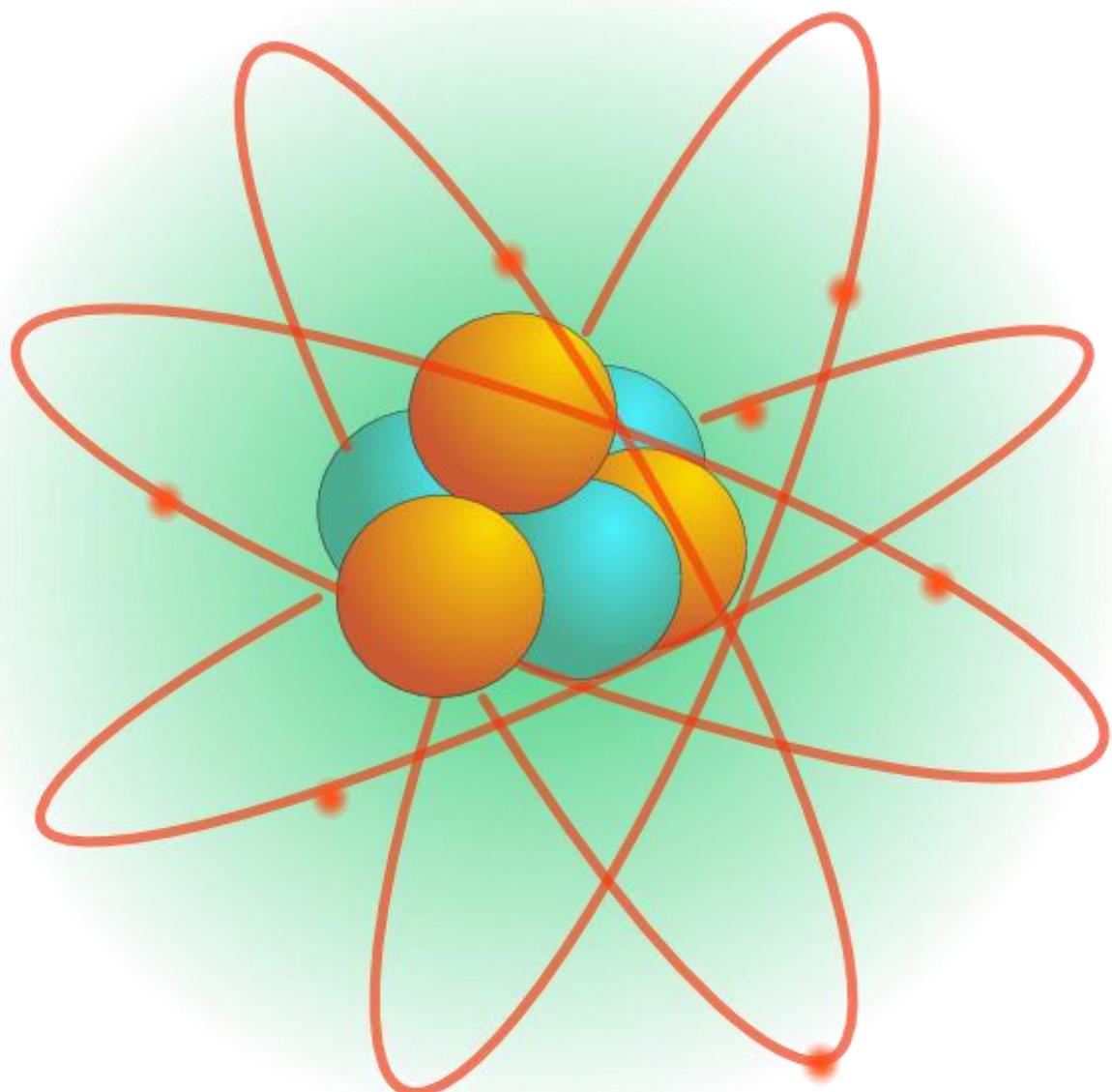


Физика в диаграммах



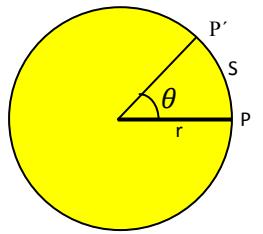
СОДЕРЖАНИЕ

1. Движение по окружности
2. Производные единицы системы СИ
3. Ускорение
4. Плотность
5. Давление
6. Анализ прямолинейного движения
7. Уравнение движения
8. Пружинный маятник
9. Математический маятник
10. Проводники и изоляторы
11. Закон Ома и сопротивление
12. Резистивные элементы электрической цепи
13. Соединение проводников
14. Мощность
15. Электрический ток и сопротивление
16. Сверхпроводимость
17. Передача энергии
18. Удельное сопротивление
19. Электропроводность и удельная электропроводность
20. Второй закон Кирхгофа
21. Внутреннее сопротивление
22. Закон Шарля

Движение по окружности

Угол поворота

Если точка P сместилась в P' , то угол θ называется углом поворота и измеряется в радианах: $\theta = \frac{s}{r}$.

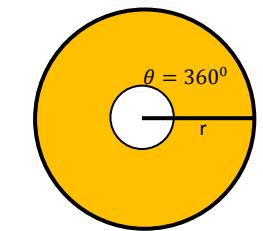


Если s – длина окружности, то $\theta = \frac{2\pi r}{r} = 2\pi$.

Тогда 2π радиан = 360° .

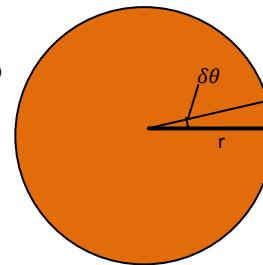
1 радиан = $\frac{360}{2\pi} = 57,3^\circ$.

На рисунке $\delta\theta$ – это очень маленький угол



(обозначение $\delta\theta$ рассматривается как один символ)

Перемещение δ – настолько мало, что его можно рассматривать и как дугу окружности, и как сторону треугольника. Поэтому $\sin \delta\theta = \frac{s}{r} = \delta\theta$, т.е. для малых углов $\sin \delta\theta = \delta\theta$.



Скорость вращения

Точка P – это точка на колесе, вращающемся с постоянной скоростью. За время t она перемещается в положении P' . Скорость вращения можно определить, измеряя либо угловую скорость, либо частоту вращения.

$$\text{угловая скорость} = \frac{\text{угол поворота}}{\text{затраченное время}}$$

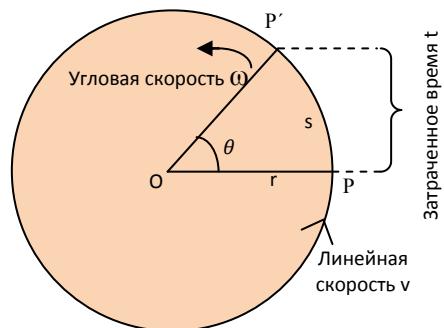
В математическом виде $\omega = \frac{\theta}{t}$.

Например, если колесо повернется на 10 радиан за 2 секунды, то тогда $\omega = 5 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$.

$$\text{частота вращения} = \frac{\text{число оборотов}}{\text{затраченное время}}$$

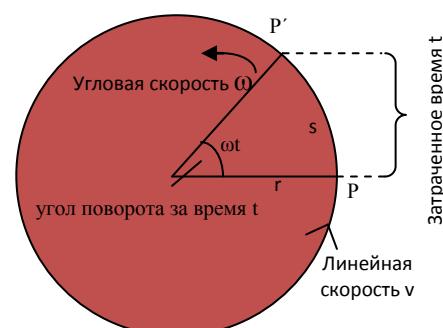
Частота вращения измеряется в герцах (Гц). Например, если колесо совершает 12 оборотов за 4 секунды, то $f=3,5$ Гц.

Период T – это время, за которое совершается один оборот. Если колесо делает 3 полных оборота в секунду ($f=3$ Гц), то тогда время, необходимое для совершения одного оборота, равно $1/3$ секунды. Поэтому $T = \frac{l}{v}$.



Связь между v , ω и r

На рисунке частица движется по окружности с равномерной скоростью v . (Эта скорость не является равномерной векторной скоростью, поскольку у последней меняется направление). Частица проходит путь s за время t , поэтому $v = \frac{s}{t}$.



Так как угловая скорость равна ω , угол поворота за время t составляет ωt . Но $\omega t = s/r$, поэтому $s = \omega t r$. Представляя это выражение в приведенное выше уравнение и получаем: $v = \omega r$.

Связь между ω , f и T в силу того, что один полный оборот равен 2π радиан (360°), получаем:

$$\omega = 2\pi f$$

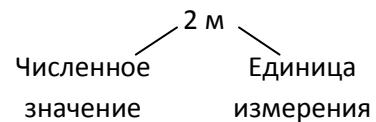
Например, колесо, делающее 3 оборота в секунду ($f=3$ Гц) имеет угловую скорость 6π радиан в секунду.

Поскольку $T=1/f$, из предыдущего уравнения следует, что $T = \frac{2\pi}{\omega}$.

Единицы измерения и размерности физических величин

Физическая величина

Пусть длина равна 2 метра. Результат этого измерения – в данном случае длина – называется физической величиной. Его можно представить в виде двух частей.



Примечание: «2 мм на самом деле означает «2 x метр»».

Основные единицы системы СИ

В научных исследованиях используются единицы измерения международной системы Си (SI – Sisteme International). В этой системе имеются основные единицы, шесть из которых приведены в таблице. Другие единицы, используемые в СИ, являются производными от основных единиц.

Выбор основных единиц системы Си был тщательно продуман для того, чтобы их можно было точно воспроизвести на оборудовании, имеющемся в метрологических лабораториях в разных странах.

Физическая величина	Единица измерения	
	Наименование	Условное обозначение
Длина	метр	м
Масса	килограмм	кг
Время	секунда	с
Сила электрического тока	ампер	А
Температура	кельвин	К
Количество вещества	моль	моль

*В науке «количество вещества» – это результат измерения числа имеющихся структурных единиц (атомов, ионов или молекул), из которых состоит вещество. Один моль содержит $6,02 \times 10^{23}$ частиц и просто связан с полной массой. Например, по определению 1 моль ($6,02 \times 10^{23}$ атомов) углерода-12 имеет массу 12 г. Число $6,02 \times 10^{23}$ называется постоянной Авогадро.

Производные единицы системы СИ

Для скорости в системе Си нет собственной единицы. Однако существует уравнение, являющееся определением скорости. Если за 3 с тело проходит путь, равный 12 м, то $скорость = \frac{\text{пройденный путь}}{\text{затраченное время}} = \frac{12 \text{ м}}{3 \text{ с}} = 4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$

Здесь с единицами СИ мы обращались как с числами или алгебраическими величинами. Для экономии места опустим промежуточные выкладки и запишем окончательный результат в виде 4 м/с или $4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Единица $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ является примером производимой единицы в системе Си. Ее получают из определяющего уравнения. Внизу в таблице можно найти другие примеры производимых единиц. Некоторые производные единицы получаются с помощью других производных единиц и имеют свои собственные названия. Например, 1 джоуль в секунду ($\text{Дж} \cdot \text{с}^{-1}$) называется 1 ватт (Вт).

Физическая величина	Определяющее уравнение (упрощенное)	Производная единица	Специальный символ (и название)
скорость	путь/время	$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$	-
ускорение	скорость/время	$\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$	-
сила	масса \times ускорение	$\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-1}$	Н (ньютон)
работа	сила \times путь	$\text{Н} \cdot \text{м}$	Дж (джоуль)
мощность	работа/время	$\text{Дж} \cdot \text{с}^{-1}$	Вт (ватт)
давление	сила/площадь	$\text{Н} \cdot \text{м}^{-2}$	Па (паскаль)
плотность	масса/объем	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$	-
заряд	сила электрического тока \times время	$\text{А} \cdot \text{с}$	Кл (кулон)
напряжение	энергия/заряд	$\text{Дж} \cdot \text{Кл}^{-1}$	В (вольт)
сопротивление	напряжение/ток	$\text{В} \cdot \text{А}^{-1}$	Ом (ом)

Десятичные приставки

Для получения больших или меньших величин, единицы системы СИ, как основные, так и производные, можно использовать с десятичными приставками.

Десятичная приставка	Условное обозначение	Численное значение	Десятичная приставка	Условное обозначение	Численное значение
пико	п	10^{-12}	кило	к	10^3
нано	н	10^{-9}	мега	М	10^6
микро	мк	10^{-6}	гига	Г	10^9
милли	м	10^{-3}	тера	Т	10^{12}

Например, $1 \text{ м} \cdot \text{м} = 10^{-3} \text{ м} \cdot 1 \text{ км} = 10^3 \text{ м}$

Примечание: 1 грамма (10^{-3} кг) пишется «1 г», а не «1 мкг».

Размерности физических величин

Приведём три результата измерений:

Длина = 10 м Площадь = 6 м² Объём = 4 м³

Эти три физические величины имеют размерности длины, длины в квадрате и длины в кубе.

С использованием только трех основных единиц – длины (L), массы (M) и времени (T) – можно вывести размерности многих других физических величин, пользуясь уравнениями, с помощью которых эти производные величины определяются. В таблице приводятся примеры такого рода.

Пример 1

$$\text{скорость} = \frac{\text{пройденный путь}}{\text{затраченное время}} = \frac{(L)}{(T)} = (LT^{-1})$$

Отсюда видно, что размерностью скорости будет (LT^{-1})

Пример 2

$$\text{плотность} = \frac{\text{масса}}{\text{объем}} = \frac{(M)}{(L^3)} = (ML^{-3})$$

Видим, что размерность плотности (ML^{-3})

Физическая величина	Определяющее уравнение (упрощенное)	Размерность		В основных единицах
		из уравнения	сокращенная формула	
длина	–	–	[L]	м
масса	–	–	[M]	кг
время	–	–	[T]	с
скорость	$\frac{\text{путь}}{\text{время}}$	$\frac{[L]}{[T]}$	$[LT^{-1}]$	$m \cdot c^{-1}$
ускорение	$\frac{\text{скорость}}{\text{время}}$	$\frac{[LT^{-1}]}{[T]}$	$[LT^{-2}]$	$m \cdot c^{-2}$
сила	масса x ускорение	$[M] \times [LT^{-2}]$	$[MLT^{-2}]$	$kg \cdot m \cdot c^{-2}$
работа	сила x путь	$[MLT^{-2}] \times \frac{[L]}{[L]}$	$[ML^2T^{-2}]$	$kg \cdot m^2 \cdot c^{-2}$
мощность	$\frac{\text{работа}}{\text{время}}$	$\frac{[ML^2T^{-2}]}{[T]}$	$[ML^2T^{-3}]$	$kg \cdot m^2 \cdot c^{-3}$
давление	$\frac{\text{сила}}{\text{площадь}}$	$\frac{[ML^2T^{-2}]}{[L^2]}$	$[ML^{-1}T^{-2}]$	$kg \cdot m^{-1} \cdot c^{-2}$

Использование размерностей или основных единиц для проверки правильности уравнений.

Члены в обеих частях уравнения должны всегда измеряться в одинаковых единицах, т.е. иметь одинаковую размерность.

Например,

Работа = сила X пройденный путь

$$[ML^2T^{-2}] = [MLT^{-2}] \times [L]$$

Уравнение не может быть правильным, если размерности его левой и правой частей не совпадают. Невыполнение этого требования было бы аналогично утверждению, что «6 яблок равны 6 апельсинам».

Размерности весьма полезны при проверке правильности уравнения с точки зрения физики.

Пример. Проверим правильность размерностей в уравнении $\text{ПЭ} = mgh$ (ПЭ – потенциальная энергия).

Начнем с проверки размерности в правой части:

$$mgh = [\text{M}] \times [\text{LT}^2] \times [\text{L}] = [\text{ML}^2\text{T}^{-2}]$$

Получим, что это размерность работы, а, следовательно, и энергии. Таким образом, указанное уравнение правильно с точки зрения размерностей.

Примечание.

Проверка с помощью размерностей не позволяет доказать математическую точность уравнения. Например, оба из предлагаемых уравнений правильны с точки зрения размерностей, но математически правильным является только одно из них:

$$\text{ПЭ} = mgh$$

$$\text{ПЭ} = 2mgh$$

Размерности и единицы измерения частоты. Частота некоторого источника колебаний определяется следующим образом:

$$\text{частота} = \frac{\text{число колебаний}}{\text{затраченное время}}$$

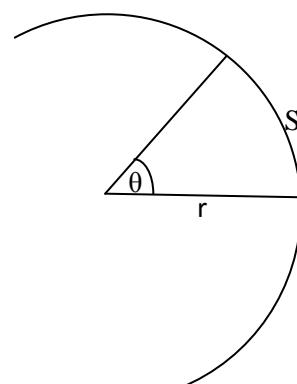
Поскольку число колебаний величина безразмерная, то размерностью частоты будет $[\text{T}^{-1}]$. Единицей частоты в системе Си является герц (Гц):

$$1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$$

Размерности и единицы измерения углов

На рисунке угол θ , измеренный в радианах, определяется следующим образом:

$$\theta = \frac{s}{r}$$



Отношение s/r является безразмерной величиной, поскольку $[\text{L}] \times [\text{L}^{-1}] = 1$. Однако при измерении углов в радианах для определенности единица измерения выписывается: например, 2 рад.

Движение, масса и силы

Вектор перемещения

Перемещение – это путь, пройденный в каком-то определенном направлении. Его единицей измерения в системе СИ является метр (м).

Физические величины, подобные перемещению, которые имеют значение величины (размер) и направление, называются векторами.

Показанная на рисунке стрелка изображает перемещение частицы, прошедшей от А до В 12 м. Однако при горизонтальном или вертикальном движении часто удобно использовать «+» или «-» для указания направления вектора. Например:

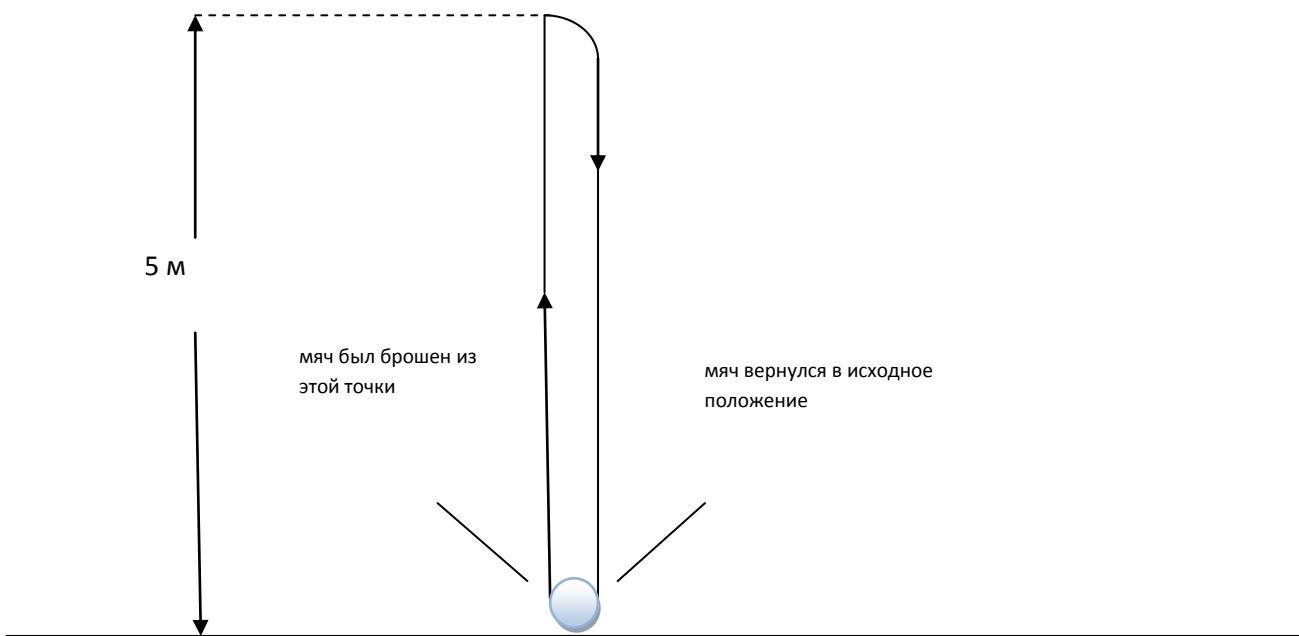


Движение на 12 м направо: перемещение = + 12 м

Движение на 12 м влево: перемещение = - 12 м

Длина вектора перемещения – это не всегда то же самое, что и пройденный путь. Например, когда мячик на рисунке внизу вернется в свое начальное положение, его

вертикальное перемещение будет равно нулю. Однако пройденный при этом путь будет равен 10 м.



Скалярная и векторная скорость

Средняя скалярная скорость рассчитывается следующим образом:

$$\text{средняя скорость} = \frac{\text{пройденный путь}}{\text{затраченное время}}$$

В системе СИ единицей скорости является метр/секунда, или сокращенно $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$. Например, если тело прошло путь, равный 12 м за 2 с, то его средняя скорость равна $6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Средняя векторная скорость рассчитывается так:

$$\text{средняя векторная скорость} = \frac{\text{вектор перемещения}}{\text{затраченное время}}$$

Единицей измерения векторной скорости в системе СИ также будет $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$. Но в отличие от скалярной скорости, векторная скорость, как всякий вектор, кроме величины имеет ещё и направление.

На рисунке частицы, скоростью 6

$$6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$$

показан вектор скорости движущейся направо со $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$. Однако, как и в

случае с вектором перемещения, часто бывает удобнее направление вектора обозначать «+» или «-».

Модуль средней векторной скорости не всегда совпадает со средней скалярной скоростью. Например, если мяч подброшен вверх и через 2 с он возвращается в исходную точку, пройдя путь в 10 м, его средняя скалярная скорость равна $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Но модуль его средней векторной скорости равен нулю, поскольку равен нулю модуль его перемещения.

Ускорение

Среднее ускорение можно рассчитать следующим образом:

$$\text{среднее ускорение} = \frac{\text{изменение векторной скорости}}{\text{затраченное время}}$$

Единицей ускорения в системе СИ является $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$ (иногда записывается м/с^2).

Например, если за 2 с скорость тела

увеличивается на $6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, то его среднее

$$3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$$

ускорение равно $3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$.

Ускорение является вектором. На рисунке ускорение частицы равно $3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ и направлено направо. Однако, как и в случае скорости, для обозначения направления вектора части бывает удобнее использовать «+» или «-».

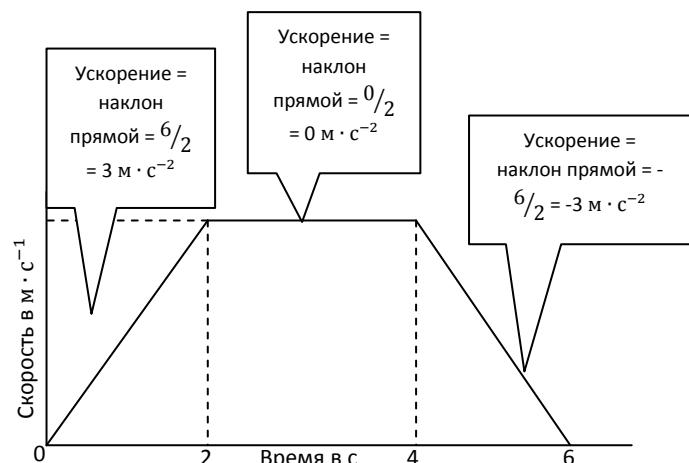
Если каждую секунду скорость увеличивается на $3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$, то ускорение будет равно $+3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$. Если же она уменьшается на $3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$, то ускорение будет равно $-3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$.

С точки зрения математики, ускорение $-3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ направо – это то же самое, что ускорение $+3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ налево.

На приведенном графике зависимости скорости от времени для каждого участка можно рассчитать ускорение, находя наклон прямой.

Делается это следующим образом:

$$\text{наклон прямой} = \frac{\text{приращение по оси у}}{\text{приращение по оси х}}$$



Сила

Сила является вектором. Единица силы в системе СИ – ньютон (Н).

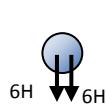
Если две или более силы действуют на некоторое тело, то их совместное воздействие называется равнодействующей (силой). Внизу на рисунке приводятся два простых примера. На примере справа равнодействующая равна нулю, потому что силы уравновешены.

Равнодействующая, действующая на некоторую массу, создает ускорение. Сила, масса и ускорение связаны следующим образом:

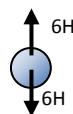
$$\text{равнодействующая} = \text{масса} \times \text{ускорение}, F = ma$$

Например, равнодействующая, равна 1 Н, создает у тела самой 1 кг ускорение, равное $1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$. (Это есть определение ньютона).

Чем больше масса тела, тем большую силу нужно приложить для создания любого заданного ускорения.



$$\text{Равнодействующая} = 12 \text{ вниз}$$



$$\text{Равнодействующая} = 0$$

Если силы, действующие на тело, уравновешены, то ускорение этого тела равно нулю. Это означает, что тело либо неподвижно, либо движется с постоянной векторной скоростью (постоянной скалярной скоростью по прямой линии).

Моменты сил и равновесие

Вращающее воздействие силы называется моментом.

Момент силы относительно некоторой точки = сила \times расстояние по перпендикуляру от этой точки*

*измеряется от линии действия силы.

Гантель, изображенная на рисунке, уравновешена в точке О, поскольку два момента относительно точки О равны и противоположны по знаку.

Сила тяжести (вес*) и ускорение свободного падения g

На Земле на все тела действует направленная к её центру гравитационная сила, которая называется силой тяжести. Как и другие силы, в системе СИ она измеряется в ньютонах (Н).

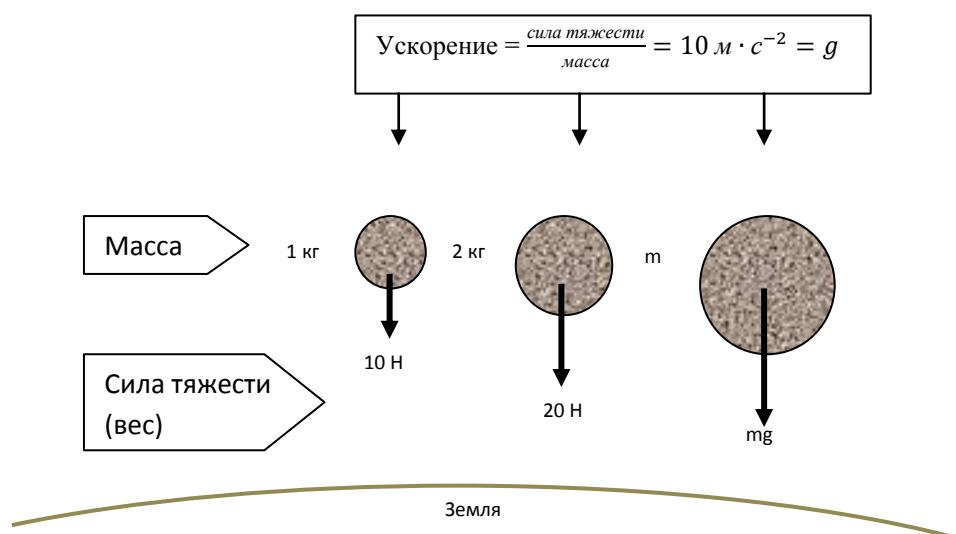
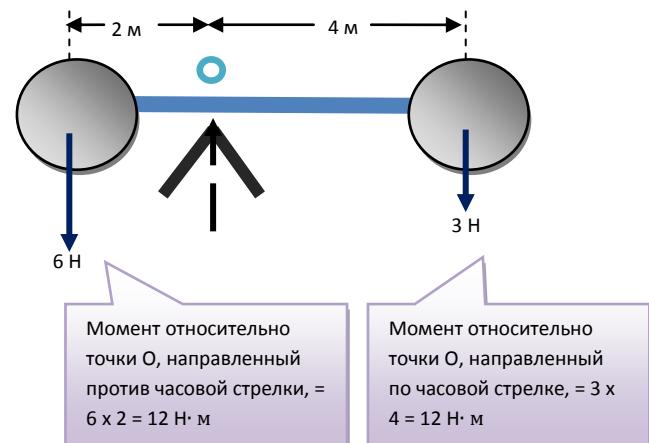
Вблизи поверхности Земли гравитационная сила, действующая на тело массой 1 кг, примерно равна 10 Н: напряженность гравитационного поля Земли составляет $10 \text{ Н} \cdot \text{кг}^{-1}$ и обозначается буквой g .

Можно рассматривать g либо как напряженность гравитационного поля Земли, равную $10 \text{ Н} \cdot \text{кг}^{-1}$, либо как ускорение свободного падения, равное $10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$.

Для более точных расчетов нужно использовать значение $g=9,81$, а не 10.

На приведенном выше рисунке все тела находятся в свободном падении (единственная действующая на них сила – сила тяжести). Из уравнения $F=ma$ следует, что все массы имеют одинаковое направление вниз ускорение g , которое называют ускорением свободного падения.

*Весом называется сила, с которой тело, вследствие притяжения Земли, действует на опору (или подвес), удерживающую его от свободного падения. Сила тяжести и вес равны в покоящихся или равномерно движущихся системах.



Плотность

Плотность рассчитывается следующим образом:

$$\text{плотность} = \frac{\text{масса}}{\text{объем}}$$

В системе СИ единицей плотности является килограмм/кубический метр ($\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$).

Например, 2000 кг воды занимает объём 2м^3 . Тогда плотность воды будет $1000 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Значения величины плотности в $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$

спирт	800	железо	7900
алюминий	2700	свинец	11 300

Давление

Давление рассчитывается так:

$$\text{давление} = \frac{\text{сила}}{\text{площадь}}$$

Единицей давления в системе СИ является ньютон/квадратный метр. Это единица называется паскаль (Па). Например, если сила 12 Н действует на площадь, равную 3 м^2 , то создаваемое ею давление будет равно 4 Па.

Жидкости и газы называются сплошными средами.

В сплошной среде:

- Давление действует во всех направлениях. Возникающая сила всегда перпендикулярна поверхности, на которую оказывается давление.
- С глубиной давление возрастает.

Анализ прямолинейного движения

Графики зависимости скорости от времени

Рассматриваемые ниже графики описывают прямолинейное движение (движение по прямой линии).

На графике А показано, как менялось бы во времени скорость камня, брошенного на Землю вблизи её поверхности, при отсутствии сопротивления воздуха, замедляющего движение.

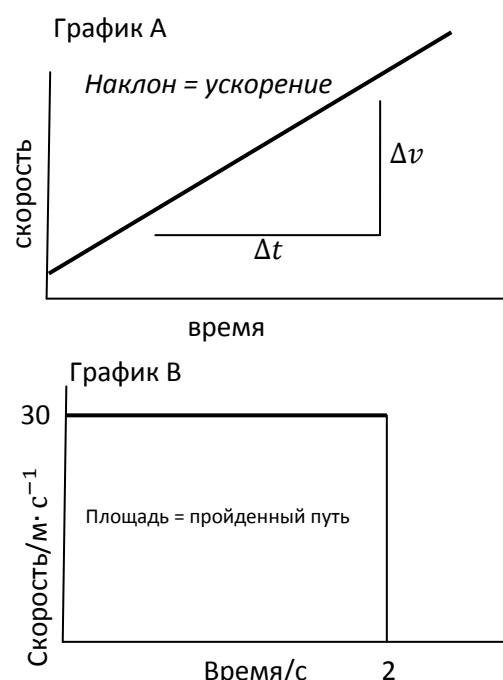
Камень имеет постоянное ускорение a , равное наклону графика:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

В данном случае ускорение равно g ($9,81 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$).

Если сопротивление воздуха большое, то этот график уже не будет прямой линией.

График В соответствует движению автомобиля с постоянной скоростью $30 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. За 2 с машина проходит путь, равный 60 м. Численно этот путь равен площади прямоугольника под графиком, одна из сторон которого равна расстоянию между точками 0 и



2 на оси времени. (Примечание: площадь следует вычислять, используя масштабные множители, а не реальные размеры).

График С

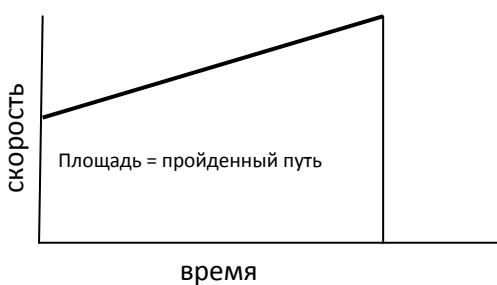


График С соответствует движению автомобиля с переменной скоростью. Тем не менее, и в этом случае мы можем использовать тот же прием: площадь под графиком численно равна пройденному пути. (Это справедливо также и в случае, когда график не является прямой линией).

Уравнение движения

Автомобиль на рисунке имеет постоянное ускорение. Здесь будет рассматриваться только движение между X и Y (т.е. только горизонтальные составляющие векторов скорости и перемещения).

u = начальная скорость (скорость при прохождении точки X)

v = конечная скорость (скорость в точке Y)

a = ускорение

s = перемещение (при движении из X в Y)

t = затраченное время (на перемещение из X в Y).

Ниже приводится график зависимости скорости от времени.

Имеются четыре уравнения (пронумерованные ниже цифрами 1 – 4), которые связывают величины u , v , a , s и t . Их можно получить следующим образом.

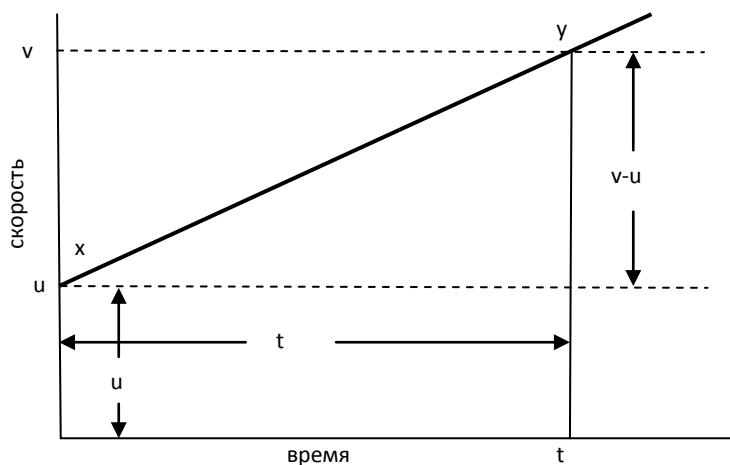
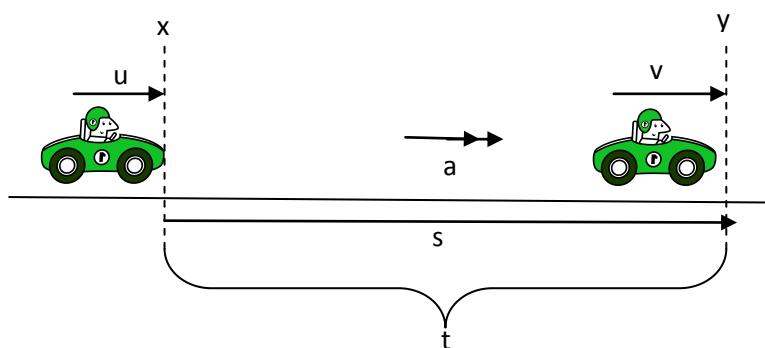
Ускорение определяется наклоном графика. Поэтому $a = \frac{v-u}{t}$. Это выражение можно преобразовать и получить $v = u + at$ (1).

Пройденный путь в данном случае s , равен площади под графиком. Эта площадь равна сумме площадей прямоугольника (высота x основание) и треугольника ($\frac{1}{2} \times$

высота \times основание). Таким образом, получаем, что эта площадь равна $u \times t$ плюс $\frac{1}{2} \times (v - u) \times t$. Из уравнения (1) следует, что $v - u = at$,

поэтому $s = ut + \frac{1}{2} at^2$ (2).

Поскольку пройденный путь = модуль средней векторной скорости \times затраченное время, получаем:



$$s = \frac{1}{2}(v + u)t$$

В результате преобразований уравнений (1) и (3), приводящих к исключению t , получаем:

$$v^2 = u^2 + 2as$$

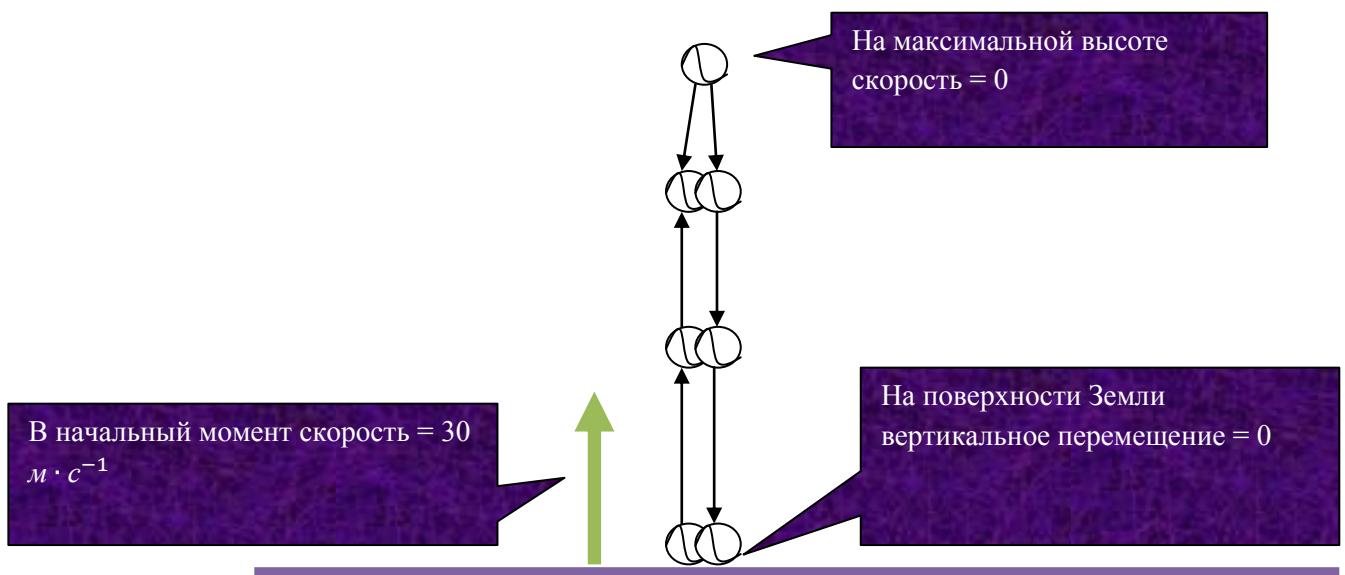
Примечания:

- Приведенные уравнения выполняются только для постоянного ускорения.
- Эти уравнения описывают различные взаимосвязи между величинами, встречающимися в задаче. Вы сами должны решить, какое уравнение лучше всего подходит для решаемой вами задачей.
- Обязательно следует учитывать направление вектора. При рассмотрении горизонтального движения вектор, направленный направо, можно считать положительным (+). При вертикальном движении положительным можно считать вектор, направленный вниз. При таких правилах для камня, брошенного вверх со скоростью $30 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $u = -30 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ и $g = 10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$

Задачи на движение

Здесь мы покажем, как можно использовать уравнения движения при решении задач. Для упрощения в некоторых уравнениях мы не будем выписывать единицы измерения. Также будем полагать, что сопротивление воздуха пренебрежимо мало и что $g = 10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$.

Пример 1.



Мяч бросают вверх со скоростью $30 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. За какое время он достигает высшей точки своей траектории?

В данном случае следует рассматривать движение мяча только от момента броска до момента достижения им верхней точки. Эти два момента и будут «начальным» и «конечным» состояниями в используемых уравнениях.

В верхней точке траектории скорость мяча v будет равна нулю. Тогда, полагая вектора, направленные вниз, положительными, получаем:

$$u = -3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$$

$$v = 0$$

$$a = g = 10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$$

т нужно найти

В данном случае следует использовать уравнение, связывающее u , v , a и t . Таким уравнением является уравнение (1).

$$v = u + at$$

Тогда $0 = -30 + 10t$.

Преобразуя, получаем $t = 3,0 \text{ с}$.

Пример 2.

Мяч бросают вверх со скоростью $30 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Какова максимальная высота, на которую он может подняться?

В этом случае:

$$u = -30 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$$

$$v = 0$$

$$a = g = 10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$$

s нужно найти.

В этой задаче мы должны использовать уравнение (4).

$$V^2 = u^2 + 2as$$

Получаем $0 = (-30)^2 + (2 \times 10 \times s)$

Отсюда $s = -45 \text{ м}$.

(Вектора, направленные вниз, являются положительными, поэтому отрицательное значение s указывает на то, что перемещение направлено вверх.)

Пример 3.

Мяч бросают вверх со скоростью $30 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Найти время падения на землю?

Когда мяч достигнет земли, т.е. вернется в исходную точку, вектор его перемещения будет равен нулю. Поэтому

$$u = -30 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$$

$$s = 0$$

$$a = g = 10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$$

t нужно найти.

В этом случае следует использовать уравнение (2) с предыдущей страницы:

$$s = ut + \frac{1}{2}at^2$$

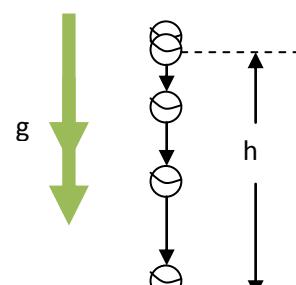
Таким образом, $0 = (-30t) + (\frac{1}{2} \times 10 \times t^2)$

Отсюда получаем $t = 6 \text{ с}$.

(Имеет также решение уравнения $t = 0$, указывающее на то, что перемещение мяча также равно нулю в начальный момент.)

Измерение g

Измеряя время t , необходимое телу, чтобы упасть с известной высоты h , мы можем найти значение величины g (в предположении, что сопротивлением воздуха можно пренебречь).



На рисунке $u = 0$, $a = g$, $s = h$

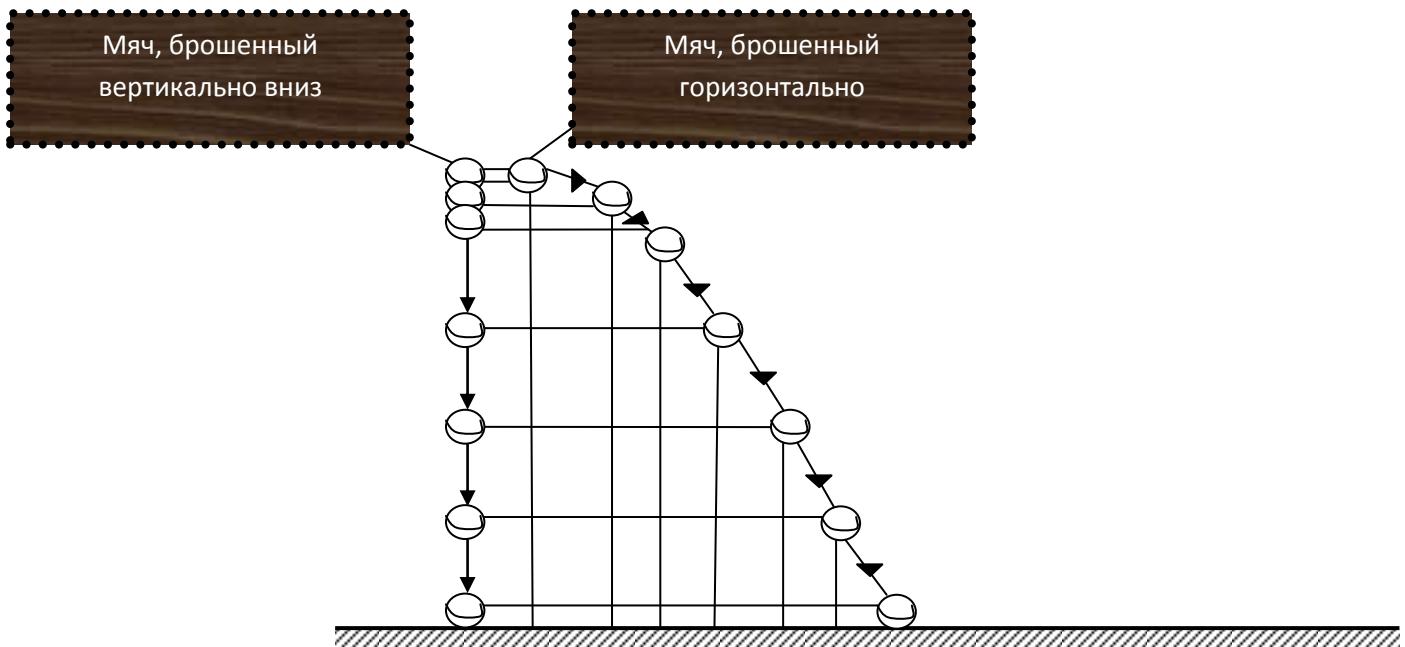
Используя уравнение (2), получаем: $s = ut + \frac{1}{2}at^2$

Так что $h = 0t + \frac{1}{2}gt^2$

Откуда получаем $g = \frac{2h}{t^2}$

Вертикальное и горизонтальное движение

На рисунке один мяч падает вниз с нулевой начальной скоростью, а другой в это



же время бросают горизонтально. Сопротивление воздуха отсутствует. Положение мячей показаны через равные промежутки времени.

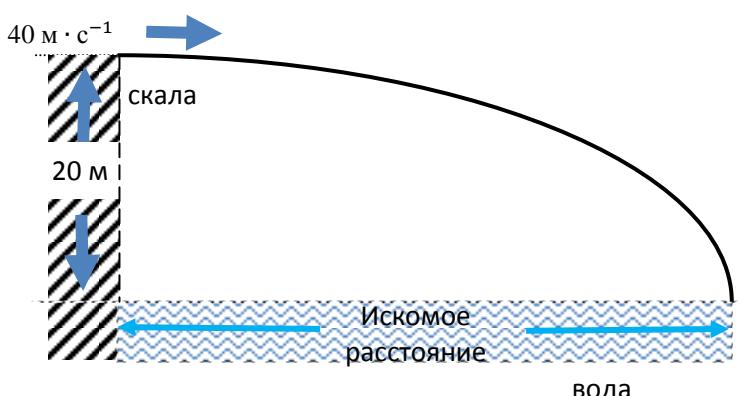
Оба мяча ударяются о землю одновременно. Они имеют одинаковое вертикальное ускорение g .

При падении второй мяч движется в горизонтальном направлении над поверхностью Земли с постоянной скоростью.

Из подобных опытов следует, что движение в вертикальном направлении и движение в горизонтальном направлении происходят независимо друг от друга.

Пример. На рисунке мяч брошен в горизонтальном направлении со скоростью $40 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Какое расстояние он пройдёт в горизонтальном направлении до того как упадет в воду? (Полагаем, что сопротивление воздуха отсутствует и $g = 10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$.)

Во-первых, найдём время, которое потребовалось бы мячу, чтобы достичь поверхности воды при вертикальном падении. Для этого



используем уравнение $s = ut + \frac{1}{2}at^2$, в котором $u = 0$, $s = 20$ м, $a = -10$ м · с⁻², at – искомая величина. В результате получаем $t = 2,0$ с.

Далее рассчитываем как далеко за это время (2 с) мяч пролетит в горизонтальном направлении с постоянной горизонтальной скоростью 40 м · с⁻¹.

Поскольку пройденный путь = средняя скорость \times время, то пройденное горизонтальное расстояние = $40 \times 2 = 80$ м.

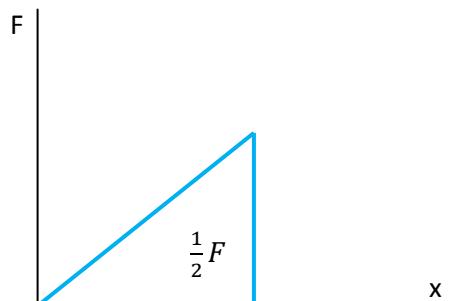
Изменение энергии в колебательных системах

Пружинный маятник

Энергия упругой деформации, запасенная в пружинном маятнике, равна работе, совершенной при растяжении пружины, которая в свою очередь равна площади под графиком зависимости силы от перемещения.

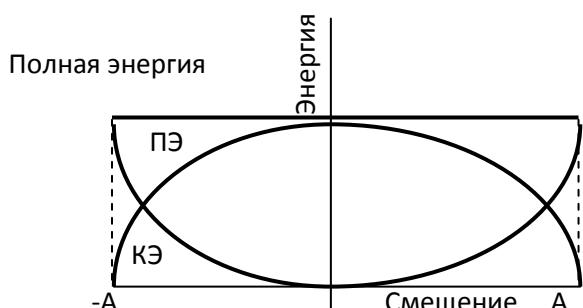
Поскольку $F = kx$, то можно получить ещё одно полезное уравнение для запасенной энергии:

$$\text{запасенная энергия упругой деформации} = \frac{1}{2}kx^2$$



По мере движения пружины к равновесному положению система теряет запасенную энергию упругой деформации и приобретает кинетическую энергию. Но при отсутствии затухания полная энергия остается постоянной.

$$\text{Максимальная запасенная энергия упругой деформации} = \frac{1}{2}kA^2$$



$$\text{Максимальная кинетическая энергия} = \frac{1}{2}m(A\omega)^2$$

Математический маятник

При движении математического маятника из верхнего положения к положению равновесия он теряет потенциальную энергию и приобретает кинетическую энергию.

Если сопротивление воздуха отсутствует, то сумма ПЭ + КЭ является постоянной:

$$\text{Полная энергия} = \text{максимальная КЭ} = \frac{1}{2}m(A\omega)^2$$

Отметим, что во всех уравнениях для полной энергии эта энергия пропорциональна квадрату амплитуды (A^2).

Максимальные
Смещение
Ускорение
Потенциальная
энергия

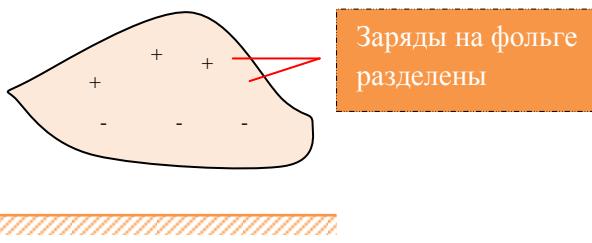
Максимальные
Скорость
Кинетическая
энергия

Электрические заряды и электрические цепи

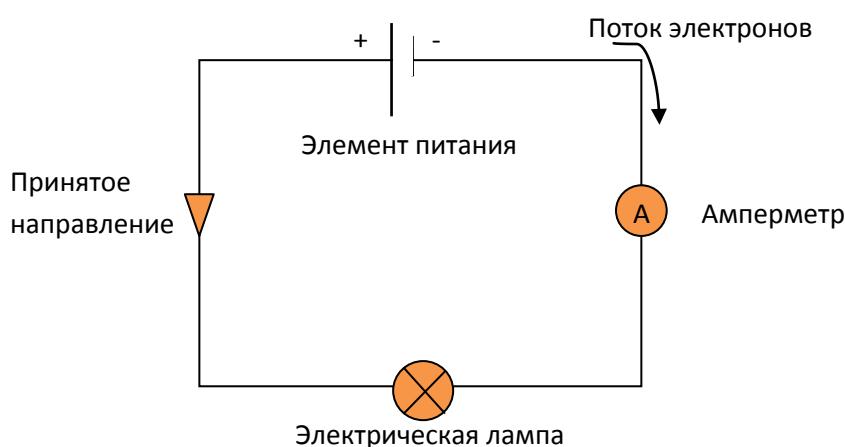
Статическое электричество

Если два материала потерять друг о друге, электроны могут перейти с одного материала на другой. В результате один из материалов приобретает отрицательный заряд, а другой – положительный. Если материалы являются изоляторами, приобретенный заряд не сможет быть их покинуть. Это явление называется статическим электричеством.

Обычно заряженное тело притягивает незаряженное тело. На рисунке заряженный стержень имеет дополнительные электроны (заряды). Будучи незаряженной, фольга имеет одинаковое количество зарядом со знаком + и -. Заряды со знаком – отталкиваются стержнем и стремятся от него удалиться, тогда, как заряды со знаком + притягиваются. Однако сил притяжения больше, из-за меньшего расстояния между взаимодействующими зарядами.



Заряд, который накапливается в какой-то одной определенной области некоторого тела из-за наличия заряда на другом теле, называется индуцированным (наведенным) зарядом.



Электрический ток

В электрической цепи, представленной на рисунке, в результате химической реакции, происходящей в гальваническом элементе, электроны начинают двигаться по цепи от клеммы (-) к клемме (+). Этот поток электронов называется электрическим током.

Стрелка на электрической схеме указывает направление от (+) к (-) которое принято за направление электрического тока и, как видно из схемы, противоположно действительному направлению движения электронов.

Единицей силы электрического тока в системе СИ является ампер (А).

Электрический ток в 1 А эквивалентен потому 6×10^{18} электронов в секунду. Однако ампер определяется по-другому, через магнитное воздействие тока.

Так можно измерять с помощью амперметра, как показано на схеме.

Проводники и изоляторы

Металлы и уголь являются хорошими проводниками электрического тока, потому что в них имеются свободные электроны, которые могут легко перемещаться между атомами этих материалов.

Большинство неметаллических веществ являются изоляторами. Они не проводят ток, поскольку в них все электроны прочно удерживаются своими атомами и не могут свободно двигаться. Хотя жидкости и газы обычно являются изоляторами, они могут проводить электрический ток, если в них имеются ионы.

Полупроводники, подобные кремнию и германию, являются изоляторами, когда они охлаждены, и проводят электричество при нагревании.

Заряд

Заряд можно рассчитать с помощью следующего уравнения:

Заряд = электрический ток \times время

В системе СИ единицей заряда является кулон (Кл).

Например, если электрический ток, равный 1 А, протекает в течение 1 с, то переносимый им заряд будет равен 1 Кл. (Это и есть определение кулона). Аналогично, если электрический ток, равный 2 А, течет в течение 3 с, то переносимый им заряд будет равен 6 Кл.

Напряжение (Разность потенциалов (РП) и электродвижущая сила (ЭДС))

В цепи на рисунке несколько элементов питания соединены последовательно и образуют электрическую батарею питания. Разность потенциалов на выходах этой батареи составляет 12 вольт (В). Это означает, что каждый заряд, равный 1 Кл, «тратит» 12 джоулей (Дж) энергии при движении по цепи от одной клеммы к другой.

Разность потенциалов на выходах лампы также составляет 12 В. Это означает, что при прохождении через лампу заряда, равного 1 Кл, 12 Дж электрической энергии переходит в другие ее формы (тепло и световую энергию).

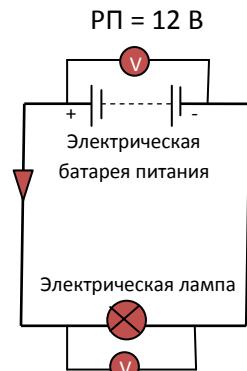
Разность потенциалов может быть измерена с помощью вольтметра, как показано на схеме.

Разность потенциалов, энергия и заряд связаны следующим уравнением:

Преобразованная энергия = заряд \times РП

Например, если заряд, равный 2 Кл, преодолел разность потенциалов 3 В, то преобразованная энергия равна 6 Дж.

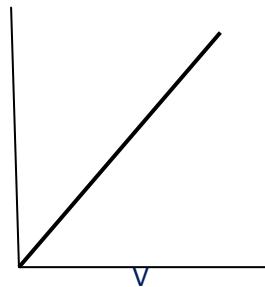
Например, созданное в результате химических реакций внутри батарейки, называется электродвижущей силой (ЭДС). Когда батарейка снабжает током цепь, внутри нее происходят потери энергии, которые уменьшают разность потенциалов на ее клеммах. Например, при подключении в электрическую цепь батарейки карманного фонарика, ЭДС которой равна 3,0 В, разность потенциалов на ее зажимах может составлять всего 2,5 В.



Закон Ома и сопротивление

Если проводник подчиняется закону Ома, то проходящий через него ток I прямо пропорционален приложенной разности потенциалов V при условии что температура не меняется.

Металлы подчиняются закону Ома. График зависимости V от I для металлического проводника при постоянной температуре изображен на рисунке справа. Это можно записать математически $\frac{V}{I} = \text{constant}$.



Сопротивление проводника R рассчитывается так:

$$\text{Сопротивление} = \frac{R_{\text{П}}}{\text{электрический ток}}$$

$$\text{В математическом виде } R = \frac{V}{I}$$

В системе СИ единицей сопротивления является от (Ом).

Например, если при разности потенциалов 1 В в цепи возникает электрический ток 1 А, то сопротивление будет равно 1 Ом. (Это и есть определение ома.)

Аналогично, если при разности потенциалов 12 В в цепи возникает электрический ток 4 А, то сопротивление равно 3 Ом.

Сопротивление металлического проводника (типа проволоки) зависит от различных факторов:

⌚ Длины. Длинная проволока имеет большее сопротивление, чем короткая.

⌚ Поперечного сечения. Тонкая проволока имеет большее сопротивление, чем толстая.

⌚ Температуры. Нагретая проволока имеет большее сопротивление, чем холодная.

⌚ Типа вещества. Проволока из никеля (хромоникелевого сплава) имеет большее сопротивление, чем медная проволока тех же размеров.

Примечание:

❖ Сопротивление металлов возрастает с повышением температуры, тогда как у полупроводников оно в этом случае уменьшается.

Резистивные элементы электрической цепи

Нагревательные элементы. Если проводник (например, проволока) имеет сопротивление, то при прохождении по нему тока электрическая энергия превращается в теплоту. Этот эффект используется в нагревательных приборах.

Резисторы. Эти детали специально сконструированы для создания сопротивления. Они необходимы в электрических цепях для создания заданного электрического тока в других ее компонентах.

Переменные резисторы. В этих деталях электросхем можно, меняя длину материала, обладающего сопротивлением, управлять их сопротивлением.

Терморезисторы (термисторы). Эти элементы имеют сопротивление, сильно меняющееся при изменении температуры (например, высокое при низкой температуре и низкое при высокой температуре). В их состав входят полупроводниковые материалы.

Фоторезисторы имеют высокое сопротивление в темноте и низкое на свету.

Диоды имеют очень высокое сопротивление в одном направлении протекания электрического тока и очень маленькое – в другом. В действительности



электрический ток в них может идти только в одном направлении.

Соединение проводников

Последовательно соединенные резисторы. В этом случае через источник питания и все резисторы течет одинаковый ток. Однако напряжение на источнике равно сумме напряжений на резисторах.

Параллельно соединенные резисторы. Напряжение на источнике питания и на всех резисторах одинаковые. Так же, создаваемый источником питания, равен сумме токов через резисторы.

Мощность

Мощность P рассчитывается по формуле: мощность $= P \cdot I$

В математическом виде $P = VI$

Например, если разность потенциалов на резисторе равна 12 В, а ток через него составляет 3 А, то мощность $= 12 \times 3 = 36$ Вт (втт). Другими словами, на резисторе каждую секунду 36 джоулей электрической энергии превращается в тепло.

Уравнение для мощности можно записать так:

$$P = I^2 R \quad P = \frac{V^2}{R}$$

Электрический ток и сопротивление

Электрический ток, заряд и электроны

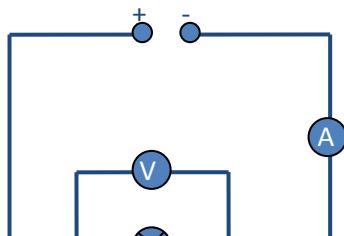
Ток в проволоке представляет собой поток электронов. Если I – это ток, а Q – заряд, перемещенный через любую точку за время t , то: $Q = It$

Согласно этой формуле, ток, равный 1 ампер (А), представляет собой заряд, перемещающийся со скоростью 1 кулон (Кл) в секунду. Заряд электрона равен $e = -1,60 \times 10^{-19}$ Кл.

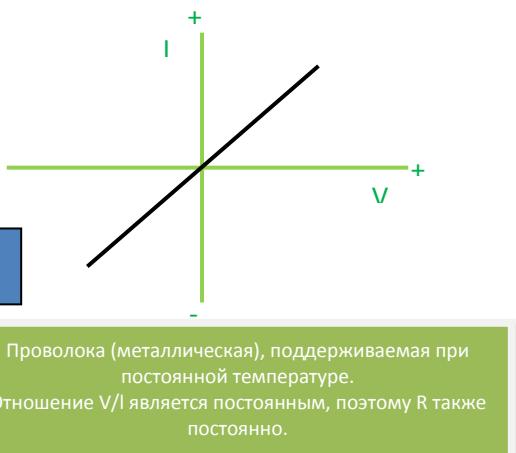
Поэтому 1 Кл – это заряд, переносимый $1/e$ электронами, т.е. $6,24 \times 10^{18}$ электронами. Следовательно, поток $6,24 \times 10^{18}$ электронов в секунду создает ток 1А. Однако, поскольку e является отрицательным, поток электронов, движущийся направо, создает электрический ток, движущийся налево.

Сопротивление

Источник постоянного тока
С изменяемыми параметрами

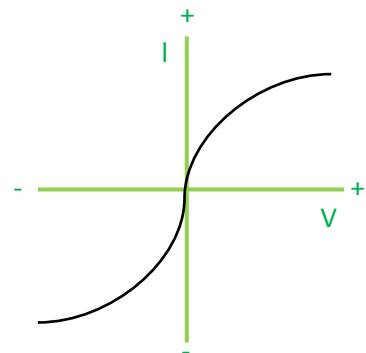


Амперметр или
миллиамперметр (mA)



Если проводник имеет сопротивление, то при прохождении электрического тока в нем происходит диссипация энергии (превращение ее во внутреннюю энергию).

Разность потенциалов V (в В) на выходах проводника, электрический ток I (в А) через него и его сопротивление R (в Ом) связаны уравнением: $R = \frac{V}{I}$



Нить лампы накаливания (металлическая).
При увеличении тока нить нагревается.
Отношение V/I возрастает, поэтому R также возрастает.

Если выполняется закон Ом, то сопротивление проводника является постоянным для любой заданной температуры (т.е. R не зависит от V).

Связь между током I и напряжением (разность потенциалов) V можно исследовать, используя изображенную на рисунке электрическую цепь. Там же приводятся графики для трех различных элементов цепи, имеющих сопротивление. (Отрицательная размерность потенциалов означает, что клеммы источника постоянного тока поменялись местами.)

Сопротивление и

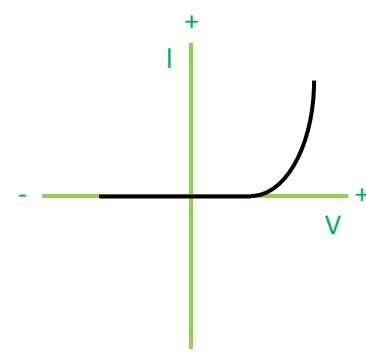
температура

Проводящее твердое тело можно представить как пространственную решетку, в узлах которой расположены атомы. Когда течет ток, электроны движутся сквозь эту решетку.

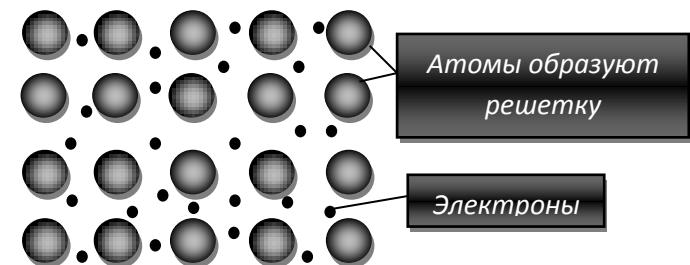
Металлы. При своем движении в металле свободные электроны испытывают случайные столкновения с атомами решетки. При этих столкновениях, которые являются неупругими, энергия электронов передается решетке в виде внутренней энергии. Это объясняет, почему металлы имеют сопротивление. При повышении температуры металла, атомы решетки начинают колебаться сильнее. Свободные электроны сталкиваются с атомами решетки чаще, что и увеличивает сопротивление.

Полупроводники (например, кремний). При низких температурах электроны прочно удерживаются у своих атомов. При повышении температуры все большее число электронов становится свободными и может принять участие в проводимости. Развитию этого процесса не препятствует усиление решеточных колебаний, поэтому сопротивление уменьшается. В районе $100-150^{\circ}\text{C}$ наступает пробой – резкое падение сопротивления и такое же резкое увеличение электрического тока. Это объясняет, почему полупроводниковые приборы могут быть легко повреждены при перегреве.

Проводимость полупроводников может быть изменена при помощи их легирования небольшими количествами примесей. К примеру, чтобы сделать диод,



диод (полупроводник).
Сопротивление R в одном направлении очень велико. Оно намного меньше в другом направлении и уменьшается при увеличении тока.



легируют кусочек кремния таким образом, чтобы при протекании тока в одном направлении его сопротивление увеличивалось, а в другом направлении – уменьшалось.

На рисунке представлены кривые зависимости сопротивления от температуры для типичного металлического проводника и для одного из типов термисторов, содержащего полупроводниковые материалы.

Сверхпроводимость

При охлаждении металлов почти до абсолютного нуля достигается некоторая критическая температура (соответствующая фазовому переходу в сверхпроводящее состояние), при которой сопротивление резко падает до нуля. Это явление называется сверхпроводимостью. Оно имеет место, когда отсутствует взаимодействие между свободными электронами и решеткой и объясняется при помощи квантовой теории. Некоторые специально разработанные соединения металлов имеют критические температуры порядка 100 К.

Если катушка электромагнита сделана из сверхпроводящего материала, то в нем может возникнуть огромный электрический ток, и при этом потери энергии будут отсутствовать. Это позволяет создавать очень сильные магнитные поля.

Передача энергии

На приведенном рисунке заряд Q переносится через резистор за время t . При этом совершается работа W , поэтому передается энергия W – электроны теряют электрическую потенциальную энергию (она нагревается).

Величины W , Q и V связаны следующим уравнением:

$$W = QV$$

Но $Q = It$, поэтому $W = VIt$ (1).

Используя соотношение $V = IR$, получаем: $W = I^2Rt$ и $W = V^2t/R$ (2)

Например, при протекании в течение 5 с тока 2 А через резистор, сопротивление которого составляет 3 Ом, работа $W = 2^2 \times 3 \times 5 = 60$ Дж. Отсюда, рассеянная энергия равна 60 Дж. Увеличение тока в два раза в четыре раза увеличивает потери энергии.

Примечание:

❖ Уравнение (1) может быть использовано для расчета преобразования полной энергии во всех случаях, когда электрическая потенциальная энергия превращается в другие формы (например, кинетическую энергию и внутреннюю энергию в электрическом моторе). Уравнение (2) справедливо только в случае, когда вся энергия превращается во внутреннюю энергию. Тоже самое можно сказать и об уравнениях для мощности, которые приводятся ниже.

Поскольку мощность $P = W/t$, из уравнений (1) и (2) следует, что



$$P = VI \quad P = I^2R \quad P = V^2/R$$

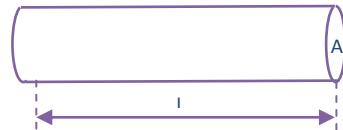
Удельное сопротивление

Сопротивление R проводника зависит от его длины l и поперечного сечения A : $R \propto \frac{l}{A}$

Это соотношение можно записать в виде уравнения, используя константу ρ , называемую удельным сопротивлением материала.

$$R = \frac{\rho l}{A}$$

При помощи этого уравнения можно рассчитать сопротивление проволоки, если известны ее размеры и удельное сопротивление.



Удельные сопротивления в Ом · м
Медь: $1,55 \times 10^{-8}$
Алюминий: $2,50 \times 10^{-8}$

Электропроводность и удельная электропроводность

Если к проводнику приложена разность потенциалов V и по нему протекает электрический ток I , то тогда $V = IR$. Однако поскольку V является причиной тока, а I – его следствием, то более логично записать это уравнение следующим образом:

$$I = \frac{1}{R} \times V$$

Величина $1/R$ называется электропроводностью, $1/\rho$ – удельной электропроводностью.

Анализ электрических цепей

Примечание:

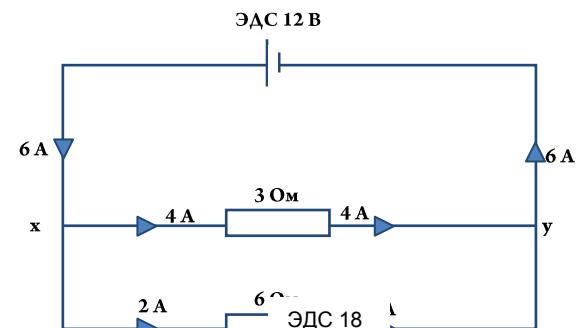
❖ Буква E в этом разделе используется для обозначения ЭДС, а не напряженности электрического поля.

Первый закон Кирхгофа

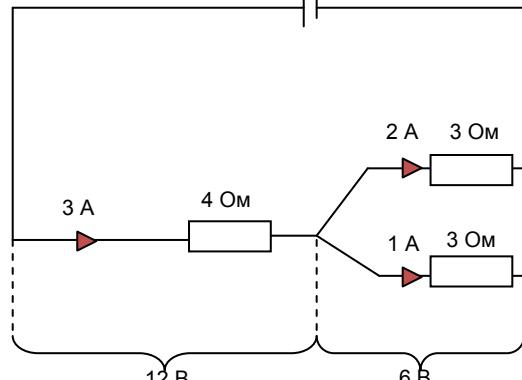
На рисунке токи в узлах распределены согласно закону, который применим ко всем цепям:

Полный ток, выходящий из узла = полный ток, входящий в узел

Это равенство называют первым законом Кирхгофа. Он выполняется, потому что в замкнутой цепи заряд не возникает и не исчезает. Он сохраняется. Поэтому суммарная скорость потока заряда является постоянной.



Второй закон Кирхгофа



В любом замкнутом электрическом контуре алгебраическая сумма всех ЭДС равна алгебраической сумме всех разностей потенциалов (т.е. алгебраической сумме всех произведений IR).

Приведенная на рисунке схема называется электрической цепью. В действительности же, элемент питания входит в состав двух замкнутых электрических цепей. Чтобы избежать путаницы, эти замкнутые цепи называются электрическими контурами.

В указанной электрической цепи заряд покидает источник питания, имея электрическую потенциальную энергию. При перемещении заряда по контуру его энергия «тратится» поэтапно в виде тепла. Закон сохранения энергии для электрической цепи называется вторым законом Кирхгофа и формулируется следующим образом.

Примечания:

- ❖ Из этого закона следует, что разность потенциалов одна и та же для параллельно соединенных участков цепи.
- ❖ Слово «алгебраическая» предполагает, что следует учитывать полярность источника питания. Например, в цепи на рисунке справа ЭДС правой батарейки считается отрицательной (-4 В), потому что она противодействует текущему току. Поэтому:

$$\text{Алгебраическая сумма всех ЭДС} = 18 + (-4) = +14 \text{ В}$$

$$\text{Алгебраическая сумма всех произведений } IR = (2 \times 3) + (2 \times 4) = +14 \text{ В}$$



Последовательное соединение резисторов

Если резисторы R_1 и R_2 имеют полной сопротивление R , то их можно заменить одним резистором с сопротивлением R .

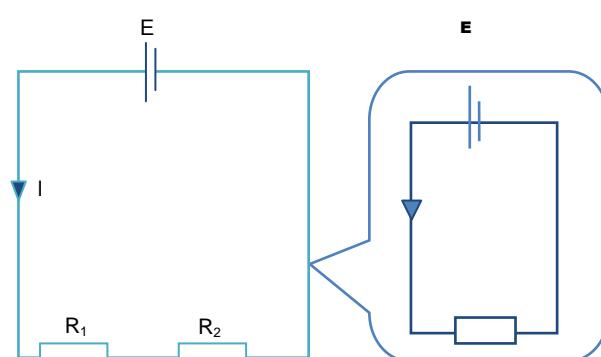
Из первого закона Кирхгофа следует, что по всей цепи протекает один и тот же электрический ток I .

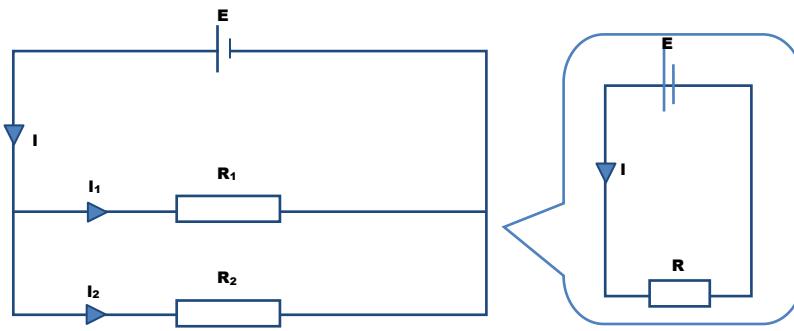
Из второго закона Кирхгофа следует, что $E = IR$ и $E = IR_1 + IR_2$.

Поэтому $IR = IR_1 + IR_2 \quad \therefore$

$$R = R_1 + R_2$$

Например, если $R_1 = 3 \text{ Ом}$ и $R_2 = 5 \text{ Ом}$, то тогда $R = 9 \text{ Ом}$.





Параллельное соединение резисторов

Из второго закона Кирхгофа (примененного к различным контурам):

$$E = IR$$

$$E = I_1 R_1$$

$$E = I_2 R_2$$

Из первого закона Кирхгофа $I = I_1 + I_2$.

$$\text{Поэтому } \frac{E}{R} = \frac{E}{R_1} + \frac{E}{R_2} \quad \therefore \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Например, если $R_1 = 3 \text{ Ом}$ и $R_2 = 6 \text{ Ом}$, тогда $1/R = 1/3 + 1/6 = 1/2$. Откуда $R = 2 \text{ Ом}$.

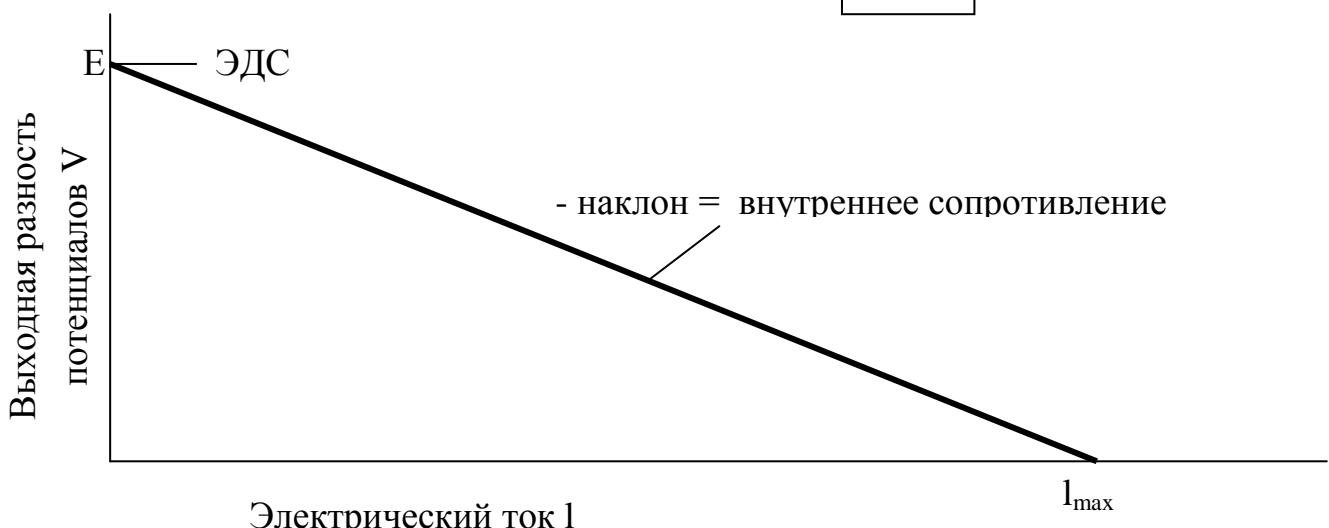
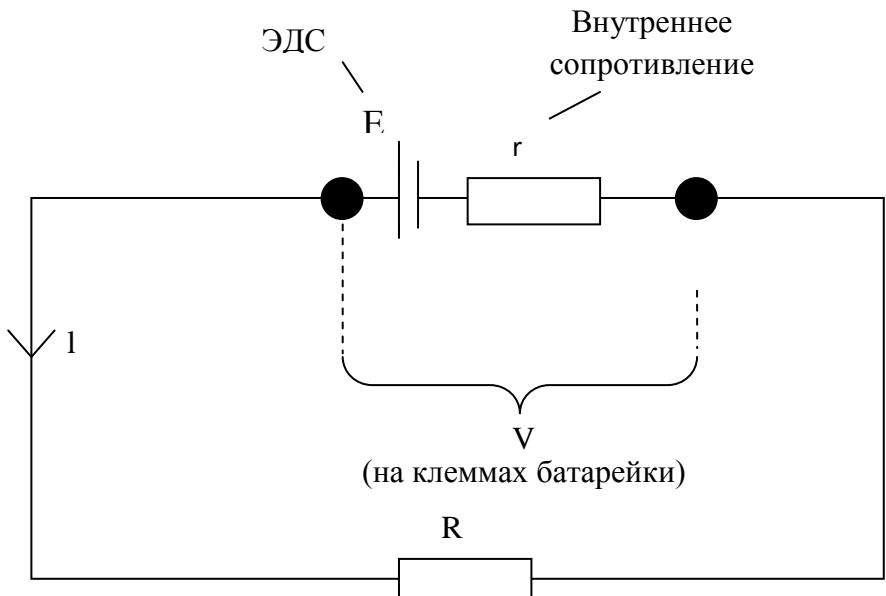
Внутреннее сопротивление

Когда батарейка дает ток, разность потенциалов на ее выходах меньше, чем ее ЭДС. Чем больше ток, тем меньше разность потенциалов на выходах. Это уменьшение напряжения

происходит из-за потери энергии в батарейке. И действительно батарейка имеет внутреннее сопротивление.

Математически, его можно рассматривать как дополнительное сопротивление в цепи.

На рисунке батарейка снабжает электрическим током I внешнюю цепь.



Батарейка имеет внутреннее сопротивление r .

Из второго закона Кирхгофа $E = IR + Ir$

Но $V = IR$, поэтому $E = V + Ir$

Отсюда $V = E - Ir$ (1).

На рисунке изображен график зависимости разности потенциалов на выходах V от электрического тока I . В отличие от предыдущих графиков, здесь V отложено по вертикальной оси.

Примечания:

❖ Когда I равно 0, $V = E$. Другими словами, когда источник питания (батарейка) включен в разомкнутую цепь (нет внешней цепи), то разность потенциалов на его клеммах равна его ЭДС.

❖ Когда R равно 0, $V = 0$. Иначе говоря, при коротком замыкании (выходы батарейки напрямую соединены друг с другом), разность потенциалов на выходах батарейки равно нулю. В этом случае через батарейку протекает максимально возможный ток I_{max} , равный E/r . При этом вся энергия выхода батарейки превращается во внутреннюю энергию и выделяется в виде тепла.

❖ Из соотношения $I_{max} = E/r$ следует, что $r = E/I_{max}$. Отсюда наклон графика зависимости выходной разности потенциалов от электрического тока I_{max} численно равен внутреннему сопротивлению батарейки.

Если обе части уравнения (1) умножить на I , то получим $VI = EI - I^2r$.

Ток и дрейфовая скорость

Большинство электронов связано со своими атомами. Однако в металле имеются свободные электроны, которые могут перемещаться между атомами. При приложении разности потенциалов, начинает течь ток. Носителями заряда при этом являются свободные электроны.

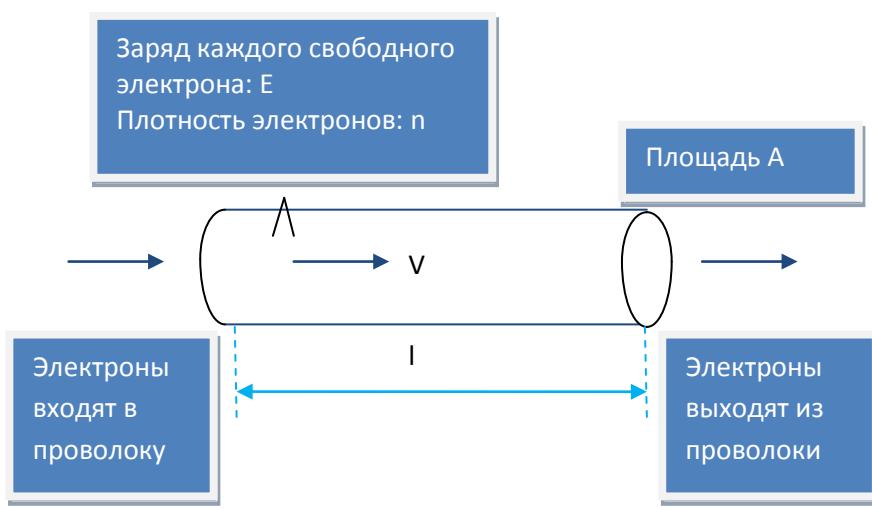
В проволоке, изображенной на рисунке, свободные электроны (каждый имеет заряд e) движутся со средней скоростью v . Здесь n – это плотность свободных электронов: число электронов в единице объема (в м^{-3}).

Число свободных электронов в проволоке = nAl

Поэтому полный заряд, переносимый свободными электронами = $nAl e$

Поскольку $\text{время} = \text{путь}/\text{скорость}$:

Время, необходимое для того, чтобы все электроны прошли через сечение, имеющее площадь $A = 1/v$



Так как электрический ток $I = \text{заряд}/\text{время}$

$$I = \frac{nAel \times v}{l}, I = nAev$$

В этих формулах v называют дрейфовой скоростью. Для тока в

проводке она, обычно, может быть меньше миллиметра в секунду.

Плотность J – это ток, проходящий через единицу площади (м^2).

Примечания:

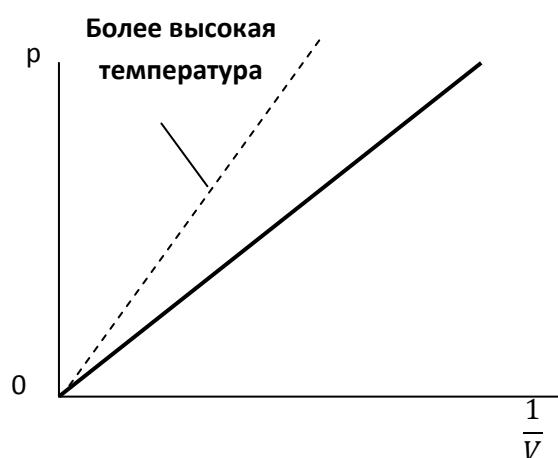
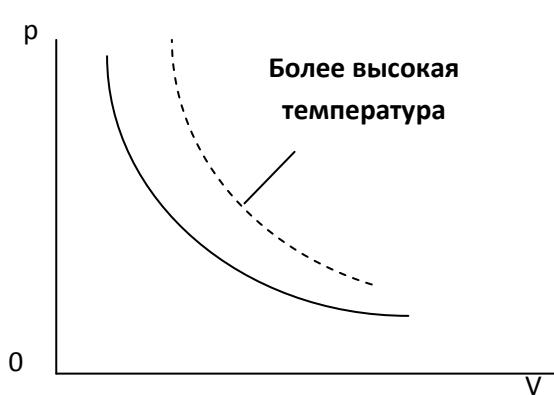
❖ Различные металлы имеют различные плотности свободных электронов. Для меди эта плотность равна $8 \times 10^{28} \text{ м}^{-3}$.

❖ В проводящей жидкости носителями заряда являются ионы. В этом случае также можно применять все приведенные выше уравнения, только теперь заряд e и плотность n электронов должны быть заменены на заряд и плотность ионов.

Газовые законы

Закон Бойля – Мариотта

Из экспериментов следует, что для данной массы газа при постоянной



температуре давление p возрастает при увеличении V . График зависимости давления p от объема V представлен на рисунке.

Согласно закону Бойля – Мариотта для данной массы газа при постоянной температуре $PV = \text{const}$

Если $pV = \text{const}$, то $p \propto 1/V$. Поэтому график зависимости давления p от $1/V$ является прямой, проходящей через начало координат.

Примечания:

❖ Значение константы зависит от массы газа и его температуры. Пунктирные линии демонстрируют влияние повышения температуры.

❖ При некоторых условиях, поведение реальных газов будет отличаться от предсказанного законом Бойля – Мариотта.

Реальные и идеальные газы

Большинство газов состоят из молекул. Для удобства, в этом разделе, частицы, из которых состоят все газы, будут называться «молекулами», даже если на самом деле они являются одиночными атомами.

Идеальный газ – это газ, который в точности подчиняется закону Бойля – Мариотта. Можно показать, что для такого газа:

❖ Силы притяжения между молекулами пренебрежимо малы.

❖ Сами молекулы имеют пренебрежимо малый объем по сравнению с объемом, занимаемым газом.

Идеальные газы не существуют. Однако поведение реальных газов при низких плотностях и температурах, намного превышающих температуру конденсации, можно приближенно описывать с помощью закономерностей, имеющих место для идеальных газов.

Закон давления (Гей – Люссака)

Для данной массы газа при постоянном объеме, давление p возрастает с возрастанием абсолютной температуры T , так показано на рисунке.

Согласно закону давления для данной массы газа при постоянном объеме $\frac{P}{T} = \text{const}$

Из этого уравнения следует, что $p \propto T$. Это объясняет, почему график является прямой, проходящей через начало координат.

Примечания:

❖ Связь между p и T может быть использована для задания температурной шкалы. Однако можно показать, что для идеального газа эта шкала в точности совпадает с термодинамической шкалой, основанной на тех же самых реперных точках.

❖ Закон давления предсказывает, что давление любого идеального газа должно быть равно нулю при абсолютном нуле. Это утверждение используется, чтобы определить нуль (0 К) по шкале Кельвина и найти его эквивалент по шкале Цельсия (-273, 15 °C).

Закон Шарля

Для данной массы газа при постоянном давлении, объем V увеличивается при увеличении абсолютной температуры T , как показано на рисунке.

Согласно закону Шарля, для данной массы газа при постоянном давлении

$$\frac{V}{T} = \text{const}$$

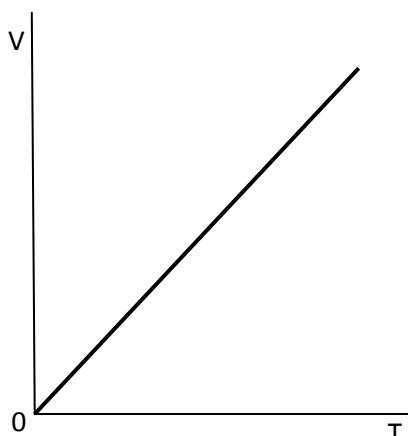
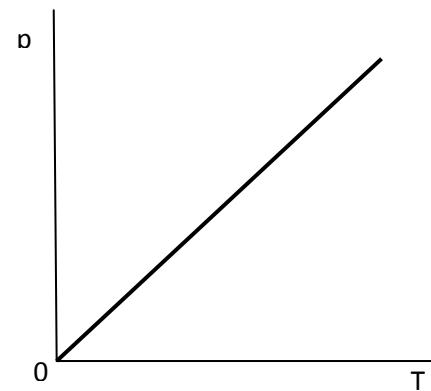
Из этого уравнения следует, что $V \propto T$, что и объясняет, почему приведенный на рисунке график представляет собой прямую, проходящую через начало координат.

Примечание:

❖ Закон Шарля предсказывает, что при абсолютном нуле объем равен нулю. Однако ни один реальный газ не ведет себя как идеальный газ при почти нулевом объеме и температуре.

Уравнение состояния

Приведенные выше три газовых закона можно объединить в одно уравнение.



Если данная масса газа переходит из состояния 1 в состояние 2 при различных давлениях, объемах и абсолютных температурах, как показано на рисунке, то

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

Это соотношение называется уравнением состояния для идеального газа.

Обратите внимание, что в этом уравнении:

Если $T_1 = T_2$, то $p_1 V_1 = p_2 V_2$ (Закон Бойля – Мариотта)

Если $V_1 = V_2$, то $p_1/T_1 = p_2/V_2$ (Закон давления (Гей – Люссака))

Если $p_1 = p_2$, то $V_1/T_1 = V_2/T_2$ (Закон Шарля).

