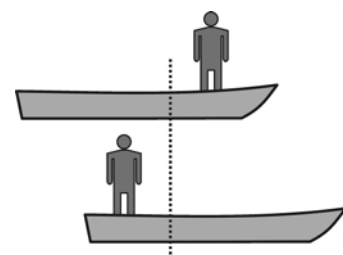
Разумеется, любое, даже очень маленькое тело тоже может вращаться. Но если размеры тела значительно меньше расстояния, которое тело проходит, то вращение тела не существенно влияет на движение отдельных частей тела. Поэтому рассматривая движение маленького тела, описывают только движение его центра масс.

При вращении между отдельными частями тела действуют силы. Такие силы называются внутренними силами. Из-за действия внутренних сил, движение каждой отдельной точки тела может быть достаточно сложным и запутанным. Однако у каждого тела есть одна точка, на движение которой внутренние силы не оказывают никакого влияния, эта точка - центр масс тела. Поэтому движение центра масс происходит под действием только внешних сил.

Например, на соревнованиях по прыжкам в воду спортсмены выполняют различные вращения. При этом отдельные части тела спортсмена могут двигаться сложным образом. Но на движение центра масс влияет только сила тяжести спортсмена. Поэтому центр масс движется также как брошенный камень.



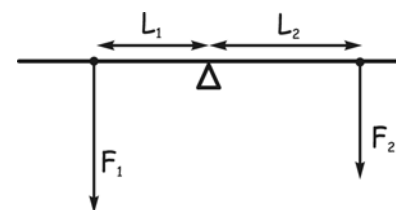
Разберем еще один важный пример. Представим лодку с рыбаком, который стоит на носу. Если рыбак перейдет на корму лодки, центр масс лодки с рыбаком сместится назад относительно лодки. На лодку с рыбаком не действуют внешние силы (мы не будем учитывать силу тяжести и силу Архимеда, которые в данной задаче в точности уравновешивают). Поэтому система "лодка и рыбак" является замкнутой и положение центра масс системы сохраняется. Поэтому когда человек выпрыгивает из лодки на берег, лодка отплывает назад.



### 6.3 Момент силы

В этом разделе мы обобщим правило рычага на случай вращения тела под действием произвольного количества сил, направленных под разными углами.

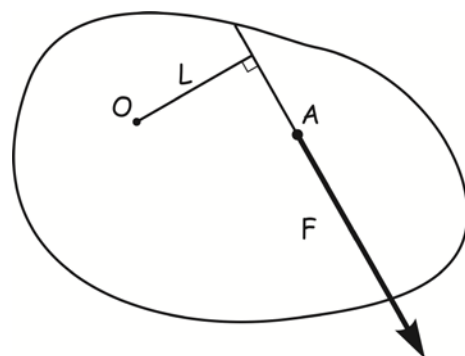
Вначале рассмотрим рычаг, показанный на рисунке. Сила  $F_1$  вращает рычаг против часовой стрелки, а сила  $F_2$  – по часовой стрелке. Для того чтобы рычаг находился в равновесии, необходимо чтобы выполнялось правило рычага  $F_1 \cdot L_1 = F_2 \cdot L_2$ .



Физическая величина, равная произведению силы и соответствующего ей плеча, называется **моментом силы**. Можно сформулировать правило рычага через моменты сил.

**Рычаг находится в равновесии, если момент силы, вращающей рычаг по часовой стрелке, равен моменту силы, вращающей его против часовой стрелки.**

Рассмотрим тело, которое закреплено в точке  $O$  и может свободно вращаться вокруг этой точки. Для того чтобы найти момент силы  $F$  относительно закрепленной точки  $O$  нужно провести прямую, вдоль которой приложена сила, и опустить из точки  $O$  перпендикуляр на эту прямую. Тогда плечо силы  $F$  будет равно длине этого перпендикуляра.



Теперь можно обобщить правило рычага на случай произвольного количества сил и сформулировать условие равновесия тела относительно вращений вокруг закрепленной точки  $O$ . Для того чтобы тело находилось в равновесии, сумма моментов сил, вращающих тело по часовой стрелке, должна быть равна сумме моментов сил, вращающих тело против часовой стрелки.

*А что будет, если к телу приложена только одна сила? (красные буквы в тексте)*

Если сила одна, то равновесие возможно только в случае, когда момент этой силы равен нулю. Поэтому тело повернется так, чтобы закрепленная точка оказалась на линии, вдоль которой приложена сила. Тогда плечо этой силы будет равно нулю. Например, если тело подвесить, оно повернется таким образом, чтобы центр тяжести находился точно под точкой подвеса.

В разделе про центр масс мы говорили, что движение тела можно представить как сумму поступательного движения и вращения вокруг центра масс. Для того чтобы заставить тело вращаться, нужно приложить силу так, чтобы создать момент силы относительно центра масс. Например, для того чтобы закрутить мяч футболист наносит удар вскользь, по касательной к мячу. При этом он создает момент силы относительно центра масс мяча.

Сформулируем условия равновесия тела. Пусть изначально тело покоится. Для того чтобы тело сохраняло состояние покоя необходимо, чтобы одновременно выполнялись два условия:

1. **геометрическая сумма всех действующих на тело сил равна нулю**
2. **сумма моментов сил относительно некоторой точки равна нулю**

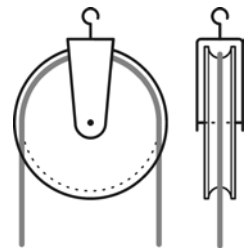
**Замечание 1.** Если тело не вращается, то оно не вращается относительно любой точки. Поэтому второе условие можно записывать относительно любой точки тела.

**Замечание 2.** Приведенные условия равновесия справедливы только в инерциальных системах отсчета. Движение в неинерциальных системах отсчета мы обсудим немного позднее.



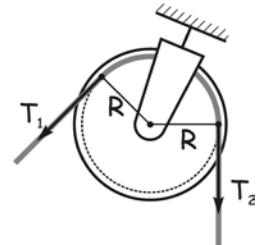
## 6.4 Блоки

Еще одно устройство, которое позволяет получать выигрыш в силе - это **блок**. Блок состоит из колесика с желобом по окружности, которое может вращаться относительно своей оси, закрепленной в неподвижной обойме (см. рисунок). Вокруг блока пропускают веревочку. Желоб нужен именно для того, чтобы веревочка не соскальзывала с блока.



В наших задачах все блоки будут идеальными. Это значит, что массой блока и трением в оси можно пренебречь. Идеальный блок может свободно вращаться относительно своей оси. Поэтому если к такому блоку приложен момент силы, блок будет поворачиваться до тех пор, пока момент не будет скомпенсирован.

На блок действуют три силы: силы натяжения веревочки с двух сторон от блока и сила, которая возникает в оси.



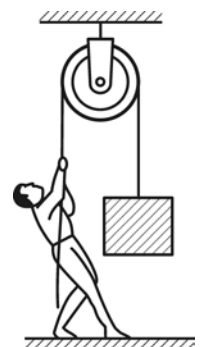
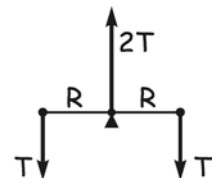
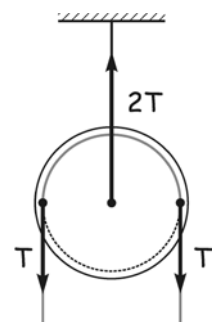
Плечо силы в оси блока равно нулю, поэтому эта сила не создает вращающего момента. Теперь рассмотрим силы натяжения веревочки. Обозначим силу натяжения левой части веревочки  $T_1$ , силу натяжения правой части веревочки  $T_2$ . Эти силы создадут момент сил, вращающий блок. Нетрудно сообразить, что сила натяжения всегда направлена по касательной к блоку, поэтому плечо силы натяжения равно радиусу блока. Сила  $T_1$  вращает блок против часовой стрелки, момент этой силы равен  $RT_1$ . Сила  $T_2$  вращает блок по часовой стрелке, ее момент равен  $RT_2$ . Мы считаем блок идеальным, значит в равновесии сумма моментов сил, вращающих блок, равна нулю. Иначе блок начнет вращаться. Следовательно, в равновесии  $RT_1 = RT_2$ , или если сократить на радиус блока  $T_1 = T_2$ .

Таким образом, мы доказали, что для идеального блока сила натяжения веревочки слева и справа от блока одинакова. Такой блок не изменяет силу натяжения перекинутой через него нити. Поэтому в любой системе из идеальных блоков сила натяжения каждой нити будет одинаковой во всех точках этой нити.

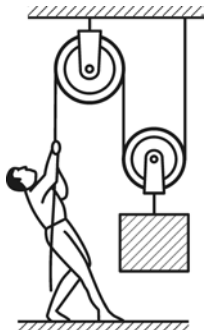
**Замечание.** Для реального блока силы натяжения веревочки могут несколько отличаться из-за силы трения в оси блока. Но радиус оси блока значительно меньше радиуса самого блока. Поэтому плечо силы трения будет маленьким, а значит, разница сил натяжения нити также будет небольшой.

Есть две схемы использования блока. В первом случае закрепляют ось вращения блока. Такой блок называется неподвижным. Неподвижный блок эквивалентен равноплечему рычагу первого рода (см. рисунок). Как мы уже знаем, силы натяжения нити слева и справа от блока равны. Поэтому неподвижный блок не дает выигрыша в силе, но позволяет изменять направление действия силы.

Например, неподвижный блок часто используют для поднятия грузов. Веревку, перекинутую через неподвижный блок, можно тянуть вниз, используя собственную силу тяжести. Обычно это гораздо легче, чем поднимать груз вверх самому.



Заметим, что в точке закрепления неподвижного блока возникает сила, которая в 2 раза больше силы натяжения веревки. Это можно использовать для того чтобы получить выигрыш в силе. Нужно закрепить один конец нити, перекинутой через блок, а груз подвесить к оси блока. Закрепленный таким образом блок называют подвижным. Подвижный блок позволяет получить выигрыш в силе в 2 раза. Поэтому подвижные блоки используют для поднятия тяжелых грузов. Эквивалентная схема подвижного блока приведена на рисунке. Видно, что подвижный блок можно представить как рычаг второго рода.



Так же как и в случае рычага, выигрыш в силе приводит к проигрышу в расстоянии. Чтобы с помощью подвижного блока поднять тело на высоту  $L$  нужно выбрать  $2L$  веревки (см. рисунок).

