

# ДИНАМИКА

**Динамика** — раздел механики, посвящённый изучению движения тел под действием приложенных к ним сил. Слово «динамика» происходит от греч. *dynamis* — «сила».



## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ДИНАМИКИ

### Масса

**Масса** — количественная мера гравитационных и инертных свойств тела.

### Сила

**Сила** — количественная мера взаимодействия тел.

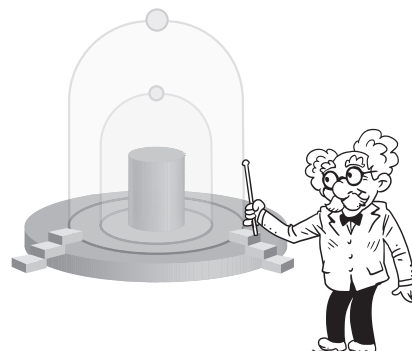
## МАССА ТЕЛА

**Масса тела  $m$**  — физическая величина, являющаяся мерой инертности тела.

Единица измерения массы — килограмм (кг).

Гравитационную (инертную) массу  $m_1$  (или  $m_2$ ) определяют при сравнении её с массой эталонного тела.

При взаимодействии (соударении) двух тел **скорость в большей степени** изменяет то тело, **масса которого меньше**, т. е. тело, имеющее **большую массу**, является **более инертным**.

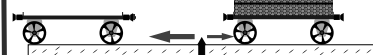


**Эталонное тело** — цилиндр из платиноиридиевого сплава, масса которого принята за 1 кг.

Тела одинаковой массы после взаимодействия разъезжаются с одинаковыми скоростями.



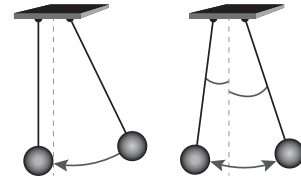
После взаимодействия скорость правого тела меньше, значит, его масса больше.



Реши такую задачу. Передо мной висят два одинаковых на вид шарика, но они выполнены из разного материала. Как без взвешивания определить, который из них тяжелее?

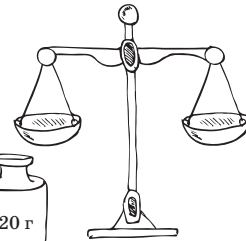
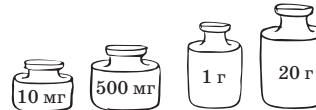


Исходя из того, что тело, имеющее большую массу, является более инертным, можно отвести один шарик от положения равновесия и отпустить его. Какой из шариков после столкновения отклонится на меньший угол, тот и тяжелее. В данном случае можно утверждать, что левый шарик тяжелее.



На практике сравнивать массы тел соударением неудобно, для этого лучше применять весы. Процесс сравнения масс на простых рычажных весах называется **взвешиванием**.

Теперь реши простую задачу на взвешивание. Объект, который я положу на правую чашу весов, будет уравновешен, если на левую чашу положить гири массой 20 г, 1 г, 500 мг, 10 мг. Какова масса объекта, который я хочу взвесить?



Это несложно. Масса взвешиваемого объекта будет равна сумме масс всех гирь:  
 $m = 20 \text{ г} + 1 \text{ г} + 500 \text{ мг} + 10 \text{ мг} = 21 \text{ г } 510 \text{ мг}$ .

## ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВА

**Плотность**  $\rho$  — физическая величина, определяемая для однородного вещества массой его единичного объёма:

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

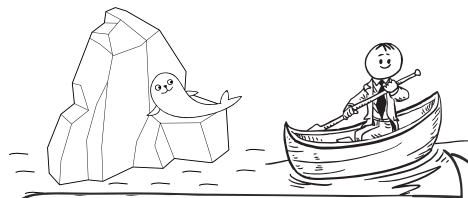
где  $V$  — объём тела.

Единица измерения плотности — килограмм на метр в кубе ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ).

Плотность вещества в твёрдом состоянии почти всегда больше, чем в жидком и тем более в газообразном. Исключение составляет вода:

$$\rho_{\text{воды}} = 1000 \text{ кг/м}^3,$$

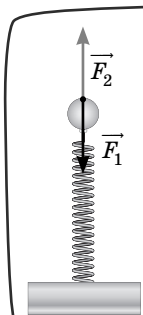
$$\rho_{\text{льда}} = 900 \text{ кг/м}^3.$$



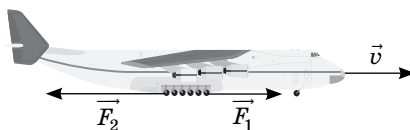
Лёд плавает на поверхности воды, поскольку обладает меньшей плотностью.

## СИЛА

Сила  $\vec{F}$  — векторная величина, характеризующая воздействие одного тела на другое (или воздействие внешнего поля на тело). Единица измерения силы — ньютон (Н).

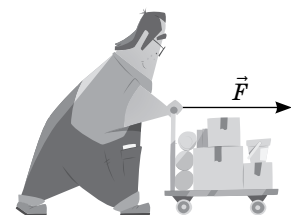


✓  $\vec{F}_1$  — сила тяжести,  
 $\vec{F}_2$  — сила упругости пружины.



✓  $\vec{F}_1$  — сила тяги двигателя,  
 $\vec{F}_2$  — сила сопротивления воздуха,  
 $\vec{v}$  — скорость самолёта.

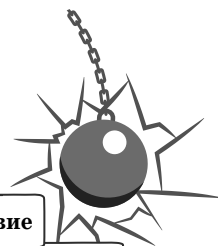
✓  $\vec{F}$  — сила тяги рабочего.



Динамическое действие

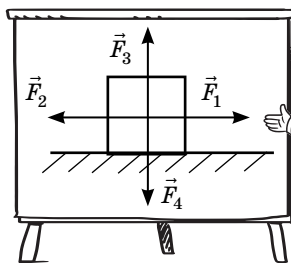
Тело изменяет скорость.

### РЕЗУЛЬТАТ ДЕЙСТВИЯ СИЛЫ



Статическое действие

Тело деформируется.

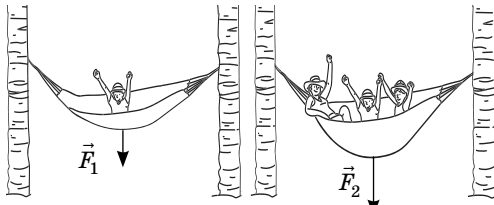


При решении задач для сил, действующих на материальную точку, точкой приложения сил принято считать центр масс тела.

**Центр масс** — точка, в которой сосредоточена вся масса тела.

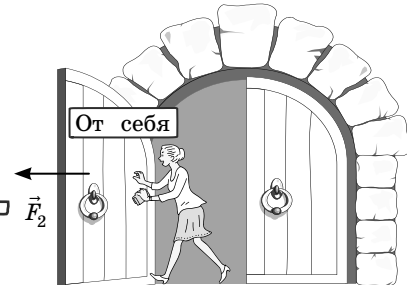
## ФАКТОРЫ, ОТ КОТОРЫХ ЗАВИСИТ РЕЗУЛЬТАТ ДЕЙСТВИЯ СИЛЫ

### Модуль силы



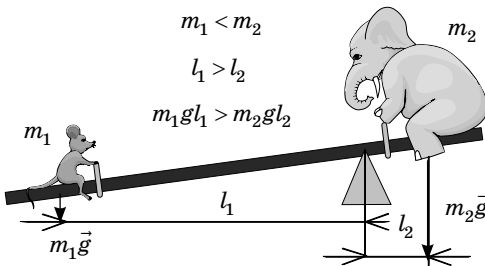
Бóльшая сила вызывает бóльшую деформацию (т. е. чем больше воздействующая сила, тем больше деформация).

### Направление действия силы



Воздействие большой силы в неверном направлении не принесёт желаемого результата (ворота не откроются). В то же время небольшая сила, приложенная в верном направлении и нужном месте, позволит быстро достичь цели (тяжёлые ворота легко отворятся).

### Точка приложения вектора силы



Результат действия силы зависит не только от величины и направления действия силы, но и от точки приложения.

## КЛАССИФИКАЦИЯ СИЛ

### ПО ПРИРОДЕ

- ★ Гравитационные.
- ✓ Сила тяжести, сила тяготения.
- ★ Электромагнитные.
- ✓ Сила упругости, сила трения.
- ★ Ядерные.
- ✓ Слабое взаимодействие.

### ПО ДЕЙСТВИЮ

- ★ На расстоянии.
- ✓ Сила тяжести, сила магнитного взаимодействия.
- ★ При соприкосновении.
- ✓ Сила трения, сила упругости, вес и сила нормальной реакции опоры.

## ПО НАПРАВЛЕНИЮ ВОЗДЕЙСТВИЯ

★ Внутренние.

✓ Силы, возникающие между телами в системе.

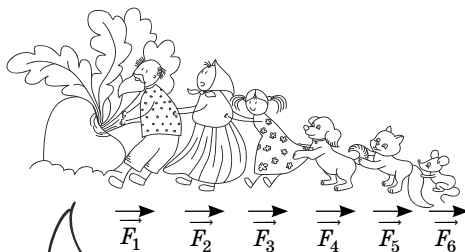
★ Внешние.

✓ Силы, действующие на тела системы извне.

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ДРУГИХ ТЕЛ

При воздействии других тел на движущееся тело его скорость может изменяться не только по модулю, но и по направлению. Физическая природа взаимодействий может быть различной. Воздействие других тел на рассматриваемое тело изображается векторами, число которых равно числу воздействующих тел.

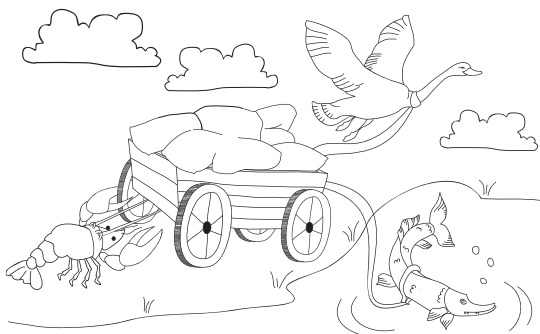
**Равнодействующая нескольких сил** — сила, эквивалентная данной системе сил, т. е. сила, вызывающая такое же механическое воздействие на рассматриваемое тело, что и система сил.



Воздействие на тело нескольких тел:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4 + \vec{F}_5 + \vec{F}_6.$$

Векторы  $\vec{F}_1$ ,  $\vec{F}_2$ ,  $\vec{F}_3$ ,  $\vec{F}_4$ ,  $\vec{F}_5$ ,  $\vec{F}_6$  — силы тяги деда, бабу, внуки, Жучки, кошки, мышки;  $\vec{F}$  — равнодействующая всех сил.



На первый взгляд кажется, что результат равнодействующей сил хорошо представлен в басне И. А. Крылова «Лебедь, щука и рак»: «А воз и ныне там!», т. е. равнодействующая сил персонажей басни эквивалентна отсутствию действия. Рассмотрим их взаимное действие с точки зрения механики. Для простоты предположим, что лебедь вертикально «рвётся к облакам», пусть его сила компенсирует вес воза, ведь груз невелик («поклажа бы для них казалась и легка»). Тогда остаются только две силы: тяга рака и тяга щуки, которые не направлены вдоль одной прямой: «Рак пятится назад, а щука тянет в воду». Следовательно, силы рака и щуки направлены под некоторым углом друг к другу и равнодействующая их никак не может быть равна нулю.



## ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ СИЛ

Если на тело действует несколько сил, то равнодействующую сил находят согласно **принципу суперпозиции сил** как векторную сумму всех сил, действующих на тело:

$$\vec{F}_{\text{равн}} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_N.$$

### Координатный способ

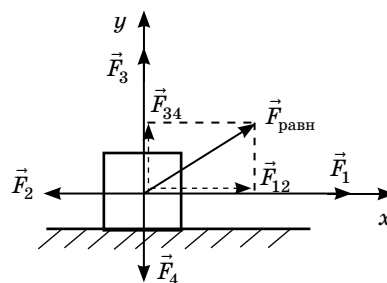
$$Ox: F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} + F_{4x} = F_{\text{равн.}x}$$

$$Oy: F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} + F_{4y} = F_{\text{равн.}y}$$

$$F = \sqrt{F_{\text{равн.}x}^2 + F_{\text{равн.}y}^2}$$

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАВНОДЕЙСТВУЮЩЕЙ СИЛ

#### Векторный способ



$$\vec{F}_{12} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 \quad \vec{F}_{34} = \vec{F}_3 + \vec{F}_4$$

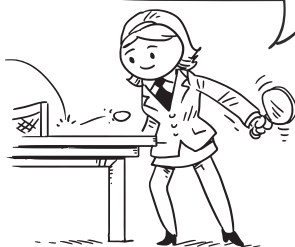
$$\vec{F} = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{34} \quad F = \sqrt{F_{12}^2 + F_{34}^2}$$

## ЯВЛЕНИЕ ИНЕРЦИИ, ИНЕРТНОСТЬ

**Инертность** — физическое свойство, заключающееся в том, что любое тело оказывает сопротивление изменению его скорости (как по модулю, так и по направлению).

**Масса** — мера инертности.

Например, легко остановить летящий теннисный мяч или изменить направление его движения.



В то же время железнодорожный вагон трудно сдвинуть с места, но, если он начнёт двигаться, остановить его будет сложно.

**Инерция** — явление сохранения состояния движения или покоя при отсутствии внешних воздействий.

**Движение по инерции** — движение тела, происходящее без внешних воздействий.

### ПРИНЦИП ИНЕРЦИИ

Если на тело не действуют внешние силы, то оно сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения.



## ЗАКОНЫ НЬЮТОНА

Законы Ньютона лежат в основе классической (ньютоновской) механики, устанавливают зависимости между характером движения тел и силами, действующими на них. Законы Ньютона используют для расчётов взаимодействий как на Земле, так и в космосе: запуск ракет, разработка новых двигателей, строительство мостов, домов, скоростных трасс и т. д.

Исаак Ньютон — один из создателей классической физики.



### ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА. ИСО

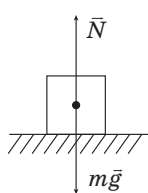
#### ФОРМУЛИРОВКА 1

Материальная точка (тело) сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока воздействие со стороны других тел не заставит её (его) изменить это состояние.

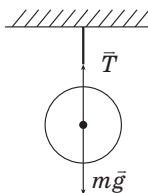
#### ФОРМУЛИРОВКА 2

Существуют такие системы отсчёта, относительно которых тело движется прямолинейно и равномерно или покоится, если на него не действуют другие тела или действие тел скомпенсировано. Такие системы называются инерциальными системами отсчёта (ИСО).

#### ТЕЛО ПОКОИТСЯ



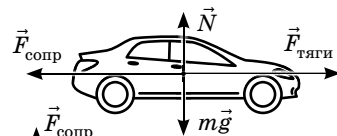
$$\vec{N} + m\vec{g} = 0$$



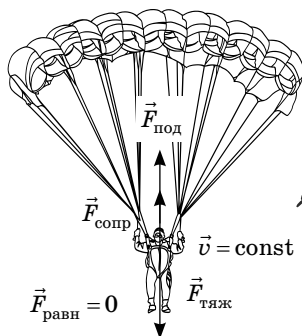
$$\vec{T} + m\vec{g} = 0$$

#### ТЕЛО ДВИЖЕТСЯ РАВНОМЕРНО И ПРЯМОЛИНЕЙНО

$$\vec{F}_{\text{сопр}} + \vec{F}_{\text{тяги}} + \vec{N} + m\vec{g} = 0$$



$$\vec{F}_{\text{сопр}} + m\vec{g} = 0$$



Парашютист спускается равномерно и прямолинейно, так как равнодействующая сил, действующих на него, равна нулю. Действие силы тяжести компенсируется силой сопротивления и подъёмной силой, действующими на парашют.

**Инерциальная система отсчёта (ИСО)** — система отсчёта, в которой тело, не взаимодействующее с другими телами, сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения. Системы отсчёта, в которых принцип инерции не выполняется, называют **неинерциальными**.

При резком торможении автобуса пассажира отбрасывает вперёд, в сторону движения. Следовательно, скорость пассажира относительно автобуса изменяется в отсутствие внешних сил. Система отсчёта, связанная с автобусом, является неинерциальной, так как его скорость меняется (автобус тормозит).



Земля — ИСО. Остальные ИСО движутся относительно Земли с  $\vec{v} = \text{const}$ .

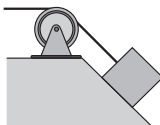
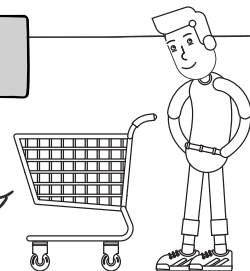


Ключевые слова для определения принадлежности СО к ИСО: «прямолинейно и равномерно» или «покоится».



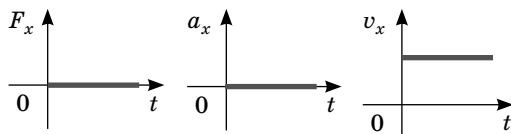
**Первый закон Ньютона объясняет причину равномерного прямолинейного движения или покоя.**

Тележка никуда не едет, так как на неё не действуют тела, способные привести её в движение.



Когда ящик поднимают вверх по наклонной плоскости с постоянной скоростью, векторная сумма всех сил, действующих на ящик, равна нулю, поскольку система отсчёта, связанная с наклонной плоскостью, является инерциальной (покоится относительно Земли).

Следует помнить, что при равномерном движении равнодействующая сил и ускорение равны нулю, значит, графики этих величин совпадают с осью  $Ox$ .



Во Вселенной практически невозможно найти тело, не испытывающее внешних воздействий, и непосредственно экспериментально подтвердить первый закон Ньютона. Понятие инерциальной системы отсчёта является идеализацией.





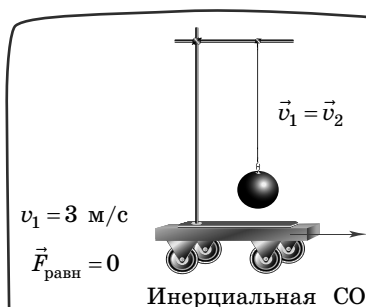
## ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ГАЛИЛЕЯ

Принцип относительности Галилея был сформулирован для любых физических явлений. Это означает, что при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой математические формулы, описывающие законы механики, не изменяются. Все инерциальные системы отсчёта равноправны.

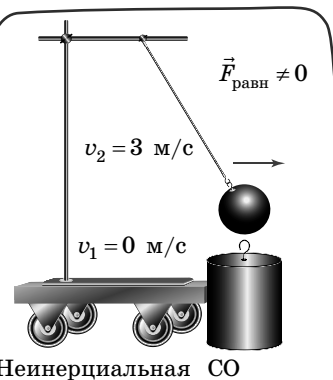
### ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ГАЛИЛЕЯ

Во всех инерциальных системах отсчёта законы классической динамики имеют один и тот же вид.

Впервые принцип относительности установил итальянский учёный Галилео Галилей в 1636 г.

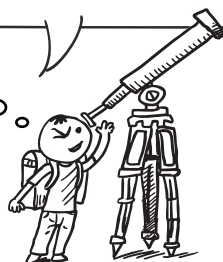
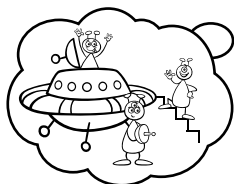
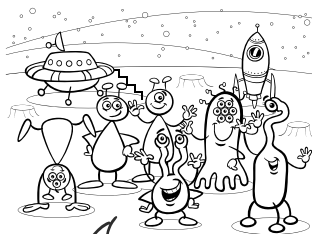


Скорости шарика и тележки относительно Земли одинаковые (выполняется закон сложения скоростей:  $\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{u}$ ).



Скорости шарика и тележки относительно Земли разные (не выполняется закон сложения скоростей).

Известно, что Земля движется относительно Солнца со скоростью 30 км/с. Марс движется вокруг Солнца со скоростью 25 км/с. Если бы существовала марсианская цивилизация, то её закон сохранения механической энергии совпадал бы с земным?



Если бы существовала марсианская цивилизация, то её учёные установили бы точно такие же законы сохранения механической энергии.



Второй закон Ньютона объясняет причину равноускоренного движения.



Чем больше товара нагружено в тележку, тем меньшее ускорение можно ей сообщить, действуя с одинаковыми силами.



В инерциальной системе отсчёта некоторая сила сообщает телу массой 8 кг ускорение  $5 \text{ м/с}^2$ . Какое ускорение в той же системе отсчёта сообщит та же сила телу массой 5 кг?

Дано:

$$m_1 = 8 \text{ кг}$$

$$a_1 = 5 \text{ м/с}^2$$

$$F_1 = F_2 = F$$

$$m_2 = 5 \text{ кг}$$

$$a_2 = ?$$

Решение:

По второму закону Ньютона

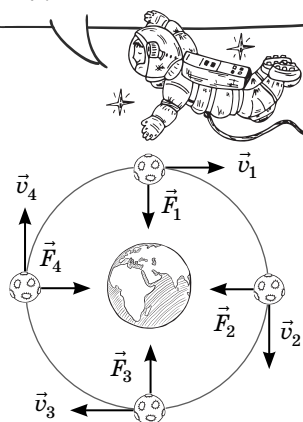
$$F = m_1 \cdot a_1 = m_2 \cdot a_2.$$

$$\text{Отсюда: } a_2 = \frac{m_1}{m_2} \cdot a_1.$$

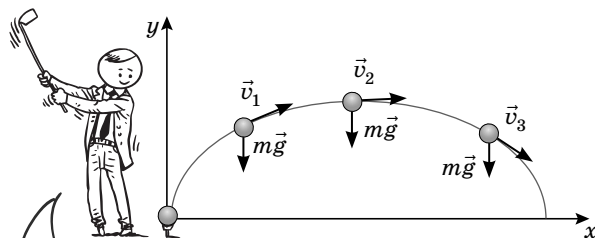
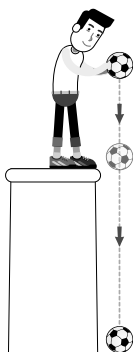
$$a_2 = \frac{8 \text{ кг}}{5 \text{ кг}} \cdot 5 \text{ м/с}^2 = 8 \text{ м/с}^2.$$

**Ответ:**  $a_2 = 8 \text{ м/с}^2$ .

Сила — причина изменения направления движения.



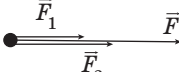
Сила — причина изменения модуля скорости.



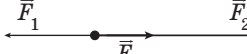
Сила — причина изменения вектора скорости.

## СЛОЖЕНИЕ ДВУХ СИЛ, НАПРАВЛЕННЫХ ВДОЛЬ ОДНОЙ ПРЯМОЙ

В одном направлении

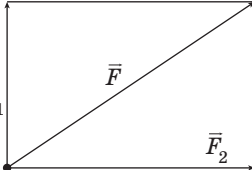
$$\vec{F}_1 \uparrow \vec{F}_2, \quad F = F_1 + F_2$$


В противоположных направлениях

$$\vec{F}_1 \uparrow \vec{F}_2, \quad F = |F_1 - F_2|$$


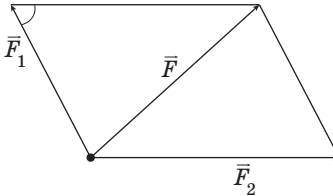
## СЛОЖЕНИЕ ДВУХ СИЛ, НАПРАВЛЕННЫХ ПОД УГЛОМ ДРУГ К ДРУГУ

$\alpha = 90^\circ$  (по теореме Пифагора)



$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$$

$\alpha \neq 90^\circ$  (по теореме косинусов)

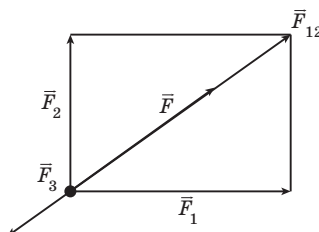


$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 - 2F_1 \cdot F_2 \cdot \cos \alpha}$$

## СЛОЖЕНИЕ ТРЁХ СИЛ И БОЛЕЕ

Векторный способ

Используем правила сложения векторов (правило треугольника и параллелограмма).

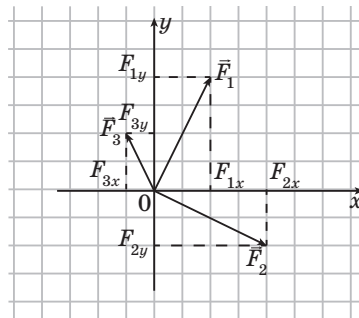


$$\vec{F}_{12} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

$$\vec{F} = \vec{F}_{12} + \vec{F}_3, \quad F = |F_{12} - F_3|$$

Координатный способ

Используем правило сложения проекций.



$$Ox: F_x = F_{1x} + F_{2x} + F_{3x}$$

$$Oy: F_y = F_{1y} + F_{2y} + F_{3y}$$

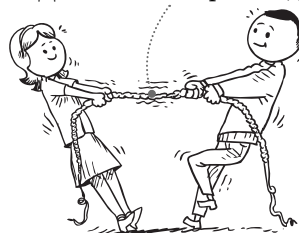
$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

## ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА ДЛЯ МАТЕРИАЛЬНЫХ ТОЧЕК

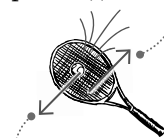
### ФОРМУЛИРОВКА НЬЮТОНА

Любому действию всегда препятствует равное по модулю и противоположное по направлению противодействие.

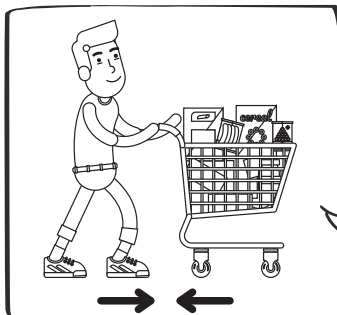
Действие и противодействие



Противодействие



Действие



Третий закон Ньютона объясняет, что происходит со взаимодействующими телами.

С какой силой мы действуем на тележку, с такой же силой тележка действует на нас.

Равенство сил действия и противодействия при столкновении двух одинаковых шаров:

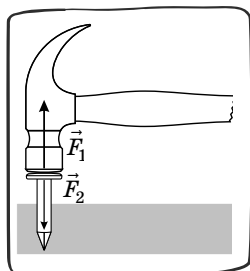
$\vec{F}_{12}$  — сила, действующая со стороны второго шара на первый;

$\vec{F}_{21}$  — сила, действующая со стороны первого шара на второй



Силы воздействия материальных точек друг на друга равны по модулю и противоположны по направлению:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}.$$



**ВАЖНО!** Данные силы нельзя складывать, так как они приложены к разным телам.

$\vec{F}_1$  — сила, действующая со стороны гвоздя на молоток;

$\vec{F}_2$  — сила, действующая со стороны молотка на гвоздь

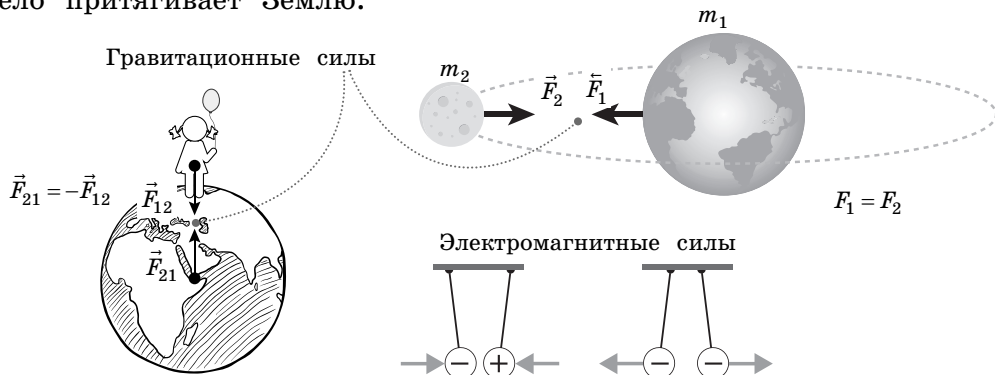
### СВОЙСТВА ДАННЫХ СИЛ

★ Лежат на одной прямой, соединяющей центры масс тел.

★ Равны по модулю.

★ Имеют одну природу.

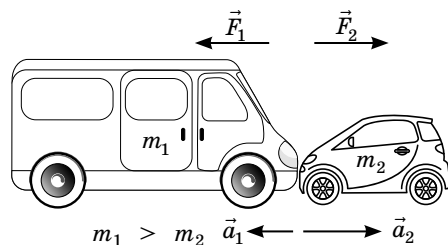
Третий закон Ньютона применим в любой системе отсчёта, не только в инерциальной. Этот закон актуален не только для механики. Например, электрические шарики притягиваются с равными по модулю и противоположными по направлению силами. Сила, с которой Земля притягивает тело, равна силе, с которой тело притягивает Землю.



### СЛЕДСТВИЕ

Ускорения, полученные при взаимодействии двух тел, обратно пропорциональны их массам:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}$$



## ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

**Закон всемирного тяготения.** Между двумя любыми материальными точками действует сила взаимного притяжения, прямо пропорциональная произведению масс этих точек, обратно пропорциональная квадрату расстояния между ними, направленная вдоль прямой, соединяющей материальные точки:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R_{12}^2},$$

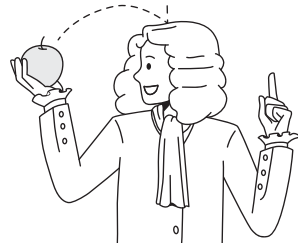
где  $m_1, m_2$  — массы тел,  $R_{12}$  — расстояние между центрами масс тел,  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$  — гравитационная постоянная.

### УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ФОРМУЛЫ

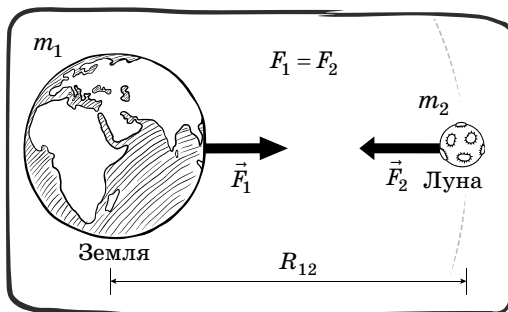
- ★ Если тела можно рассматривать как материальные точки.
- ★ Если тела не являются материальными точками, но тело малых размеров находится около однородного шара.
- ★ Рассматриваются два однородных шара.



Закон всемирного тяготения был открыт в XVII в. И. Ньютоном и дал колоссальный импульс развитию физики. В 1665 г. молодой учёный И. Ньютон выдвинул гипотезу, что силы, удерживающие Луну около Земли, той же природы, что и силы, заставляющие яблоко падать на Землю.



Силы лежат на одной прямой, соединяющей центры масс этих тел, и направлены навстречу друг другу.



Силы всемирного тяготения, действующие на два взаимодействующих тела:  
 $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$  — силы взаимодействия,  $m_1$  и  $m_2$  — массы взаимодействующих тел,  $R_{12}$  — расстояние между ними

## ГРАВИТАЦИОННЫЕ СИЛЫ

Силы, с которыми тела, обладающие массой, притягиваются друг к другу, называются **гравитационными силами**.

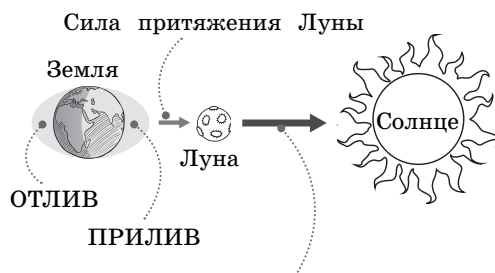
**Гравитационная постоянная** численно равна силе гравитационного притяжения двух тел массой 1 кг каждое, находящихся на расстоянии 1 м друг от друга. Английский физик Г. Кавендиш экспериментально определил её численное значение:  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$ , что по-



Масса Земли —  $5973 \times 10^{21}$  кг.

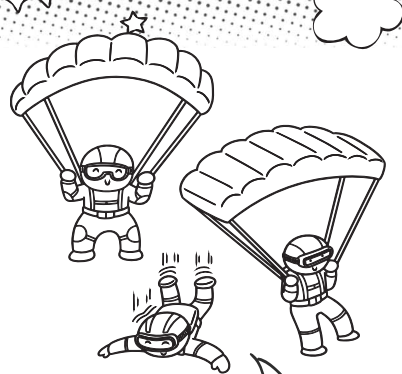
зволило достаточно точно рассчитать массу Земли.

Действием гравитационных сил объясняются движение Земли вокруг Солнца, движение Луны вокруг Земли, приливы и отливы на нашей планете. Земля действует на Луну с такой же силой, с какой Луна действует



Гравитация Солнца влияет и на Землю, и на Луну

на Землю. Результатом действия Луны являются приливы и отливы на Земле. Луна притягивает приближённую к ней массу воды, вызывая высокий прилив, а с противоположной стороны океана происходит в это время низкий отлив.



Действие гравитационных сил становится заметным лишь при очень больших массах — порядка  $10^6$  кг. Именно эти силы удерживают планеты на своих орбитах при движении вокруг Солнца.



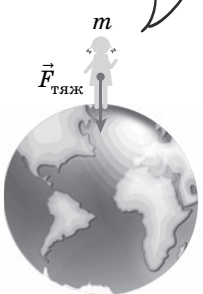
Слово «гравитация» происходит от лат. *gravitas* — «вес, тяжесть». Свободное падение тел на поверхность Земли объясняется наличием их притяжения к нашей планете.

## СИЛА ТЯЖЕСТИ

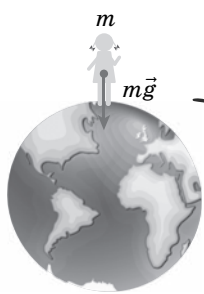
**Сила тяжести** — гравитационная сила, действующая на любое тело со стороны планеты Земля.

Сила тяжести, действующая на тело массой  $m$  со стороны планеты Земля.

Точка приложения силы тяжести — центр тяжести тела.



Земля



Земля

Силу тяжести принято обозначать формулой  $m\vec{g}$ . Знак вектора (стрелку) следует ставить только над векторной величиной — ускорением свободного падения.

Для тел массой  $m$ , расположенных близко к поверхности Земли, установлено, что сила притяжения примерно равна:

$$F_{\text{тяж}} = m \cdot g,$$

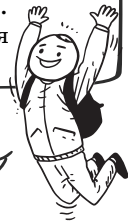
где  $m$  — масса тела,  $g \approx G \cdot \frac{M_3}{R_3^2} \approx 9,8 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения.



Спортсмен совершает прыжок с шестом. В каком из случаев сила тяжести действует на спортсмена?

- 1) Когда он разбегается.
- 2) Когда он сгибает шест в начале прыжка.
- 3) Когда он падает вниз после преодоления планки.

Сила тяжести действует на спортсмена во всех трёх случаях.



## УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ

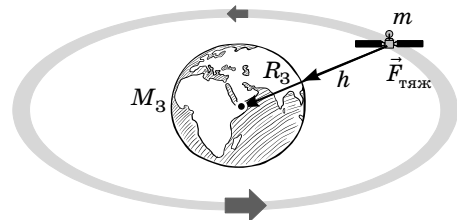
**Ускорение свободного падения** около поверхности Земли — ускорение, с которым движется любое тело в поле тяготения Земли, если на него действует только сила тяжести. Ускорение свободного падения зависит от географической широты, от высоты  $h$  над поверхностью Земли.

При решении задач ускорение свободного падения около поверхности Земли принимают равным  $g \approx 10 \text{ м/с}^2$ .



$$g = G \frac{M_3}{(R_3 + h)^2},$$

где  $R_3$  — радиус Земли,  $M_3$  — масса Земли,  $m$  — масса тела.



## ЗАВИСИМОСТЬ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ ОТ ВЫСОТЫ $h$ НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ПЛАНЕТЫ РАДИУСОМ $R_0$

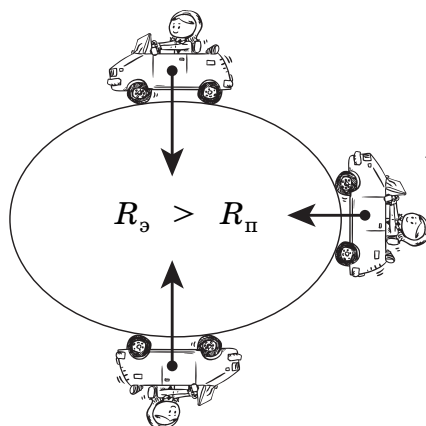
При удалении от поверхности Земли сила тяжести и ускорение свободного падения **уменьшаются**.

Если тело находится на расстоянии  $h$  от поверхности Земли, то силу тяжести следует вычислять по формуле:

$$F_{\text{тяж}} = G \cdot \frac{m \cdot M_3}{(R_0 + h)^2} = m \cdot g,$$

где  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{кг}^2}$  — гравитационная постоянная,  $m$  — масса тела,  $M_3$  — масса планеты Земля,  $R_0$  — радиус Земли,

$g \approx G \cdot \frac{M_3}{(R_0 + h)^2}$  — ускорение свободного падения на расстоянии  $h$  от поверхности Земли.



Расстояние от центра до поверхности Земли на полюсе и на экваторе разное, следовательно, ускорение свободного падения имеет разные значения и разные силы тяжести действуют на одно и то же тело.  
 На полюсах Земли —  $g \approx 9,83 \text{ м/с}^2$ .  
 На экваторе Земли —  $g \approx 9,78 \text{ м/с}^2$ .

Формулы для расчета силы тяжести и ускорения свободного падения на любом небесном теле (планете, спутнике планеты и т. д.) аналогичны формулам, применимым для Земли:

$$F_{\text{тяж. пл}} = G \frac{M_{\text{пл}} m}{(R_{\text{пл}} + h)^2}, \quad g_{\text{тяж. пл}} = G \frac{M_{\text{пл}}}{(R_{\text{пл}} + h)^2}.$$

Мяч массой 300 г брошен под углом  $60^\circ$  к горизонту с начальной скоростью 20 м/с. Чему равен модуль силы тяжести, действующей на мяч в верхней точке траектории?

**Дано:**

$$m = 300 \text{ г} = 0,3 \text{ кг}$$

$$\alpha = 60^\circ$$

$$v = 20 \text{ м/с}$$

$$g \approx 10 \text{ м/с}^2$$

$$F_{\text{тяж}} = ?$$

**Решение:**

Сила тяжести действует на мяч на протяжении всего полёта (как и в верхней точке траектории) и равна:

$$F_{\text{тяж}} = m \cdot g.$$

$$F_{\text{тяж}} = 0,3 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2 = 3 \text{ Н}.$$

**Ответ:**  $F_{\text{тяж}} = 3 \text{ Н}.$

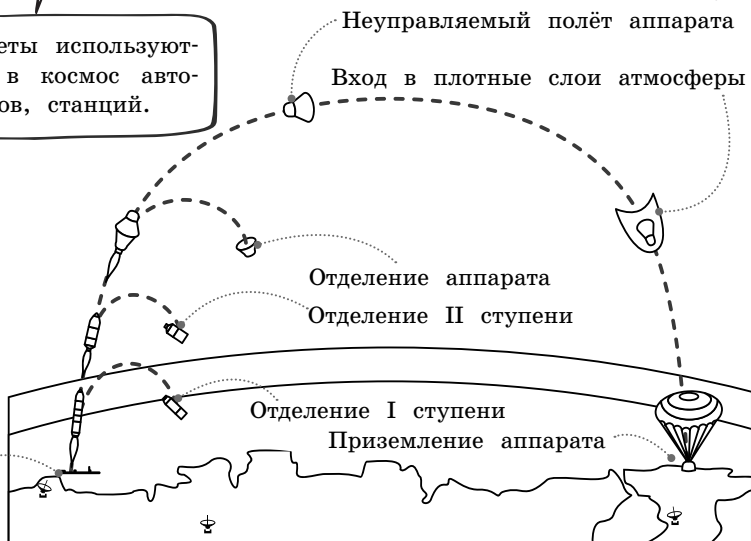
## БАЛЛИСТИКА

**Баллистика** — наука о движении тел, брошенных в пространстве, основанная на математике и физике.

Баллистические ракеты используются для выведения в космос автоматических спутников, станций.



Старт ракеты



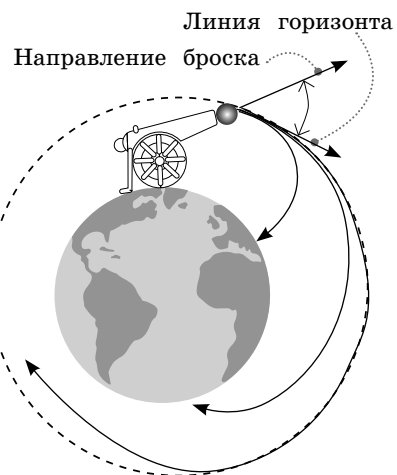
## ДВИЖЕНИЕ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ И ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ

Все тела, брошенные с поверхности Земли с некоторой начальной скоростью, падают на Землю вследствие притяжения к Земле. Но при этом планеты не падают на Солнце, а спутники не падают на планеты.

### ПЕРВАЯ КОСМИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ

**Первая космическая скорость (круговая скорость)** — минимальная (для заданной высоты над поверхностью планеты) горизонтальная скорость, которую необходимо придать объекту, чтобы он совершал движение по круговой орбите вокруг планеты, не меняя высоты (стал искусственным спутником планеты).

Первая космическая скорость движения спутника по круговой орбите в непосредственной близости от поверхности небесного тела достигается под действием только силы гравитационного притяжения (силы тяжести). Поскольку движение происходит по круговой орбите с постоянной скоростью, то ускорение свободного падения, направленное к центру небесного тела, можно назвать также центростремительным ускорением.





Кто из учёных первым осознал возможность преодоления силы гравитации?

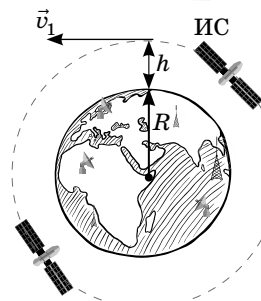
Ещё в XVIII в. И. Ньютон обосновал, что для тела, брошенного с определённой высоты, можно подобрать такую скорость, что тело не упадёт на Землю, а будет двигаться вокруг неё на одном и том же расстоянии от поверхности. При такой скорости тело будет удаляться от поверхности Земли на столько, на сколько оно приближается к ней вследствие действия сил гравитации. Много лет спустя это обоснование позволило запустить искусственный спутник на орбиту Земли.

### СПУТНИКИ

Тело становится спутником (обращается по траектории, близкой к круговой), если центростремительное ускорение тела равно ускорению свободного падения на планете, т. е.

$$a_{ц} = \frac{v^2}{R_0} = g, \text{ откуда } v = \sqrt{g \cdot R_0},$$

где  $R_0$  — радиус планеты,  $g$  — ускорение свободного падения вблизи поверхности планеты,  $v$  — скорость спутника.



Движение искусственного спутника вблизи планеты:

$\vec{v}_1$  — скорость искусственного спутника; ИС — искусственный спутник;  $R$  — радиус планеты;  $h$  — высота над поверхностью планеты

### ПЕРВАЯ КОСМИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ ДЛЯ ПЛАНЕТЫ ЗЕМЛЯ

$$v_1 = \sqrt{g \cdot R_0} = \sqrt{9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}} = 7900 \text{ м/с} = 7,9 \text{ км/с},$$

где  $R_0 \approx 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}$  — радиус Земли,  $g \approx 9,8 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения.

Если высотой спутника над поверхностью Земли нельзя пренебречь, то формула для определения первой космической скорости приобретает вид:

$$v_1 = \sqrt{gR} = \sqrt{G \frac{M_0}{(R_0 + h)^2} \cdot (R_0 + h)} = \sqrt{G \frac{M_0}{R_0 + h}}.$$

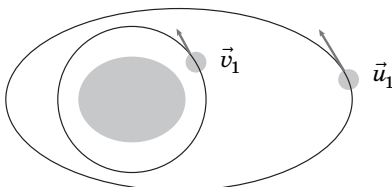
С увеличением высоты орбиты круговая скорость уменьшается.



## ТРАЕКТОРИЯ ДВИЖЕНИЯ

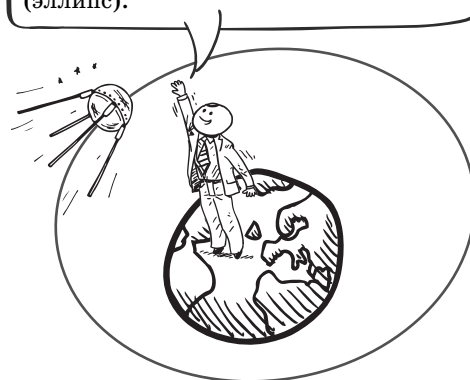
### Первая космическая скорость

Окружность или эллипс (траектория, близкая к окружности).



$\vec{v}_1$  и  $\vec{u}_1$  — первые космические скорости разных тел, причём  $\vec{v}_1 < \vec{u}_1$ .

С увеличением скорости изменяется траектория движения спутника. Чем больше скорость спутника, тем более вытянута траектория (эллипс).



## ВТОРАЯ КОСМИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ

**Вторая космическая скорость (параболическая скорость)** — скорость, которую необходимо придать космическому аппарату, масса которого пренебрежимо мала по сравнению с массой планеты, для преодоления гравитационного притяжения планеты и покидания замкнутой орбиты вокруг неё.

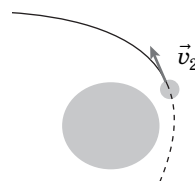
### ВТОРАЯ КОСМИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ ДЛЯ ПЛАНЕТЫ ЗЕМЛЯ

$$v_2 = \sqrt{2} \cdot v_1 = \sqrt{\frac{2GM}{R_0}} = 11,2 \text{ км/с}$$

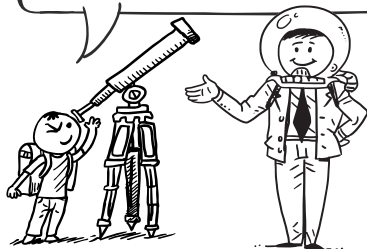
### ТРАЕКТОРИЯ ДВИЖЕНИЯ

#### Вторая космическая скорость

Парабола



Как далеко от поверхности Земли может улететь космический корабль, если он будет двигаться со второй космической скоростью — 11,2 км/с?



При такой скорости тело способно удалиться от Земли, космический корабль становится спутником Солнца. Для путешествия к другим планетам Солнечной системы аппаратам надо сообщить именно вторую космическую скорость.

## ТРЕТЬЯ КОСМИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ

**Третья космическая скорость** — скорость, при которой тело преодолевает притяжение Солнца.

### ТРЕТЬЯ КОСМИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ ДЛЯ ПЛАНЕТЫ ЗЕМЛЯ

16,7 км/с

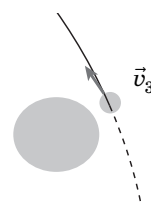
Если космический корабль сможет разогнаться до третьей космической скорости (16,7 км/с), как далеко он сможет улететь?

При такой скорости тело способно покинуть пределы Солнечной системы.

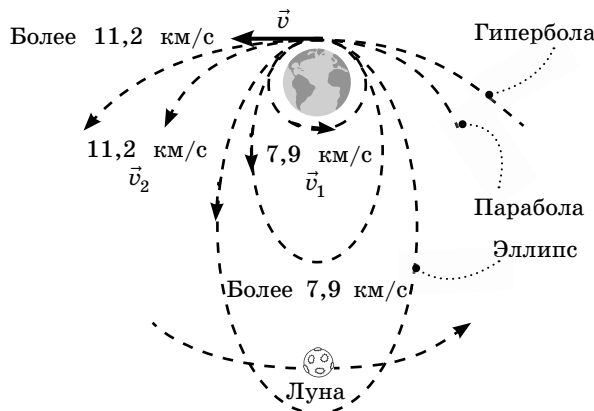
### ТРАЕКТОРИЯ ДВИЖЕНИЯ

Третья космическая скорость

Гипербола



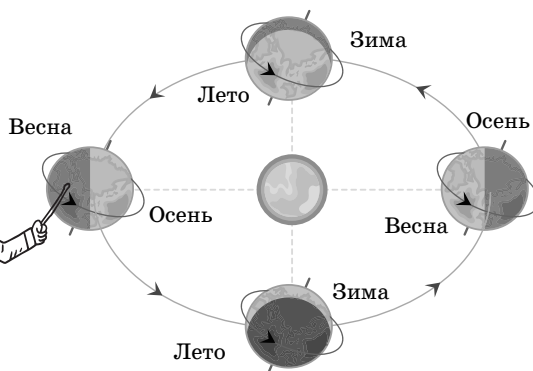
Гипербола приближается к прямой линии.



Средняя скорость движения Земли по орбите вокруг Солнца равна 108 000 км/ч, а средняя скорость движения Солнца по своей орбите составляет 782 000 км/ч.



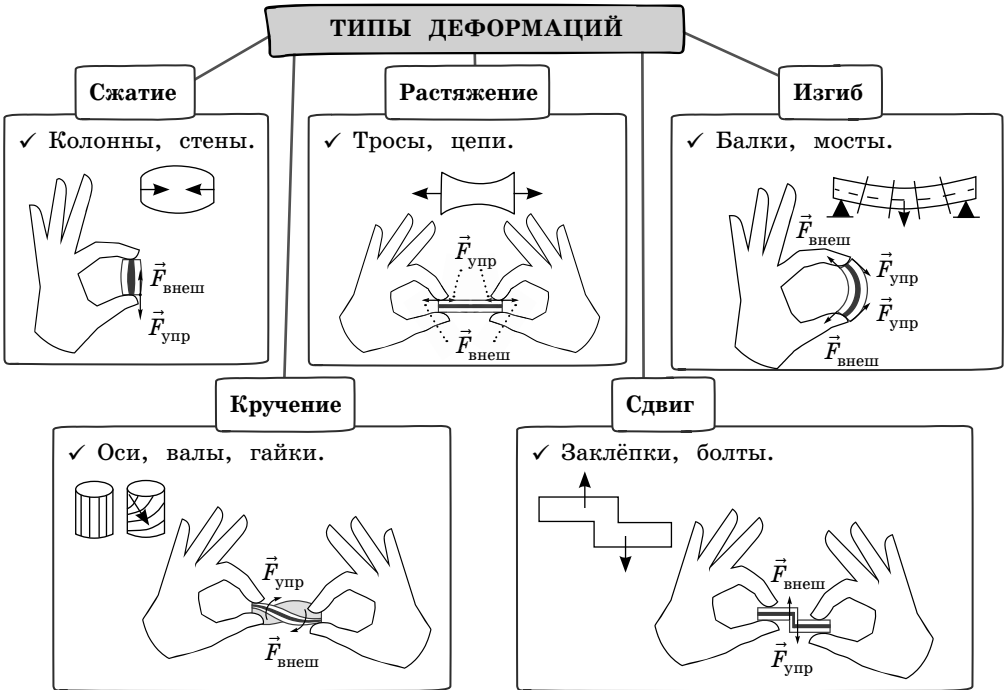
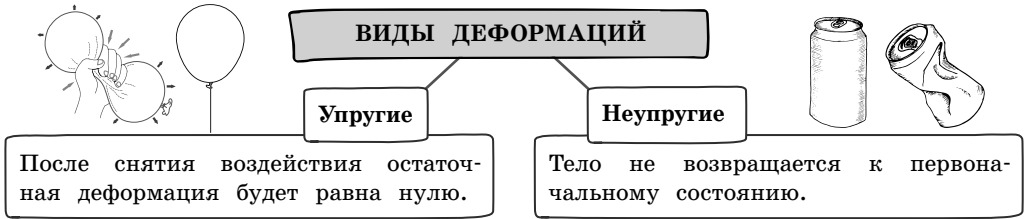
Смена времён года объясняется углом наклона земной оси к направлению движения, а не изменением расстояния до Солнца, так как именно постоянство наклона Земли к плоскости своей орбиты обеспечивает различную освещённость участков Земли при движении вокруг светила.



# ДЕФОРМАЦИЯ

**Деформацией** называют изменение формы, размеров или объёма тела. Деформация может быть вызвана действием на тело приложенных к нему внешних сил.

При деформации возникает сила, которая стремится восстановить прежние размеры и форму тела. Эта сила является следствием электромагнитного взаимодействия между атомами и молекулами вещества.



# СИЛА УПРУГОСТИ

Сила, возникающая в теле при деформации и направленная против вызываемого деформацией смещения частиц тела, называется **силой упругости**.

Сила упругости, как и все силы, измеряется в ньютонах (Н).

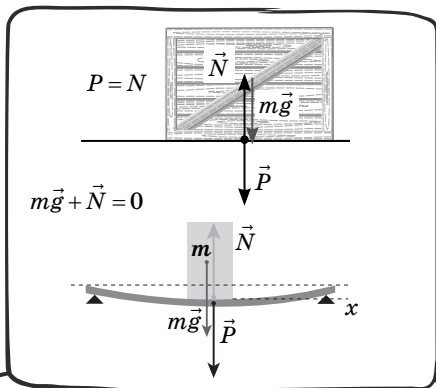
**Упругость** — свойство тел изменять форму и размеры под действием внешних сил и самопроизвольно восстанавливать исходную конфигурацию при прекращении воздействий.

### СИЛА НОРМАЛЬНОЙ РЕАКЦИИ ОПОРЫ

Силу упругости, действующую на тело со стороны опоры или подвеса, называют **силой нормальной реакции опоры**  $\vec{N}$  (Н). Она всегда перпендикулярна поверхности или направлена вдоль оси подвеса, численно равна весу тела и направлена в противоположную ему сторону (по третьему закону Ньютона). И если вес (сила нормального давления) действует со стороны тела на опору, то сила реакции опоры действует со стороны опоры на тело.

#### НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

На горизонтальной поверхности модуль силы нормальной реакции опоры равен весу тела (по третьему закону Ньютона) и модулю силы тяжести, так как их равнодействующая равна нулю.

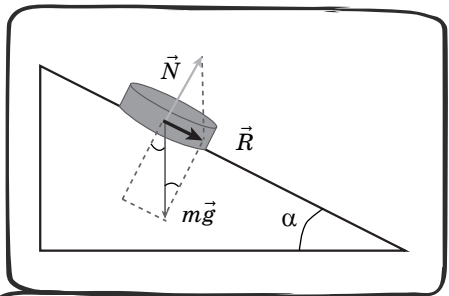


Действие силы упругости:  
 $m\vec{g}$  — сила тяжести, действующая на брусок массой  $m$ ,  $\vec{P}$  — сила, действующая на перекладину или подвес вследствие воздействия силы тяжести и вызывающая деформацию  $x$ ,  $\vec{N}$  — противодействующая сила — сила упругости, сила нормальной реакции опоры

#### НА ГЛАДКОЙ НАКЛОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Сила реакции опоры направлена всегда перпендикулярно к поверхности:

$$N = mg \cdot \cos\alpha.$$



Равнодействующая сил при отсутствии силы трения:  
 $m\vec{g}$  — сила тяжести,  $\vec{N}$  — сила нормальной реакции опоры

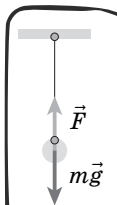
$m\vec{g} + \vec{N} = m\vec{a}$  — равнодействующая этих сил **не равна нулю**, т. е. при отсутствии силы трения тело будет двигаться вниз по наклонной плоскости с ускорением.

## СИЛА НАТЯЖЕНИЯ

**Сила натяжения** — сила упругости, действующая на тело со стороны нити или пружины.

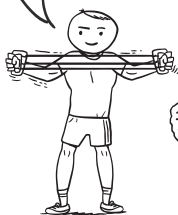
### В ПОЛОЖЕНИИ РАВНОВЕСИЯ

Равнодействующая этих сил равна нулю.



Сила натяжения нити в положении равновесия при условии  $v=0$ :  
 $m\vec{g}$  — сила тяжести,  
 $\vec{F}$  — сила натяжения (общепринятое обозначение —  $\vec{T}$ )

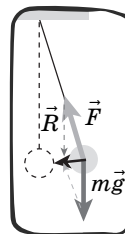
Где в быту мы можем наблюдать силу натяжения? Какие особенности есть у этой силы?



Длина тела, к которому приложена сила, обычно многократно больше, чем его толщина. Примерами таких объектов являются верёвка, канат, трос, леска, проволока. При проектировании строительных объектов (мостов, спортивных сооружений, смотровых башен) производят расчёт силы натяжения с запасом.

### ПРИ ОТКЛОНЕНИИ ОТ ПОЛОЖЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ

$\vec{R} = m\vec{g} + \vec{F}$  — равнодействующая сил **не равна нулю**, т. е. при отсутствии других сил тело будет двигаться к положению равновесия с ускорением.



Сила натяжения нити при отклонении от положения равновесия:  
 $m\vec{g}$  — сила тяжести,  
 $\vec{F}$  — сила натяжения

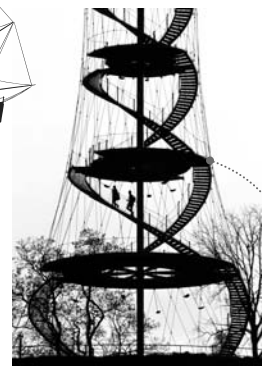
Корабельный такелаж



Строительный отвес



Крыша Олимпийского парка (Мюнхен)



Смотровая площадка башни Киллесберг (Штутгарт)

## ЗАКОН ГУКА

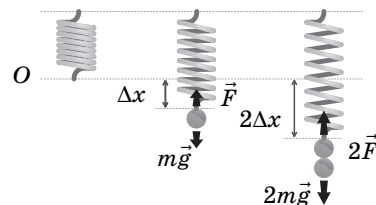
Сила упругости, возникающая при деформации, пропорциональна удлинению (сжатию) тела и направлена в сторону, противоположную направлению смещения частиц тела при деформации:

$$F_{\text{упр}} = -k\Delta x,$$

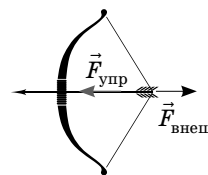
где  $\Delta x$  (м) — изменение размеров тела (удлинение/сжатие),  $k$  (Н/м) — коэффициент упругости тела.

Коэффициент упругости зависит от свойств материала и размеров стержня.

Сила упругости зависит от изменения расстояния между частями одного и того же тела, а также от жёсткости пружины. Чем больше деформация тела, тем больше сила упругости.



### НАПРАВЛЕНИЕ ДЕЙСТВИЯ СИЛЫ УПРУГОСТИ



Знак «-» в формуле закона Гука показывает, что сила упругости всегда направлена противоположно направлению внешних сил (противоположна деформации). Она стремится вернуть телу недеформированное состояние.

В задачах могут встречаться три обозначения одной величины «растяжение»:  $\Delta l$ ,  $\Delta x$ ,  $x$ .



### АБСОЛЮТНОЕ УДЛИНЕНИЕ (ДЕФОРМАЦИЯ) ТЕЛА

$$\Delta x = |l - l_0|,$$

где  $l_0$  — начальная длина тела,  $l$  — длина деформированного тела.

### ОТНОСИТЕЛЬНОЕ УДЛИНЕНИЕ ТЕЛА

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$



Закон Гука справедлив только при малых (т. е. при упругих) деформациях, при больших деформациях тело разрушается.

### МЕХАНИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ

$$\sigma = \frac{F_{\text{упр}}}{S}$$

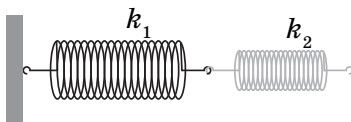
(Н/м<sup>2</sup> = Па)



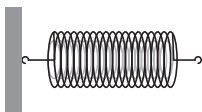
## РАСЧЁТ КОЭФФИЦИЕНТА ЖЁСТКОСТИ ДВУХ ПРУЖИН

### ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ

Имеем две пружины с коэффициентами жёсткости  $k_1$  и  $k_2$ .



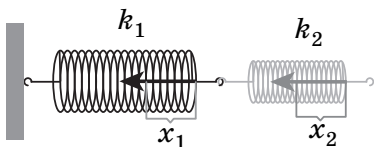
Рассчитаем коэффициент жёсткости пружины, которая может заменить эти две пружины, если они соединены последовательно.



Представим, что мы потянули за концы этих пружин: каждая из них удлинилась на  $x_1$  и  $x_2$  соответственно.

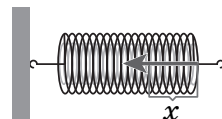
Общее удлинение (деформация) будет равно:

$$x = x_1 + x_2; \quad F = k_1 x_1 = k_2 x_2.$$



Силы равны между собой по третьему закону Ньютона, так как с этими силами пружины действуют друг на друга в точке соединения. Поэтому мы можем заменить эти две пружины на одну, которая растянута на  $x$  и создаёт силу:

$$F = k_{\text{общ}} \cdot x = k_1 x_1 = k_2 x_2.$$



Отсюда получаем:

$$x_1 = \frac{F}{k_1}, \quad x_2 = \frac{F}{k_2}.$$

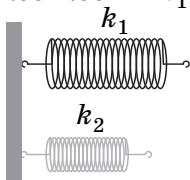
$$k_{\text{общ}} = \frac{F}{x_{\text{общ}}} = \frac{F}{x_1 + x_2} = \frac{F}{\frac{F}{k_1} + \frac{F}{k_2}},$$

или

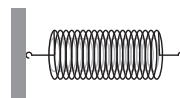
$$\frac{1}{k_{\text{общ}}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}.$$

### ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ

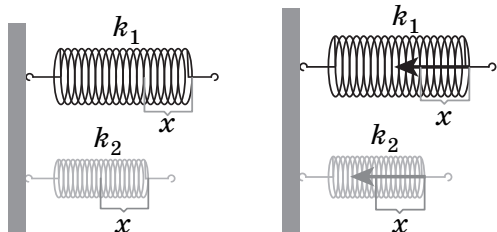
Имеем две пружины с коэффициентами жёсткости  $k_1$  и  $k_2$ .



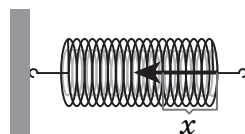
Рассчитаем коэффициент жёсткости пружины, которая может заменить эти две пружины, если они будут соединены параллельно.



Представим, что мы потянули за концы этих пружин: каждая из них удлинилась на  $x$ . В каждой из пружин возникнут силы упругости  $k_1x$  и  $k_2x$ , которые приложены в одной точке.



Поэтому мы можем заменить эти две пружины на одну, которая растянута на  $x$  и создаёт силу  $(k_1 + k_2) \cdot x$ .



Следовательно,

$$F_{\text{общ}} = (k_1 + k_2) \cdot x = k_{\text{общ}} \cdot x.$$

Отсюда получаем:  $k_{\text{общ}} = k_1 + k_2$ .

В процессе экспериментального исследования жёсткости трёх пружин получены данные, которые приведены в таблице.

|   |   |     |    |     |
|---|---|-----|----|-----|
| Сила ( $F$ , Н)                         | 0 | 10  | 20 | 30  |
| Деформация пружины 1 ( $\Delta l$ , см) | 0 | 1   | 2  | 3   |
| Деформация пружины 2 ( $\Delta l$ , см) | 0 | 2   | 4  | 6   |
| Деформация пружины 3 ( $\Delta l$ , см) | 0 | 1,5 | 3  | 4,5 |

Сравните жёсткость пружин.

**Решение:**

По закону Гука

$$F_{\text{упр}} = k \cdot \Delta x, \text{ откуда } k = \frac{F_{\text{упр}}}{\Delta x}.$$

Поскольку в таблице для каждой пружины выполняется условие прямой пропорциональности, то для каждой пружины будем брать значения из второго столбца.

Единицы измерения должны быть переведены в СИ!

Получаем:

жёсткость пружины 1:

$$k_1 = \frac{10 \text{ Н}}{0,01 \text{ м}} = 1000 \text{ Н/м};$$

жёсткость пружины 2:

$$k_2 = \frac{10 \text{ Н}}{0,02 \text{ м}} = 500 \text{ Н/м};$$

жёсткость пружины 3:

$$k_3 = \frac{10 \text{ Н}}{0,015 \text{ м}} \approx 667 \text{ Н/м}.$$

**Ответ:**  $k_2 < k_3 < k_1$ .

## ВЕС ТЕЛА

**Вес тела  $\vec{P}$  (Н)** — сила, с которой тело вследствие притяжения к Земле действует на опору (или подвес).

## РАЗЛИЧИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ И ВЕСА ТЕЛА

| Сила тяжести   | Вес тела  |
|--|---|
| <b>Определение</b>   |   |
| Результирующая гравитационная сила, действующая на любое тело со стороны планеты Земля   | Суммарная сила упругости тела, действующая при наличии силы тяжести на все опоры, подвесы   |
| <b>Природа силы</b>  |   |
| Гравитационная сила (притяжение к Земле)   | Электромагнитная (сила упругости тела)  |
| <b>Направление</b>   |   |
|  <p style="text-align: center;"><math>m\vec{g}</math> — сила тяжести</p> <p style="text-align: center;">Направлена к центру Земли</p> |  <p style="text-align: center;"><math>\vec{P}</math> — вес тела</p> <p style="text-align: center;">Направлена перпендикулярно опоре или вдоль подвеса</p> |
| <b>Точка приложения</b>  |   |
| <p>Приложена к центру тяжести тела</p>  <p style="text-align: center;">К телу</p>  | <p>Приложена к поверхности плоскости или концу нити</p>  <p style="text-align: center;">К опоре</p>   |
| <b>На какое тело действует</b>   |   |
| Действует на само тело   | Действует на поверхность плоскости опоры или конец нити   |
| <b>От чего зависит изменение силы</b>  |   |
| Не изменяется вблизи поверхности Земли (незначительные изменения на экваторе и полюсах из-за эллиптической формы Земли)  | Изменяется при движении тела с ускорением: может как увеличиваться, так и уменьшаться в зависимости от направления вектора ускорения  |
| <b>Формула для вычисления силы</b>   |   |
| $\vec{F}_{\text{тяж}} = m \cdot \vec{g},$ <p>где <math>m</math> — масса тела, <math>\vec{g}</math> — ускорение свободного падения</p>  | $\vec{P} = m \cdot (\vec{g} - \vec{a}),$ <p>где <math>m</math> — масса тела, <math>\vec{g}</math> — ускорение свободного падения, <math>\vec{a}</math> — ускорение, с которым движется тело</p>   |

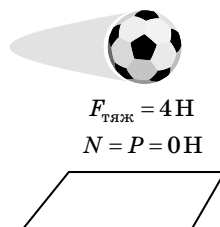
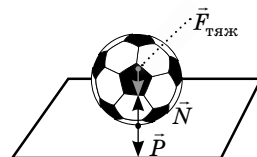
## РАЗЛИЧИЕ ВЕСА И МАССЫ ТЕЛА

Вес тела и масса тела — разные понятия.

**Масса тела** — постоянная величина, она измеряется в килограммах. **Вес** — это сила, измеряется в ньютонах и может меняться в зависимости от внешних условий.



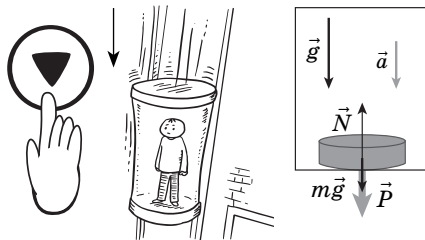
Пусть футбольный мяч массой 400 г находится в покое (или движется по горизонтальной поверхности). Его вес будет равен и силе реакции опоры, и силе тяжести, т. е. примерно 4 Н. Если этим мячом ударить по воротам, то, поскольку в полёте воздействие на опору (Землю) отсутствует, его вес будет равен нулю, тогда как масса мяча останется равной 400 г, а сила тяжести составит те же 4 Н.



## ВЕС ТЕЛА ПРИ ДВИЖЕНИИ С УСКОРЕНИЕМ. ПЕРЕГРУЗКА И НЕВЕСОМОСТЬ

### Тело движется с ускорением вниз

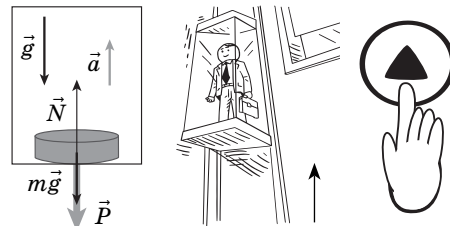
Лифт движется с ускорением вниз (начинает движение вниз или останавливается при движении вверх).



$m\vec{g}$  — сила тяжести,  $\vec{P}$  — вес тела,  $\vec{N}$  — сила реакции опоры,  $\vec{g}$  — ускорение свободного падения,  $\vec{a}$  — ускорение лифта

### Тело движется с ускорением вверх

Лифт движется с ускорением вверх (начинает движение вверх или останавливается при движении вниз).



$m\vec{g}$  — сила тяжести,  $\vec{P}$  — вес тела,  $\vec{N}$  — сила реакции опоры,  $\vec{g}$  — ускорение свободного падения,  $\vec{a}$  — ускорение лифта

Векторная запись второго закона Ньютона для системы

$$\vec{N} + m\vec{g} = m\vec{a}$$

Тело движется с ускорением вниз

Тело движется с ускорением вверх

Скалярная запись второго закона Ньютона для системы

Векторы ускорений направлены в одну сторону, сила реакции опоры им противоположна, следовательно:

$$mg - N = ma, \quad N = P = m(g - a)$$

Вектор ускорения свободного падения направлен противоположно силе реакции опоры и ускорению лифта, следовательно:

$$-mg + N = ma, \quad N = P = m(g + a)$$

Следствие

При движении тела с ускорением вниз сила реакции опоры и вес уменьшаются. При движении тела с ускорением, равным по модулю ускорению свободного падения ( $a = g$ ), вес тела равен нулю:

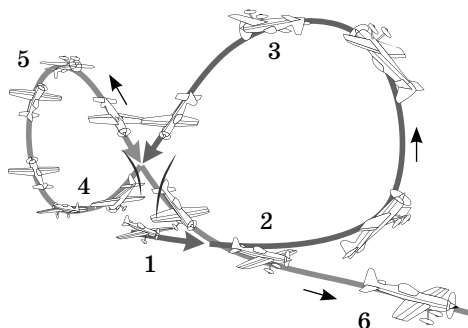
$$P = m \cdot (g - g) = 0.$$

В результате такого движения возникает **невесомость** — состояние тела, при котором оно движется только под действием силы тяжести

При движении тела с ускорением вверх сила реакции опоры и вес увеличиваются. В результате возникает **перегрузка** — увеличение веса тела, вызванное его ускоренным движением. Часто перегрузку указывают в единицах ускорения свободного падения

АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ПЕРЕГРУЗКА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ФИГУР ВЫСШЕГО ПИЛОТАЖА

Аэродинамическая перегрузка подобна увеличению веса самолёта (лётчика). Нормальная перегрузка делится на положительную и отрицательную. При **положительной перегрузке** лётчик прижимается к сиденью самолёта, при **отрицательной** — удерживается на привязных ремнях.



Перегрузка при выполнении фигуры «восьмёрка»:

- 3, 5 — перегрузка отрицательная;
- 2, 4 — перегрузка положительная



Перепады перегрузок с кратковременными состояниями невесомости иногда достигают 14g (от +8g до -6g).

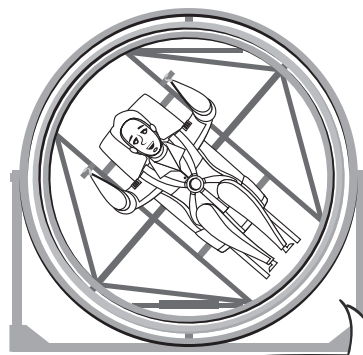
Именно направление ускорения, а не скорости влияет на характер изменения веса. Лифт подъезжает к верхнему этажу, скорость уменьшается: скорость направлена вверх, ускорение — вниз, вес тела уменьшается. Лифт подъезжает к первому этажу, скорость уменьшается: скорость направлена вниз, ускорение — вверх, вес тела увеличивается.



Парашютист, находящийся в свободном полёте, при малом сопротивлении воздуха пребывает в состоянии невесомости.



При раскрытии парашюта парашютист испытывает перегрузку до  $10g$ .



Человек может выдержать перегрузку до  $15g$  около  $3-5$  с без потери сознания. Переносить такие перегрузки могут только хорошо тренированные люди.

В аттракционе человек массой  $70$  кг движется на тележке по рельсам и совершает мёртвую петлю в вертикальной плоскости. С какой скоростью двигалась тележка в нижней точке круговой траектории радиусом  $5$  м, если в этой точке сила давления человека на сиденье тележки была равна  $2100$  Н? Ускорение свободного падения  $10$  м/с<sup>2</sup>.

**Дано:**

$$m = 70 \text{ кг}$$

$$g \approx 10 \text{ м/с}^2$$

$$R = 5 \text{ м}$$

$$P = 2100 \text{ Н}$$

$v = ?$

**Решение:**

Сила  $P$  давления на сиденье по третьему закону Ньютона равна по модулю силе  $N$  упругости (силе реакции опоры), действующей на человека:  $P = N$ . Согласно второму закону Ньютона:  $m \cdot a = N - m \cdot g$ , откуда  $a = \frac{N}{m} - g$ .

Из кинематических условий центростремительное ускорение равно:

$$a = \frac{v^2}{R}, \text{ откуда } v = \sqrt{a \cdot R} = \sqrt{\left(\frac{N}{m} - g\right) \cdot R}; \quad v = \sqrt{\left(\frac{2100 \text{ Н}}{70 \text{ кг}} - 10 \text{ м/с}^2\right) \cdot 5 \text{ м}} = 10 \text{ м/с.}$$

**Ответ:**  $v = 10$  м/с.

## СИЛА ТРЕНИЯ

**Сила трения**  $\vec{F}_{\text{тр}}$  (Н) обусловлена шероховатостью соприкасающихся поверхностей, силами межмолекулярного притяжения этих поверхностей, препятствует взаимному перемещению тел, направлена противоположно направлению перемещения (или возможного перемещения) данного тела относительно других тел. Она возникает вдоль поверхности двух трущихся тел.



Сгорание метеорита в атмосфере Земли — результат действия силы трения.

Сила трения относится к силам электромагнитной природы.



## ТРЕНИЕ ПОКОЯ

**Трение покоя** — трение, возникающее при отсутствии относительного перемещения соприкасающихся тел.

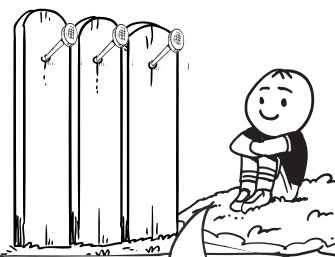
**Сила трения покоя**  $F_{\text{тр. п}}$  — сила трения, препятствующая возникновению движения одного тела по поверхности другого:

$$\vec{F}_{\text{тр. п}} = -\vec{F},$$

где  $\vec{F}_{\text{тр. п}}$  — сила трения покоя,  $\vec{F}$  — сила тяги.

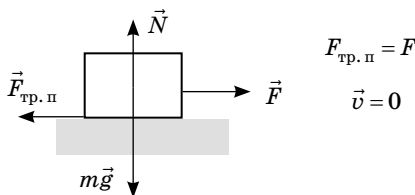
Знак «-» показывает, что силы противоположно направлены.

Сила трения покоя возникает между двумя неподвижными соприкасающимися поверхностями и препятствует возникновению движения. По модулю эта сила равна равнодействующей сил, стремящихся привести тело в движение.

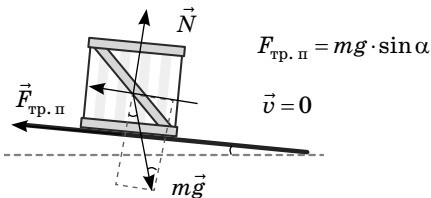


Гвоздь в доске удерживает сила трения покоя.

### НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ



### НА НАКЛОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ



## ТРЕНИЕ СКОЛЬЖЕНИЯ

**Трение скольжения** — трение, возникающее при перемещении (случай поступательного движения) одного тела по поверхности другого.

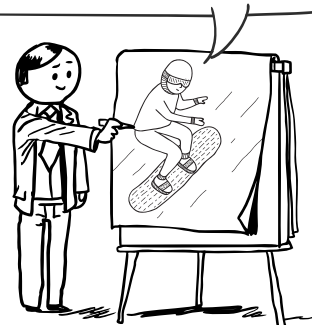
Сила трения скольжения всегда направлена в сторону, противоположную относительной скорости соприкасающихся тел.

**Сила трения скольжения**  $F_{\text{тр}}$  — сила трения, возникающая при относительном перемещении (случай поступательного движения) соприкасающихся тел, она равна предельному значению силы трения покоя:

$$F_{\text{тр}} = \mu \cdot N,$$

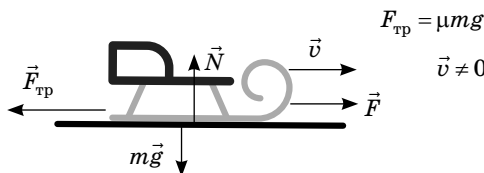
где  $F_{\text{тр}}$  — сила трения скольжения,  $\mu$  — коэффициент трения,  $N$  — сила реакции опоры.

Сила трения скольжения зависит от материала и качества обработки трущихся поверхностей.

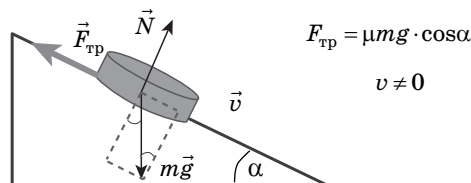


Благодаря силе трения скольжения мы можем писать и рисовать на бумаге карандашом. Частицы грифеля цепляются за шероховатости бумаги и остаются на ней.

### НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

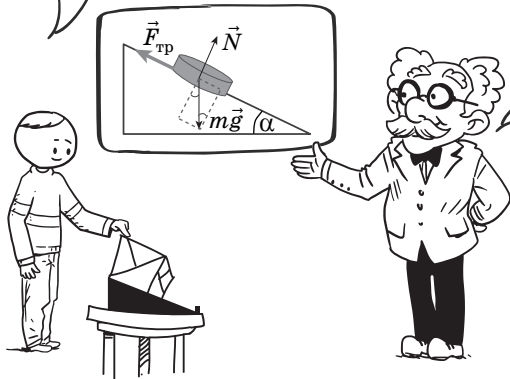


### НА НАКЛОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ



Как может двигаться тело, если на него действует сила трения?

Если на движущееся тело действует сила трения, то оно может двигаться как равномерно (ускорение равно нулю), так и равноускоренно (в зависимости от качества поверхности тела и угла наклона). При любом движении тела сила нормальной реакции опоры не меняется и вычисляется по формулам:  $m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{тр}} = m\vec{a}$ ,  $N = mg \cdot \cos \alpha$  — для движения по наклонной плоскости,  $N = mg$  — для движения по горизонтальной плоскости.



## КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ

Коэффициент трения устанавливает пропорциональность между силой трения и силой нормального давления, прижимающей тело к опоре:

$$\mu = \frac{F_{\text{тр}}}{N},$$

где  $\mu$  — коэффициент трения,  $F_{\text{тр}}$  — сила трения скольжения,  $N$  — сила реакции опоры.

Коэффициент трения — **безразмерная** величина.

Коэффициент трения является совокупной характеристикой пары материалов, которые соприкасаются, и не зависит от площади соприкосновения тел.

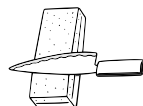
От чего зависит максимальная сила трения покоя или скольжения?



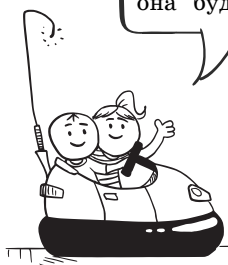
Максимальная сила трения покоя (сила трения скольжения) не зависит от площади соприкосновения поверхностей, а зависит только от степени их гладкости (шероховатости), массы тела и от угла наклона этих поверхностей.



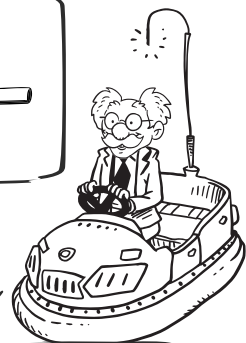
Коэффициент трения точильного камня по стали  $\mu = 0,94$ , подшипника по стали  $\mu = 0,02$ .



Как изменится сила трения скольжения, если она будет меньше силы тяги?



Если сила трения скольжения меньше силы тяги, то их равнодействующая не будет равна нулю, следовательно, тело будет двигаться с ускорением. Но стоит заметить, что сила трения скольжения не зависит от того, как меняется скорость тела, формула для её вычисления останется прежней:  $F_{\text{тр}} = \mu N$ .



## ПРАВИЛА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НА СИЛЫ ТРЕНИЯ

★ При решении задач считается, что максимальная сила трения покоя равна силе трения скольжения.

★ Если в условии задачи сказано, что тело движется по гладкой поверхности, значит, при решении задачи силу трения учитывать не надо.

★ При движении у двух соприкасающихся поверхностей одновременно возникают силы трения, равные друг другу по модулю и направленные в противоположные стороны (по третьему закону Ньютона).

В реальных условиях максимальная сила трения (момент, в который тело приходит в движение) немного больше силы трения скольжения, с увеличением скорости движения возрастает сила трения скольжения. Однако при движении с малыми скоростями этими эффектами пренебрегают.



Стальной брусок массой 10 кг тянут по горизонтальной поверхности стола с горизонтально направленной силой 20 Н. Чему равна сила трения между бруском и столом, если коэффициент трения между бруском и столом 0,4?

**Решение:**

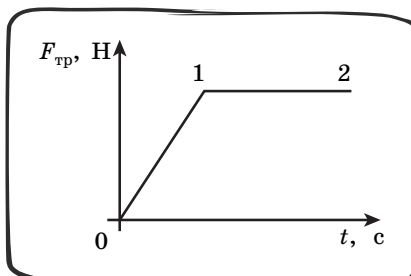
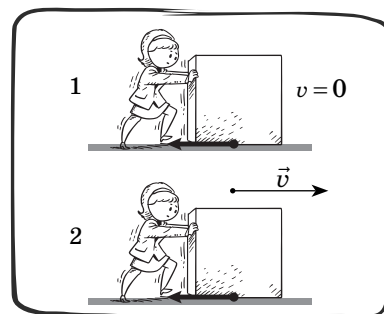
Для того чтобы ответить на этот вопрос, сначала надо вычислить силу трения скольжения:  $F_{тр} = \mu N = \mu mg = 0,4 \cdot 10 \cdot 10 = 40$  Н. Сила трения и сила, с которой тянут брусок, направлены в разные стороны. Поскольку  $F_{тр} > F$ , то брусок не скользит по поверхности, а покоится. Его тянут, но этой силы недостаточно для того, чтобы сдвинуть его с места, т. е. речь идёт о силе трения покоя, которая равна силе воздействия на брусок:  $F_{тр.п} = 20$  Н. Для равномерного движения бруска по поверхности надо приложить силу, равную 40 Н, для равноускоренного движения — силу больше 40 Н.

Сила трения покоя в зависимости от величины силы тяги  $F$  (см. рисунок и ниже график к нему) изменяет своё значение до тех пор, пока тело не начнёт двигаться.

На участке 0—1 тело неподвижно:

$$\begin{cases} 0 < F_{тр.п} < F_{тр}, \\ F_{тр.п} = F, \end{cases}$$

где  $F_{тр}$  — сила трения скольжения,  $F$  — сила тяги.



**График силы трения:**

$F_{тр}$  — сила трения,  $t$  — время движения.

Участок 0—1 — график силы трения покоя.

Участок 1—2 — график силы трения скольжения

На участке 1—2 под действием постоянной силы тяги  $F$  тело движется прямолинейно и равномерно, при этом силе тяги противодействует сила трения скольжения:

$$\begin{cases} F_{\text{тр}} = F, \\ F_{\text{тр}} = \mu \cdot N, \end{cases}$$

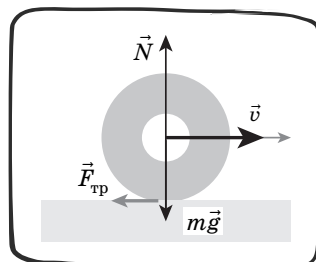
где  $F_{\text{тр}}$  — сила трения скольжения,  $F$  — сила тяги,  $\mu$  — коэффициент трения,  $N$  — сила реакции опоры.

## ТРЕНИЕ КАЧЕНИЯ

**Трение качения** — сопротивление качению одного тела по поверхности другого. Сила сопротивления движению, возникающая при перекатывании тел друг по другу. **Сила трения качения**  $F_{\text{тр. к}}$  — сила трения, возникающая при перемещении (случай вращательного движения) одного тела по поверхности другого:

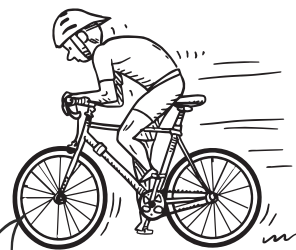
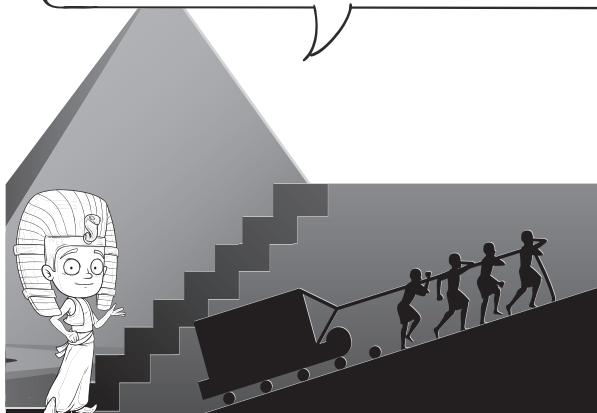
$$F_{\text{тр. к}} = \frac{f}{R} N,$$

где  $F_{\text{тр. к}}$  — сила трения качения,  $f$  — коэффициент трения качения,  $R$  — радиус катящегося тела.



Действие сил на катящееся тело при наличии трения:  $m\vec{g}$  — сила тяжести,  $\vec{N}$  — сила реакции опоры,  $\vec{F}_{\text{тр}}$  — сила трения качения,  $\vec{v}$  — скорость поступательного движения колеса

Уже в древности для перемещения больших грузов под них подкладывали катки, с помощью которых перекатывали массивные предметы. Изобретение колеса стало величайшим событием в истории человечества.



Трение качения значительно меньше трения скольжения (при прочих равных условиях).

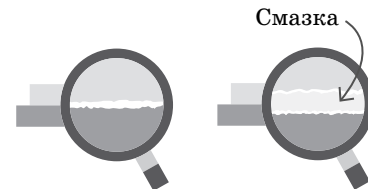
## ЖИДКОЕ ТРЕНИЕ

Жидкое трение (сила сопротивления) возникает при движении в жидкостях и газах.

При наличии смазки соприкасаются не поверхности тела, а слой жидкости.

### ОСОБЕННОСТЬ

У жидкого трения нет трения покоя.



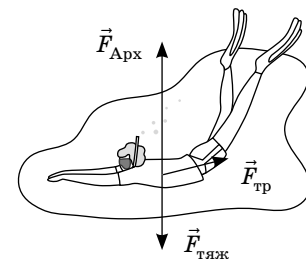
### ЗАВИСИМОСТЬ СИЛЫ ЖИДКОГО ТРЕНИЯ ОТ СКОРОСТИ ТЕЛА

Сопротивление жидкого трения направлено противоположно скорости движения тела:

$$\vec{F}_{\text{сопр}} \updownarrow \vec{v}.$$

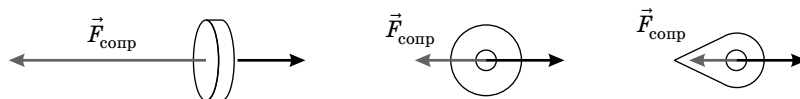
При малых скоростях:  $\vec{F}_{\text{сопр}} = -k\vec{v}$ .

При больших скоростях:  $F_{\text{сопр}} = kv^2$ .



### ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ОТ ФОРМЫ ТЕЛА

Коэффициент  $k$  зависит от формы, размеров и поверхности тела, а также от свойств среды.



## ЗАКОНЫ НЬЮТОНА В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ

В решении каких задач можно использовать законы Ньютона? Можно ли их применять, если рассматриваются, например, случаи движения планет вокруг Солнца, ракеты в космическом пространстве, электронов в трубе кинескопа телевизора, электронов в атоме?

Законы Ньютона нельзя применять при расчёте движения электронов в атоме, так как атом представляет собой квантовую систему и в ней законы Ньютона не работают, — к атомным системам применимы законы квантовой физики. В остальных названных случаях при решении задач можно применять законы Ньютона.





В первой серии опытов брусок перемещают с помощью нити равномерно и прямолинейно вверх по наклонной плоскости. Во второй серии опытов на бруске закрепили груз, не меняя прочих условий. Как при переходе от первой серии опытов ко второй изменится сила натяжения нити и коэффициент трения между бруском и плоскостью? Для каждой величины определите соответствующий характер её изменения и подберите к каждой букве соответствующую цифру.

- А) сила натяжения нити            1) увеличится  
 Б) коэффициент трения            2) уменьшится  
     3) не изменится

**Решение:**

По первому закону Ньютона (см. рисунок):

$$m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{тр}} + \vec{T} = 0.$$

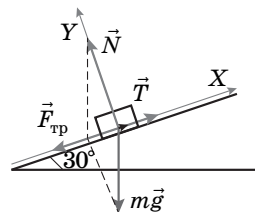
Для проекций на ось Y:  $N = mg \cos \alpha$ .

По формуле силы трения  $F_{\text{тр}} = \mu N$ , т. е.  $F_{\text{тр}} = \mu mg \cos \alpha$ .

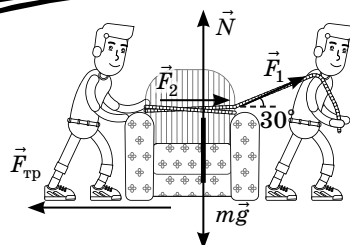
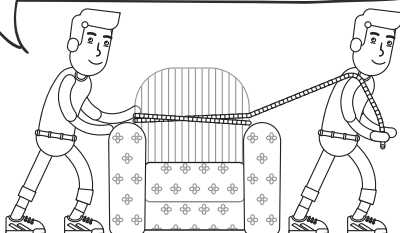
Получается, что силы реакции опоры и трения пропорциональны массе тела, следовательно, и сила натяжения нити тоже пропорциональна массе тела. Значит, если на бруске закрепили груз (увеличив массу тела), то сила натяжения нити увеличится.

Коэффициент трения зависит только от характера поверхности, поэтому он не изменится.

**Ответ:** А — 1; Б — 3.



Определи силу трения скольжения кресла о пол, если коэффициент трения равен 0,5, масса кресла 35 кг. Мы толкаем кресло вперёд с силой 100 Н и тянем под углом 30° к горизонту с силой 150 Н.



Запишем второй закон Ньютона для сил, действующих на кресло:

$$\vec{N} + m\vec{g} + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_{\text{тр}} = m\vec{a}.$$

Поскольку речь идёт о силе трения скольжения, кресло движется. Для определения силы трения неважно наличие ускорения. Сила трения скольжения:  $F_{\text{тр}} = \mu N$ .

Определим силу нормальной реакции опоры, спроектируем второй закон Ньютона на ось y:  $N + F_1 \cdot \sin \alpha - mg = 0$ , тогда  $N = mg - F_1 \cdot \sin \alpha$ . Сила трения будет равна  $F_{\text{тр}} = \mu \cdot (mg - F_1 \cdot \sin \alpha)$ .  $F_{\text{тр}} = 0,5 \cdot (35 \cdot 10 - 150 \cdot \sin 30) = 0,5 \cdot (350 - 75) = 137,5$  Н.

**Ответ:**  $F_{\text{тр}} = 137,5$  Н.