МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Н.С. Кравченко

ПРОПЕДЕВТИЧЕСКИЙ
КУРС ФИЗИКИ
ДЛЯ ИНОСТРАННЫХ СТУДЕНТОВ

Рекомендовано в качестве учебника
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета

Издательство
Томского политехнического университета
2013

УДК 53(075.8)
ББК 22.3 Я 73
К 772

Кравченко Н.С.

К 772 Пропедевтический курс физики для иностранных студентов: Учебник / Н.С. Кравченко; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 561 с.

В учебнике в доступной языковой форме для иностранных студентов подготовительного отделения высших учебных заведений, изучающих физику на русском языке, изложены основные вопросы механики, молекулярной физики и термодинамики. В учебнике используется минимальная лексика, необходимая для объяснения физических явлений и законов.

Учебник состоит из шести глав и содержит систему адаптированных текстов, упражнений, образцы предметных и речевых действий, формирующих алгоритм познавательной деятельности студентов. Большое количество упражнений, разная степень их сложности позволяет преподавателю выбрать последовательность выполнения заданий при обучении студентов, имеющих различный уровень подготовки. Учебник иллюстрирован большим количеством рисунков, таблиц и графиков, что делает изложение материала более наглядным и доступным.

Учебник создан в соответствии с программой подготовительного отделения университетов, обучающих иностранных граждан.

УДК 53(075.8)
ББК 22.3 Я 73

Рецензенты

Доктор физико-математических наук, профессор Томского государственного педагогического университета *Ю.П. Кунашенко*

Доктор физико-математических наук, профессор Томского государственного университета *С.И. Борисенко*

Кандидат педагогических наук, доцент Томского политехнического университета *Е.В. Лисичко*

Предисловие

Учебник предназначен для иностранных студентов подготовительного отделения, изучающих физику на русском языке.

Цель данного учебника – изложить физические основы механики, молекулярной физики и термодинамики в доступной языковой форме, а также повторить изученный ранее материал, углубить имеющиеся знания по физике, активизировать и пополнить лексический запас студентов. Последовательность изложения материала направлена на подготовку студентов к обучению на первом курсе вуза.

Элементарная физика – исторически сложившаяся группа теорий, принятая в мире в качестве основы научного описания явлений природы, знание которой согласно российскому стандарту образования необходимо для поступления в вуз. Теоретическое описание в физике предполагает формирование системы понятий на основе модельного подхода. Простота моделей элементарной физики, допускающих исчерпывающее количественное описание, вводит в теорию математический аппарат. Этот аппарат ограничивается методами элементарной математики и включает лишь отдельные понятия высшей математики – аналитической геометрии и математического анализа, поэтому в учебник включены элементы векторной алгебры.

Учебник состоит из шести глав: «Физические термины. Элементы векторной алгебры», «Кинематика», «Динамика», «Статика», «Молекулярная физика и термодинамика», «Англо-русский словарь физических терминов».

В учебнике изложен теоретический материал, соответствующий требованиям российского стандарта школьного образования по физике. Даны определения физических величин, сформулирован их физический смысл. Учебник содержит систему адаптированных текстов, упражнений, образцы предметных и речевых действий. В учебнике используется минимальная лексика, необходимая для объяснения физических явлений и законов. Последовательность введения новой терминологии объясняется логикой изложения материала. Грамматический материал, являющийся новым на данном этапе, вынесен перед текстом.

Большое количество упражнений, разная степень их сложности позволяет преподавателю выбрать последовательность выполнения заданий при обучении студентов, имеющих различный уровень подготовки.

Учебник содержит большое количество рисунков, таблиц и графиков, что делает изложение материала более наглядным и доступным.

Учебник создан в соответствии с программой подготовительного отделения университетов, обучающих иностранных граждан.

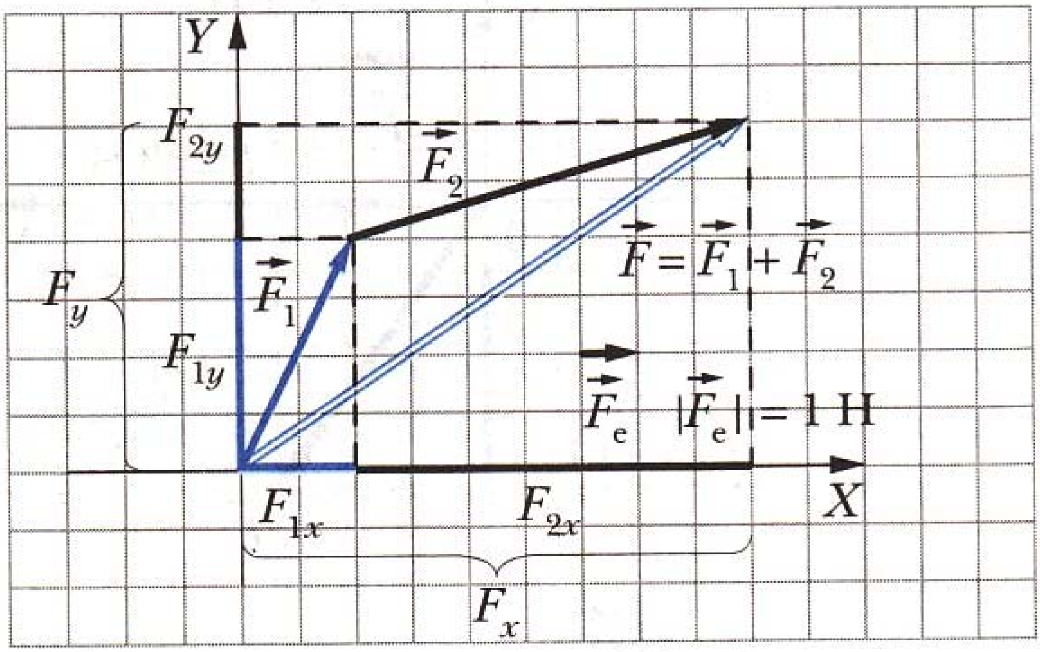
Любой учебник предназначен не только для студентов, но и для преподавателей. Автор надеется, что и те, и другие найдут в данном учебнике много полезного для своей работы. Например, для конкретной группы студентов (конкретной специальности или направления), выделяя или опуская некоторые моменты, преподаватель может определить необходимый объем изучаемого материала.

Учебник является результатом многолетней работы автора с иностранными студентами подготовительного отделения Национального исследовательского Томского политехнического университета, проходившими обучение на русском языке. При подготовке текстов и упражнений данного учебника использованы материалы учебных пособий Кравченко Н.С. «Механика»; Кравченко Н.С. «Рабочая тетрадь», прошедших многолетнюю апробацию в учебном процессе Национального исследовательского Томского политехнического университета (ТПУ).

Глава 6 «Русско-английский словарь физических терминов» написана с участием доцента кафедры теоретической и экспериментальной физики ТПУ Тухфатуллина Т.А. Автор выражает Тухфатуллину Т.А. искреннюю признательность и благодарность за сотрудничество.

Глава 1.

ФИЗИЧЕСКИЕ ТЕРМИНЫ. ЭЛЕМЕНТЫ ВЕКТОРНОЙ АЛГЕБРЫ



Тема 1. **ОСНОВНЫЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОНЯТИЯ**

1.1. **Линия. Параллельные, пересекающиеся прямые. Угол наклона**

Новые слова и словосочетания

линия	пересекающийся
прямая линия	угол
кривая линия	угол наклона
вертикальный(ая)	градус(ов)
горизонтальная	плоскость
наклонный	параллельный
точка пересечения	перпендикулярный
прямой угол	острый угол
отрезок линии	тупой угол

Физика – точная наука. Она устанавливает количественные взаимосвязи между различными физическими величинами. Эти взаимосвязи в общем виде записываются с помощью математических формул. При записи и преобразованиях математических формул используются стандартные математические знаки и функции.

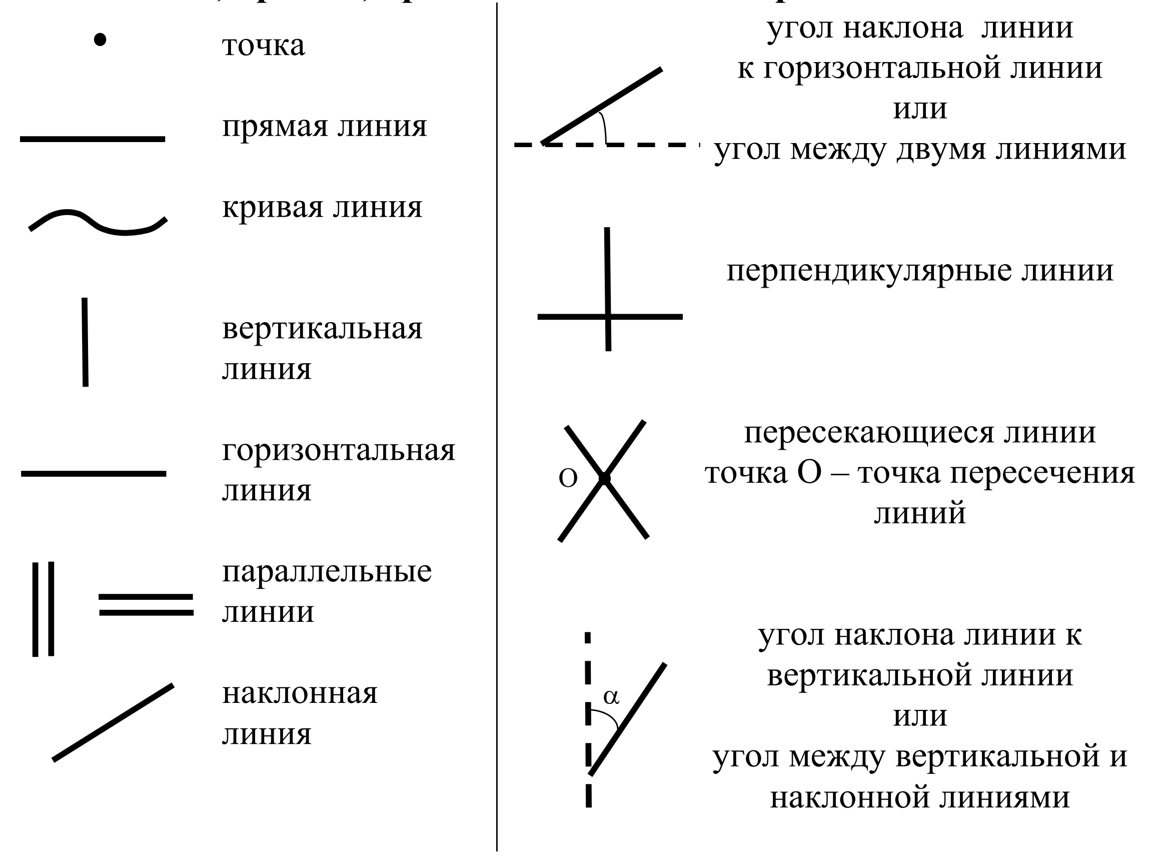
Стандартные математические знаки

Обозначение	*Читается*	Обозначение	*Читается*
$=$	равно	$\leq$	меньше или равно
$\approx$	приближённо равно	$\geq$	больше или равно
$\equiv$	тождественно равно	$>$	больше
$\neq$	не равно	$<$	меньше
∞	бесконечно большой; бесконечность	$>>$	много больше; велико по сравнению с …
ln	натуральный логарифм	$<<$	много меньше; мало по сравнению с …
sin	синус	lim	предел
cos	косинус	$\angle$	угол

Для определения положения тел в пространстве, характеристик их движения в пространстве и во времени в физике широко используются понятия евклидовой геометрии (точка, прямая, угол, вектор и так далее) и общепринятая в математике терминология.

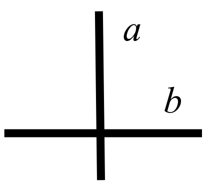
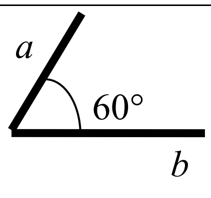
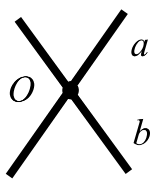
Примеры:

точка, прямая, кривая линии и некоторые их свойства



Прямые линии (прямые) могут иметь обозначения:

линия *a*	линия *b*	линия *AB*	отрезок линии *CD*

		
Линии *a* и *b* – это перпендикулярные линии	Угол наклона линии *a* к линии *b* равен 60°	Линии *a* и *b* – это пересекающиеся линии

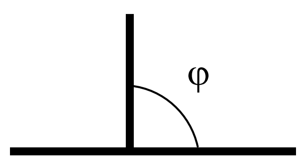
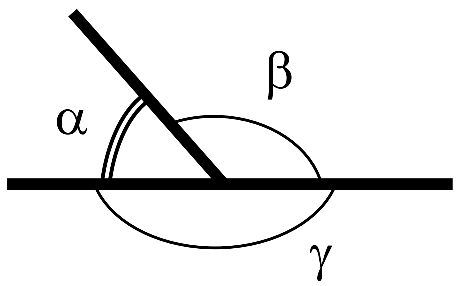
Угол – геометрическая фигура, состоящая из двух различных лучей (прямых), выходящих из одной точки. Лучи называются сторонами угла, а их общее начало – вершиной угла.

В математических выражениях углы часто обозначают греческими буквами α, β, γ, θ, φ и другими буквами. Также часто углы обозначают тремя точками, например $\angle ABC$. В такой записи B – вершина, а A и C - точки, лежащие на разных сторонах угла.

Угол наклона измеряют (определяют) в градусах или в радианах (долях от π). Число π (пи) = 180°.

Острый угол – угол, величина которого $0 \le \alpha < 90°$, или $0 \le \alpha < \pi/2$ рад.
Прямой угол – угол, величина которого $\alpha = 90°$ или $\alpha = \pi/2$ рад.
Тупой угол – угол, величина которого $90° \le \alpha < 180°$ или $\pi/2 \le \alpha < \pi$.
Развернутый угол – угол, величина которого $\alpha = 180°$ или $\alpha = \pi$ рад.
Полный угол – угол, величина которого $\alpha = 360°$ или $\alpha = 2\pi$ рад.

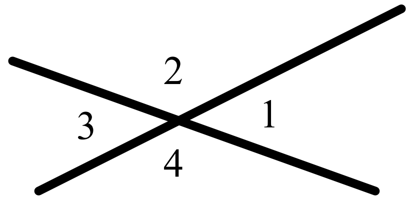
Примеры:

			
Угол φ – это прямой угол (читают: φ – фи)	Угол α – это острый угол (читают: α – альфа)	Угол β – это тупой угол (читают: β – бэтта)	Угол γ – это развернутый угол (читают: γ – гамма)

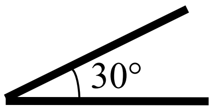
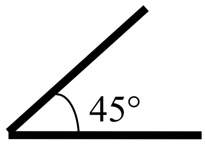
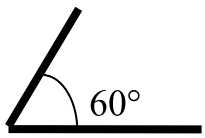
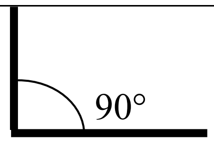
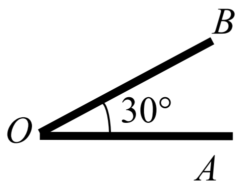
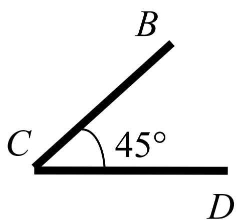
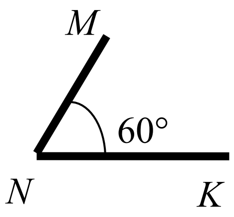
ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

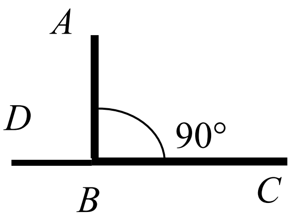
Угол наклона острый (угол меньше, чем 90°). Прямой угол (прямой угол равен 90°). Тупой угол (угол больше, чем 90°).

Если две прямые пересекаются, то при этом образуется четыре угла. Углы 1 и 2 (а также 2 и 3, 3 и 4, 4 и 1 и т.д.) – **смежные углы,** углы 1 и 3 (а также 2 и 4) **- вертикальные углы.** Вертикальные углы равны; сумма смежных углов равна 180°.



Примеры:

	угол 30° (*читают:* тридцать градусов) $30° = \frac{\pi}{6} = \frac{180°}{6}$ (*читают:* пи на 6 или $\frac{1}{6}$ пи)
	угол 45° (*читают:* сорок пять градусов) $45° = \frac{\pi}{4}$ (*читают:* пи на 4 или $\frac{1}{4}$ пи)
	угол 60° (*читают:* шестьдесят градусов) $60° = \frac{\pi}{3}$ (*читают:* пи на 3 или $\frac{1}{3}$ пи)
	угол 90° (*читают:* девяносто градусов) $90° = \frac{\pi}{2}$ (*читают:* пи на 2 или $\frac{1}{2}$ пи)
	Угол *AOB* равен 30°. *Читают:* Тридцать градусов равно “Пи”, деленное на 6. Тридцать градусов равно “Пи” на 6. Тридцать градусов равно одна шестая “Пи”
	Угол *BCD* равен 45°. *Читают:* Сорок пять градусов – это одна четвертая «Пи». Сорок пять градусов равно «Пи», деленное на четыре
	Угол *MNK* – это острый угол, он равен 60°. *Читают:* Шестьдесят градусов – это одна третья от «Пи». Шестьдесят градусов – это «Пи», деленное на три

	Угол *DBA* равен углу *ABC*. Это прямые углы. Угол *ABC* = углу *DBA*. Угол *ABC* равен 90°. *Читают:* Девяносто градусов – это «Пи», деленное на два. Девяносто градусов – это одна вторая от «Пи»

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Читаем, слушаем, повторяем:*

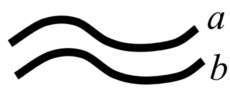
1. прямой угол прямая линия прямые линии пять прямых линий	2. кривая линия кривые линии две кривых линии пять кривых линий	3. угол наклона углы наклона угол наклона острый угол наклона тупой
4. вертикальная линия вертикальные параллельные прямые горизонтальная линия параллельные линии горизонтальные параллельные прямые	5. наклонная линия пересекающиеся линии точка пересечения перпендикулярные прямые	
6. угол наклона угол между линиями угол между вертикальной линией и горизонтальной линией угол между наклонной линией и вертикальной линией угол между наклонной линией и горизонтальной линией	7. угол 30° угол 55° угол 120° угол равен π угол наклона $\frac{\pi}{2}$ (пи пополам, пи на 2) угол наклона равен $\frac{\pi}{2}$ или 90°	
8. угол меньше, чем 90° прямой угол равен 90° угол больше, чем 90°	9. одна шестая одна вторая одна третья две третьих три четвертых	

10. угол альфа угол бэтта угол гамма угол фи	11. угол альфа равен 55° угол бэтта равен 120° угол гамма равен 64° угол фи равен 2°

<u>Упражнение 2.</u> *Ответьте на вопросы устно (по образцу).*

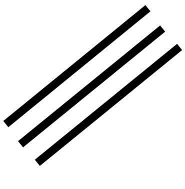
Образец:	*вопрос*	*ответ*
	Это прямая линия? Это кривая линия?	Да, это прямая линия. Нет, это прямая линия

Это прямая линия?
Это кривая линия?

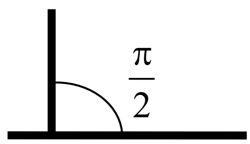


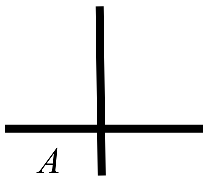
Что это?

Что это?
Это прямые линии?

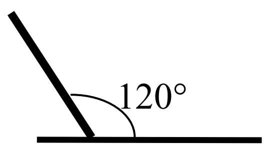


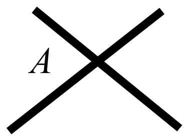
Что это?



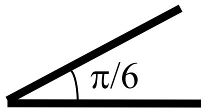


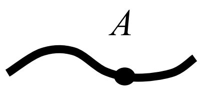
Что это?
Это параллельные линии?



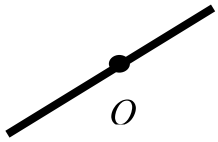


Что это?

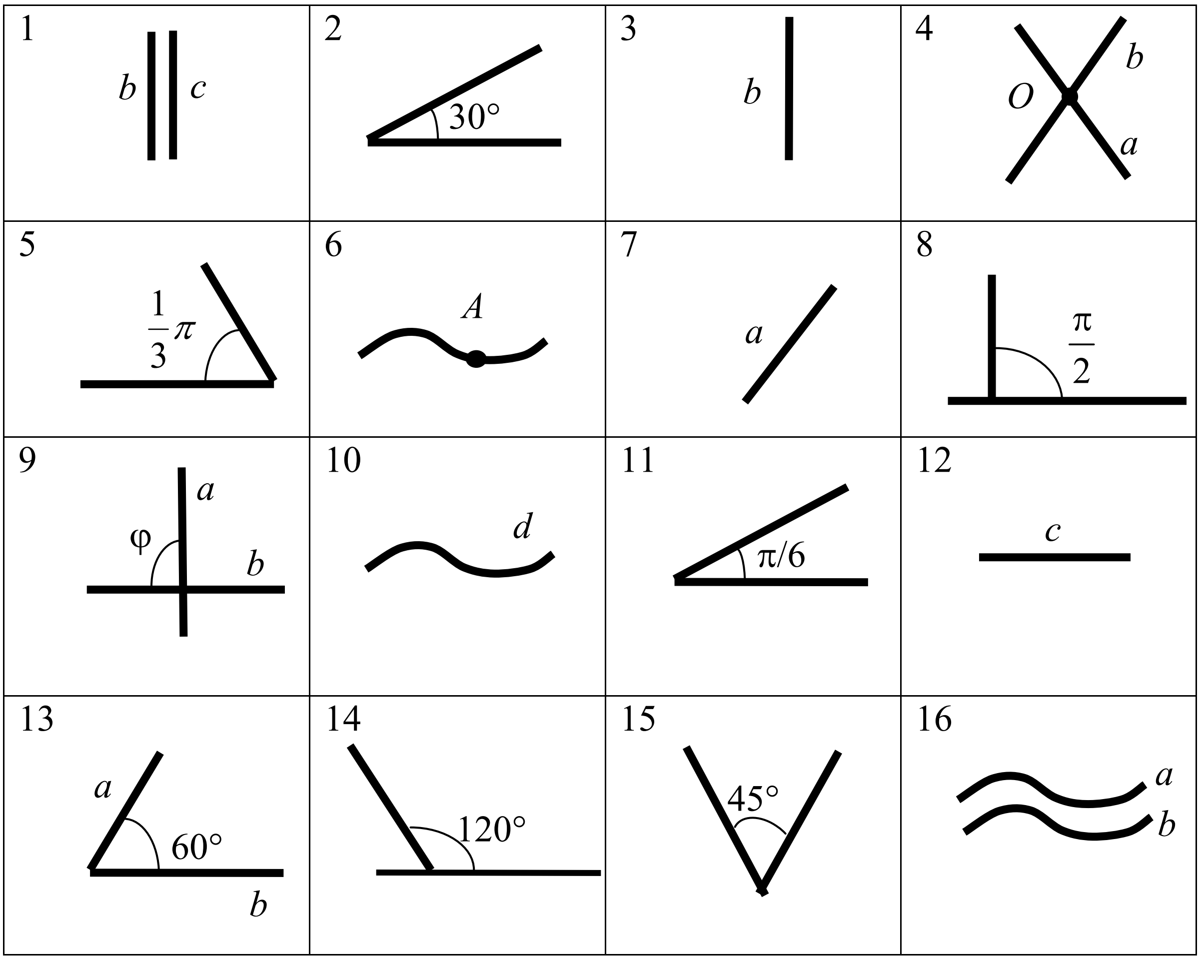




Что это?



Упражнение 3. *Рассмотрите внимательно рисунки.*



Ответьте на вопрос, в какой ячейке таблицы находятся:

Вопрос	Ответ
1) горизонтальная прямая линия	
2) вертикальная прямая	

Вопрос	Ответ
3) параллельные прямые	
4) кривая линия	
5) пересекающиеся прямые	
6) прямые линии, пересекающиеся под углом 30°	
7) прямые линии, пересекающиеся под углом 120°	
8) перпендикулярные прямые	
9) прямые линии, пересекающиеся под углом $\pi/4$	

1.2. **Плоскость и другие фигуры**

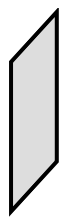
Новые слова и словосочетания

плоскость	на плоскости	наклон плоскости
треугольник	теорема	прямоугольный
круг	цилиндр	квадрат
параллелограмм	куб	параллелепипед
ось	сфера	шар
ромб	трапеция	окружность
центр	равноудаленный	

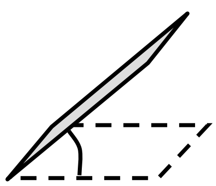
Плоскость – одно из основных понятий евклидовой геометрии, которое часто используется в физике. Основные свойства плоскости: двумерность и бесконечность.

Примеры:

горизонтальная плоскость

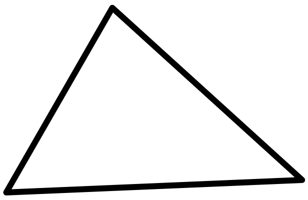
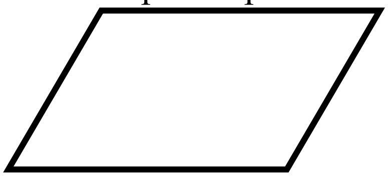
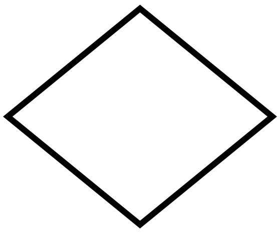
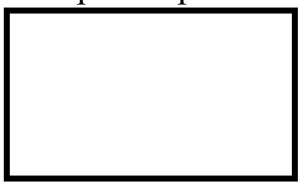


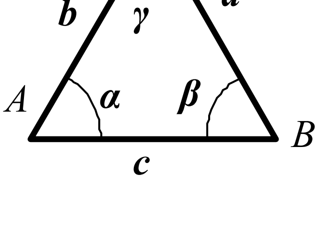
вертикальная плоскость



наклонная плоскость
угол наклона плоскости к горизонтальной плоскости
угол наклона к горизонту

<u>Геометрическая фигура (плоская геометрическая фигура)</u> полностью принадлежит некоторой плоскости – ограниченная часть плоскости. К геометрическим фигурам относятся: многоугольники (треугольник, прямоугольник, параллелограмм, ромб, трапеция, квадрат), круг и др.

Треугольник – многоугольник, имеющий три угла. 	**Параллелограмм –** четырёхугольник, противоположные стороны которого попарно параллельны. 
Ромб – параллелограмм, все стороны которого равны. 	**Прямоугольник –** параллелограмм, все углы которого прямые. 
Квадрат – прямоугольник, все стороны которого равны. 	**Трапеция** – четырёхугольник, две стороны (основания) которого параллельны, а две другие не параллельны. 

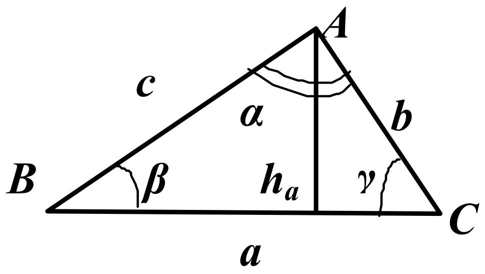


<u>Треугольник</u> – плоская фигура, ограниченная отрезками трех пересекающихся прямых, имеющая три угла. Сумма углов треугольника равна 180^0 (или π радиан): $\alpha + \beta + \gamma = 180°$.

Равнобедренный треугольник – это треугольник, две стороны которого равны. Равные стороны – *боковые,* третья сторона – *основание.*

Углы при основании равнобедренного треугольника равны. **Равносторонний (или правильный) треугольник -** треугольник, у которого все стороны равны и все углы равны 60^0.

Прямоугольным называется треугольник, один из углов которого прямой. Стороны, образующие прямой угол называются *катетами* треугольника, а сторона, лежащая напротив прямого угла – *гипотенузой.* Для прямоугольного треугольника справедлива **теорема Пифагора:** квадрат гипотенузы равен сумме квадратов катетов: $c^2 = a^2 + b^2$. Для любого треугольника справедливы соотношения:



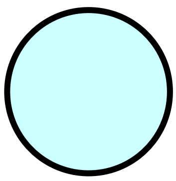
теорема косинусов

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab\cdot\cos\gamma\,;$$

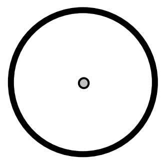
теорема синусов $\dfrac{a}{\sin\alpha} = \dfrac{b}{\sin\beta} = \dfrac{c}{\sin\gamma}$.

Окружность – геометрическое место точек, равноудалённых от одной точки, которая называется ***центром окружности.***

Часть плоскости, ограниченной окружностью называется **кругом.**

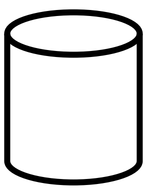


круг

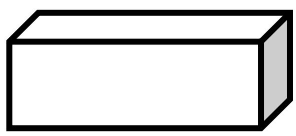


окружность

Геометрическое тело (объемная геометрическая фигура) – ограниченная часть пространства. К геометрическим телам относятся: многогранники (призму, куб, параллелепипед), цилиндр, шар и др.

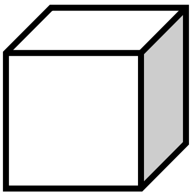


цилиндр

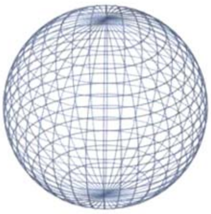


параллелепипед

Параллелепипед – призма, у которой основания параллелограммы, а противоположные грани – равные параллелограммы.



Куб – прямоугольный параллелепипед, все двенадцать рёбер которого равны. Все шесть граней куба – равные квадраты.

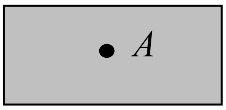


Сфера – геометрическое место точек, равноудалённых в пространстве от фиксированной точки (центра сферы).

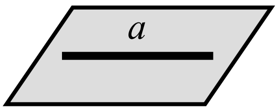
Шар – тело, ограниченное сферой.

<u>**Расположение тел в пространстве.**</u> Геометрические понятия используются для описания расположения тел в пространстве.

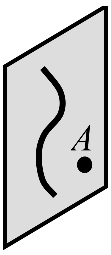
Например:



точка *A* на плоскости

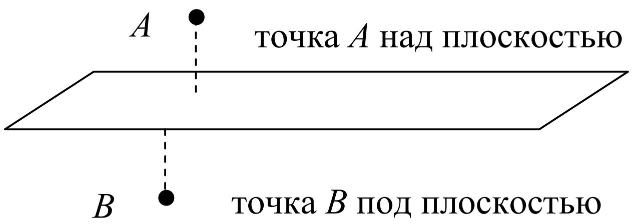


прямая линия на плоскости
прямая линия на горизонтальной плоскости



кривая линия на вертикальной плоскости

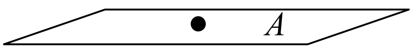
точка *A* на вертикальной плоскости

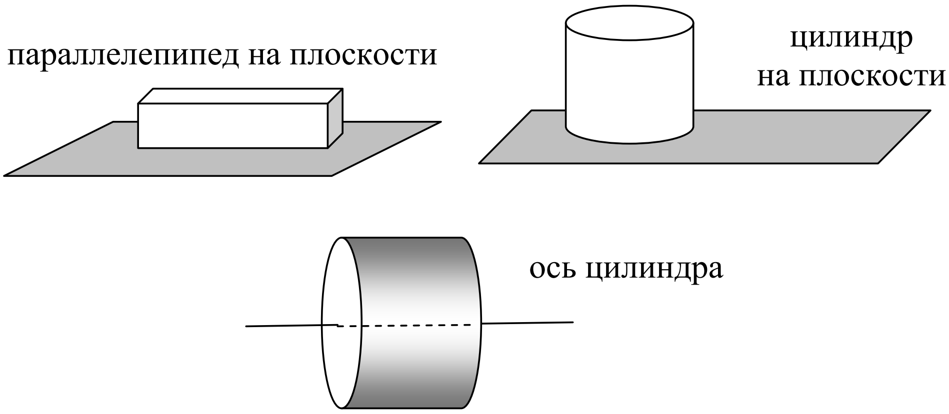


точка *A* над плоскостью

точка *B* под плоскостью

точка *A* на плоскости





УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Читаем, слушаем, повторяем*:

1. плоскость горизонтальная плоскость вертикальная плоскость наклонная плоскость	2. угол наклона плоскости к горизонтальной плоскости угол наклона плоскости к горизонту перпендикулярные плоскости
3. прямая линия на плоскости точка на плоскости цилиндр на плоскости кривая линия на плоскости	4. параллелепипед квадрат круг куб кубик
5. угол наклона плоскости к горизонту острый угол наклона плоскости равен 30°	6. треугольник прямоугольный треугольник равносторонний треугольник
7. параллелепипед на горизонтальной плоскости точка *A* на горизонтальной плоскости	8. Цилиндр на плоскости цилиндр находится на горизонтальной плоскости точка *A* над плоскостью точка *B* под плоскостью

ТЕМА 2. **<u>ФИЗИКА – НАУКА О ЯВЛЕНИЯХ ПРИРОДЫ</u>**

2.1. **<u>Экспериментальные методы изучения природы</u>**

Новые слова и словосочетания

физика	материя
физический	материальный
явление	агрегатное состояние
явление природы	электрический
положение	магнитный
состояние	гравитационный
изменять (изменение)	электромагнитный
эксперимент (опыт)	жидкий
существовать (находиться)	твердый
реальный(но)	газообразный
характеристика	плазма
наблюдать (наблюдение)	термин(ы)
источник	открыть (открытие)
собирать, собрать (сбор)	причина
напряженность	потенциал

Все, что реально существует в мире, на Земле, вне Земли называют **<u>материей</u>**. Материя существует в виде вещества и <u>поля</u>. Любые <u>изменения</u> материи называют <u>явлениями природы</u>. “Физика” – по-гречески значит природа. Физика – наука о физических явлениях природы, свойствах вещества и поля. Она <u>изучает физические свойства вещества и поля и их изменения</u>.

Все окружающие нас тела состоят из вещества. Вещество состоит из атомов и молекул.

Поля (электрическое, магнитное, гравитационное, электромагнитное) реально существуют и могут быть обнаружены экспериментально (на опыте).

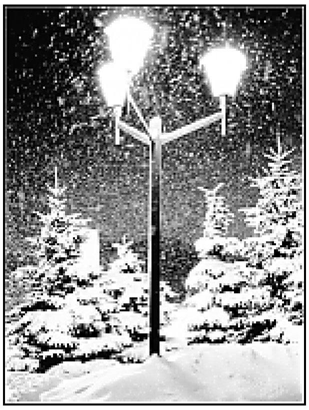
Вещество и поле имеют <u>физические свойства</u>.

<u>Физические свойства вещества и поля характеризуют</u> их физическое <u>состояние</u>. Физические свойства – это характеристики состояния

вещества и поля. Характеристики поля: напряженность, потенциал, энергия и т.д.

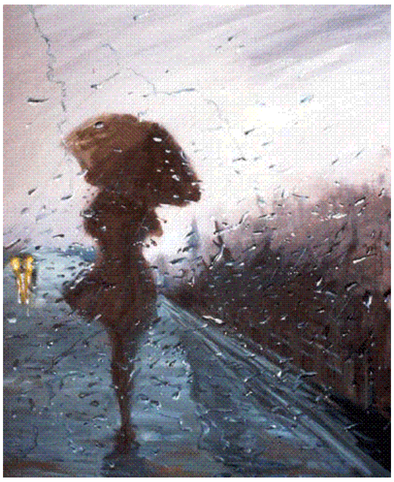
Физика – экспериментальная наука. Физические свойства можно определить экспериментально (на опыте).

В физике используют специальные слова (термины), обозначающие физические понятия, свойства.



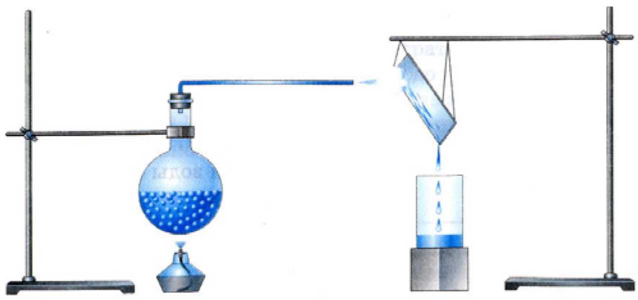
Наблюдение – метод сбора (собирать, собрать) первичной информации об явлениях природы.

Пример: идет снег. Первичная информация: если на улице зима, то идет снег.



Пример: идёт дождь. Первичная информация: если на улице лето, то идёт дождь.

Эксперимент – изучение явления на опыте (экспериментально). Опыт отличается от наблюдения тем, что опыт проводится в специальных условиях, по определенному плану.



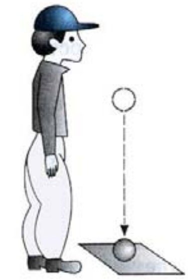
Физика – экспериментальная наука. Физические свойства можно определить экспериментально (на опыте).

Для выполнения опытов (экспериментов) необходимы **физические приборы**, инструменты.

Наблюдение и эксперимент – источники физических знаний.

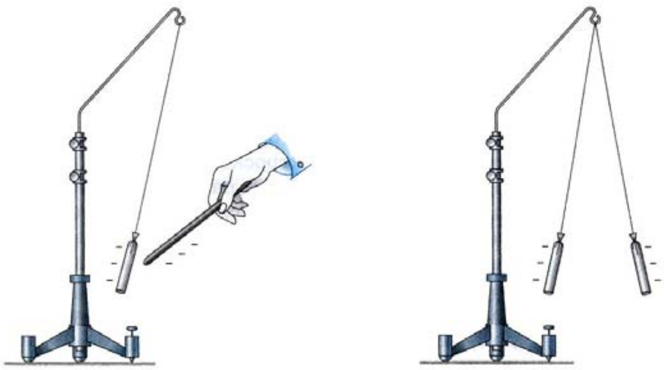
Главная **<u>задача физики</u> – <u>открыть</u> <u>законы</u>,** которые связывают между собой различные явления природы, **<u>найти связь и причины явлений</u>.**

наблюдение:
капля воды падает вниз

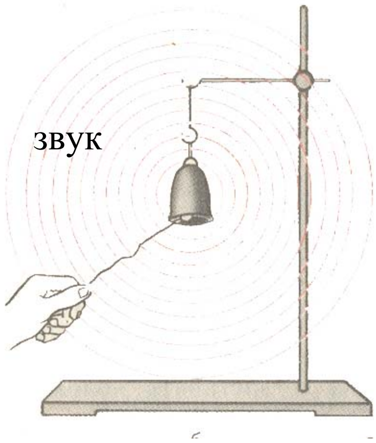


эксперимент:
тело падает вниз

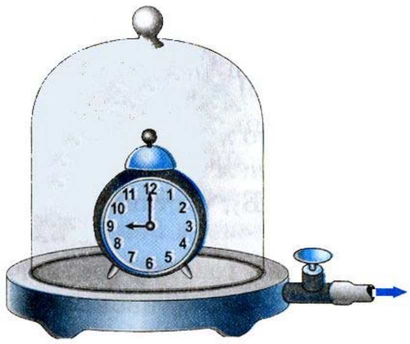
наблюдение:
притягивание мелких предметов



эксперимент:
взаимодействие заряженных тел



наблюдение:
распространение звука



эксперимент:
распространение звука в воздухе

2.2. Свойства вещества

Новые слова и словосочетания

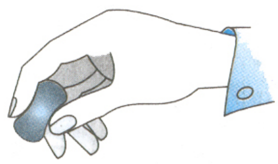
агрегатное состояние	теплопроводность
электропроводность	упругость
пластичность	хрупкость
текучесть	

Все окружающие нас тела состоят из вещества. Например, дерево, бумага, стекло, вода – это вещества. Воздух, азот, кислород – это тоже вещества. Каждое вещество имеет различные свойства.

Физические свойства вещества: агрегатное состояние; упругость; пластичность; хрупкость; текучесть; форма; цвет; запах; теплопроводность; электропроводность и т.д.

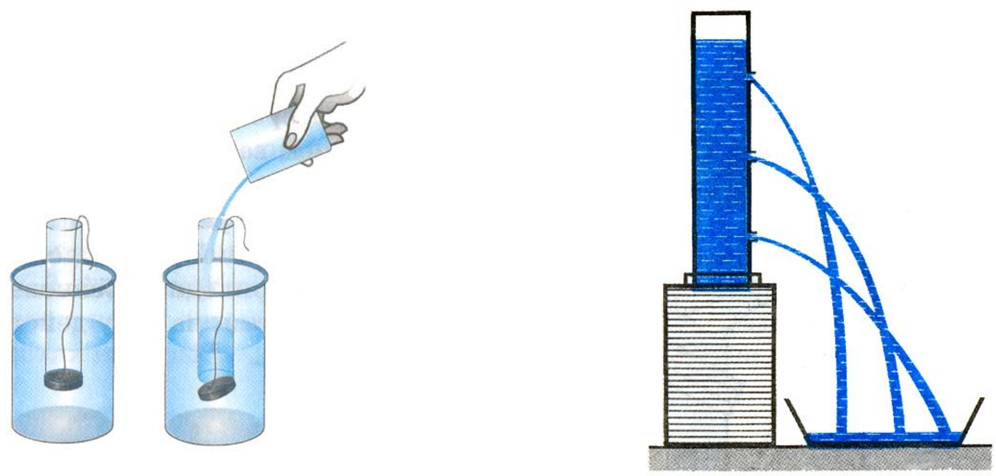
В природе все вещества существуют в четырех агрегатных состояниях: твердом, жидком, газообразном и в виде плазмы.

упругость



пластичность

Основные свойства твердых тел – сохранение формы и объема, упругость, пластичность, хрупкость. Все металлы имеют металлический блеск.

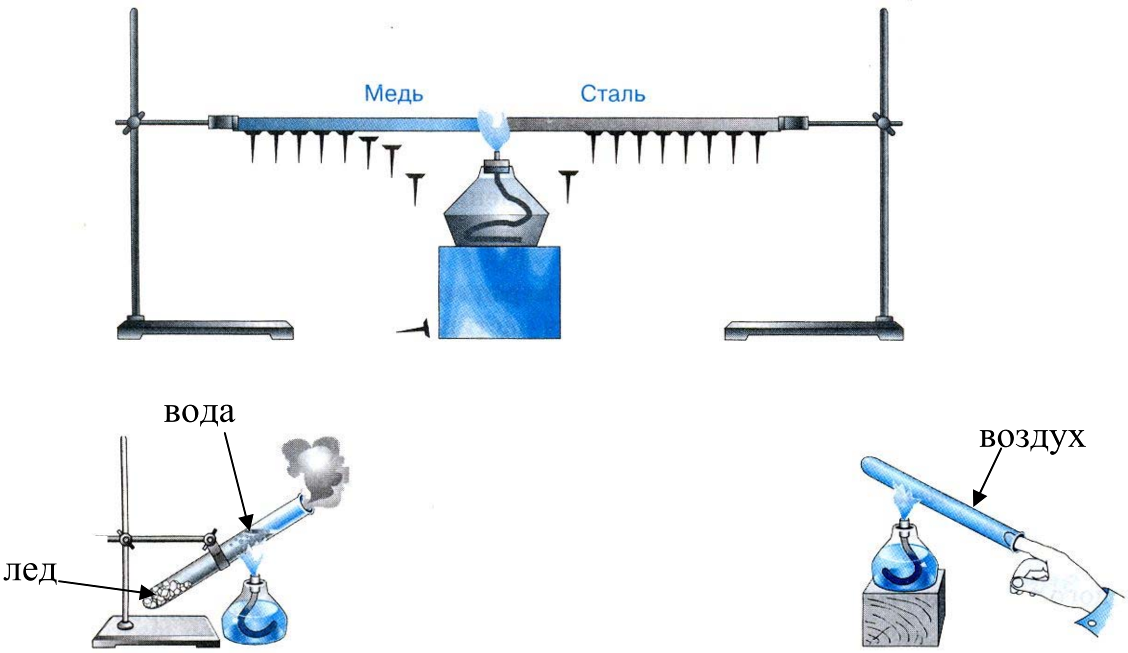


текучесть жидкости

Основное свойство жидкостей и газов – <u>текучесть</u>.

Жидкости сохраняют объем, но легко меняют форму.

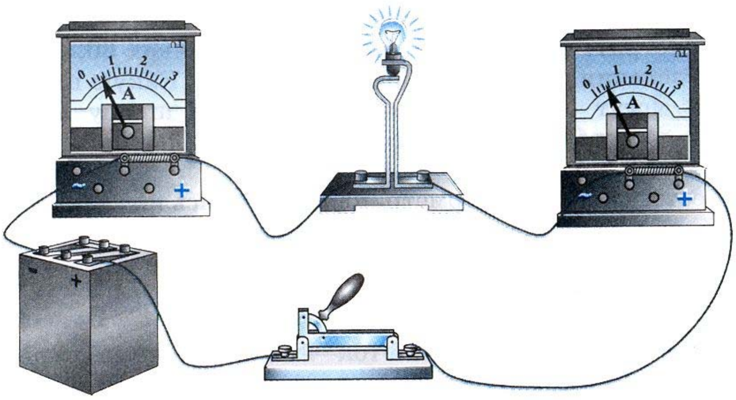
Газы не имеют постоянного объема и собственной формы. Они заполняют полностью весь сосуд (емкость). Многие газы прозрачны, не имеют цвета.



теплопроводность различных веществ

<u>Теплопроводность</u> – это свойство проводить (передавать) тепло. Этим свойством могут обладать (могут иметь) твердые, жидкие и газообразные вещества.

<u>Электропроводность</u> – свойство проводить электрический ток. Этим свойством обладают все вещества.



электропроводность

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Ответьте на вопросы:*

1. Из чего состоят все тела?
2. Какие свойства веществ Вы знаете?
3. В каких агрегатных состояниях может находиться вещество в природе?
4. Какое свойство является главным для жидкостей?
5. Какие тела обладают свойствами пластичности, упругости, хрупкости?
6. Какие вещества обладают свойствами теплопроводности и электропроводности?

Упражнение 2. *Работа с текстом.*

ТЕКСТ

Окружающие нас тела состоят из различных веществ. Существуют тела, которые содержат только одно вещество. Другие тела состоят из нескольких различных веществ. Мельчайшие частицы вещества, имеющие все химические признаки этого вещества, называют молекулами. Все молекулы данного вещества одинаковы. Молекулы разных веществ отличаются друг от друга по своему составу и строению.

Каждое вещество обладает определёнными свойствами, отличающими его от других веществ. Эти свойства можно разделить на три большие группы.

Свойства первой группы определяются строением и составом молекул вещества. Эти свойства определяют способность вещества вступать в различные химические реакции. Проявлением этих свойств является запах и вкус вещества. Свойства вещества первой группы изучает химия.

Свойства второй группы определяются в основном характером движения молекул вещества друг относительно друга и тем, как эти молекулы взаимодействуют между собой. Ко второй группе относятся такие свойства вещества, как агрегатное состояние, сжимаемость, текучесть, способность нагреваться, охлаждаться.

Третья группа свойств определяется как строением молекул вещества, особенностями их движения и взаимодействия, так и строением атомов. К этой группе относятся такие свойства вещества, как электропроводность, взаимодействие со светом, радиоактивность и другие.

Прочитайте текст. Ответьте на вопросы.

1. Что такое молекула вещества?

2. Какие свойства вещества изучает физика?
3. Что можно сказать о теплопроводности различных веществ?

Упражнение 3. *Закончите предложения…*

1. Дерево, бумага, стекло – это …
2. Воздух, кислород, водород – это …
3. Текучесть – это основное свойство …
4. Электропроводность – это свойство вещества …

Упражнение 4. *Составьте предложения. Ответьте на вопросы по образцу:*

Пример: Бумага – это твердое вещество? Да, бумага – это твердое вещество.

Металл – это твердое вещество?
Металл, бумага, дерево, стекло – это твердые вещества?
Вода, спирт, бензин – это жидкости?
Воздух, азот, кислород – это газообразные вещества?
В каких агрегатных состояниях может находиться вещество?

Упражнение 5. *Прочитайте текст.*

ТЕКСТ

Воздух, вода, земля, люди, растения, животные, планеты, Солнце, звезды – весь окружающий нас мир, называется природой. Все, что реально существует в мире объективно, то есть независимо от нас, называют материей. Материя существует в виде вещества и в виде поля. Материя вечно и непрерывно изменяется (движется). Изучая изменение материи, ученые установили, что все изменения материи происходят закономерно. Существует причина, по которой происходят изменения материи. Цель науки физики – открыть, изучить законы изменения материи и использовать эти законы в науке и технике.

Физика – одна из древнейших наук. «Физика» – по-гречески значит природа. Древние ученые пытались объяснить наблюдаемые явления природы. Аристотель (384–322 г.г. до н.э.) ввел в науку слово «физика». Первый учебник по физике в России издал М.В. Ломоносов (XVIII в.).

Приготовьтесь к устному ответу на вопросы:

1. Что такое материя?
2. Какие изменения происходят с материей?
3. Какова цель науки физики?
4. Кто ввел в науку слово «физика»?
5. Кто автор первого учебника по физике в России?

<u>Упражнение 6.</u> *Рассмотрите внимательно схему.*

вещество

↓

металл, пластмасса, бумага, дерево, стекло, бензин, вода, спирт, воздух, кислород, водород, азот, углекислый газ, молоко, железо, алюминий

↓ состояние вещества

жидкое, твердое, газообразное, плазма

↓ свойства вещества

пластичность, хрупкость, текучесть, теплопроводность, электропроводность, упругость

Составьте таблицу, ответив на вопросы:

1. Какие из приведенных в схеме веществ находятся в жидком, твердом, газообразном состоянии?
2. Какими свойствами обладают тела в жидком, твердом и газообразном состоянии?

	твердое	жидкое	газообразное
вещество			
физические свойства вещества			

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. Все, что реально существует в мире, на Земле, вне Земли называют **материей**.
2. **Физика** – наука о физических явлениях природы, свойствах вещества и поля.
3. Физические свойства вещества и поля характеризуют их **физическое состояние.**
4. **Наблюдение** – метод сбора (собирать, собрать) первичной информации о явлениях природы.
5. **Эксперимент** – изучение явления на опыте (экспериментально).
6. Для выполнения опытов (экспериментов) необходимы **физические приборы**, инструменты.
7. Главная **задача физики – открыть законы,** которые связывают между собой различные явления природы, **найти связь и причины явлений.**
8. **Физические свойства вещества:** агрегатное состояние, упругость, пластичность, хрупкость, текучесть, форма, цвет, запах, теплопроводность, электропроводность и т.д.

ТЕМА 3. **ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ**

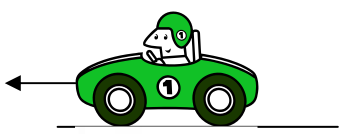
Новые слова и словосочетания

явление	плавление
явление природы	охлаждение
физическое явление	нагревание
физический процесс	кипение
изменение положения тела	отвердевание
тепловое явление	световое явление
звуковое явление	переход из (чего) во что
парообразование	конденсация
превращение	пространство

Любые изменения материи – это явления природы. Физика изучает физические явления. **Физические явления** – это закономерные изменения состояния и физических свойств вещества и поля, которые происходят в пространстве и во времени. Физика изучает механические, тепловые, световые, звуковые, электрические и магнитные явления. **Закономерные изменения физических свойств (состояния) вещества и поля, происходящие в пространстве и во времени, записанные в виде математических формул – это физические законы.**

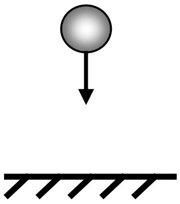
Изменения физических **свойств вещества** – изменение агрегатного состояния, изменение положения тел, изменение формы, изменение объема, изменение температуры и т.д. – это физические явления. Возникновение, исчезновение, преобразование полей – это физические явления.

1. Изменение положения тела в пространстве и во времени – это **механическое явление**.



машина едет, машина изменяет положение во времени
машина движется (двигается) – это механическое явление.
машина изменяет свое положение в пространстве

Человек идет. Человек движется или изменяет свое положение в пространстве и во времени – это механическое явление.



Шарик падает. Шарик изменяет положение – это механическое явление.

2. Вещество может существовать в четырех агрегатных состояниях: жидком, твердом, газообразном и в состоянии плазмы. Изменение агрегатного состояния – это физическое явление. Превращение жидкости в пар (газ) или в твердое тело, пара (газа) в жидкость или твердое тело – это **физическое явление изменение агрегатного состояния.**

Пример.

Рассмотрим физическое явление: **изменение агрегатного состояния воды**.

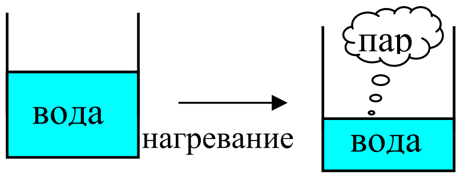
жидкое состояние вода → **твердое состояние** лед

превращение воды в лед

твердое состояние лед → **жидкое состояние** вода

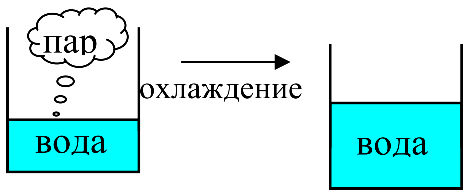
превращение льда в воду

жидкое состояние вода → **газообразное состояние** пар



превращение воды в пар

газообразное состояние пар → **жидкое состояние** вода



превращение пара в воду

3. **Тепловые явления**.

горячее тело $\xrightarrow{\text{передача тепла}}$ холодное тело

остывает — нагревается

Явление изменения температуры – это физическое **тепловое явление**. Тепловое явление – это явление передачи тепла от одного тела к другому (теплопередача, теплопроводность).

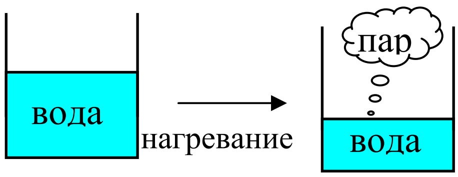
Переход вещества из одного состояния в другое – это **физический процесс**.

Увеличение температуры – это физический процесс **нагревание**. Уменьшение температуры – это физический процесс **охлаждение**. Изменение физических свойств поля (напряженности, потенциала, энергии и т. д.) – это физический процесс.

Физическое явление объединяет несколько (много) физических процессов. Пример:

жидкое состояние вода $\xrightarrow{\text{превращение}}$ **газообразное состояние** пар

физический процесс



Какие физические процессы происходят при этом физическом явлении?

Это физический процесс нагревания, физический процесс кипения (парообразования).

При физическом явлении новое вещество не образуется (не получается). (Если при изменении состояния образуется новое вещество – это химическое явление (химическая реакция)).

Пример:

Тепловое явление и световое явление. При горении выделяется тепло и свет.

Химическая реакция горения в физике не изучается.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

превращение	во что?
превращаться	во что?
становиться	чем?
движение	где?
	по чему?
двигаться	как?

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Слушаем, читаем, повторяем:*

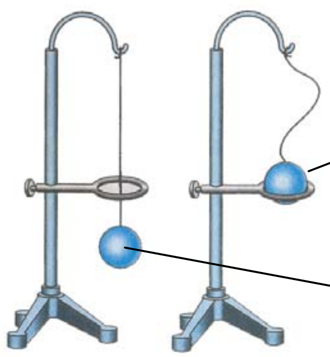
физические явления — физические процессы
изменение агрегатного состояния
плавление — охлаждение — нагревание
кипение — отвердевание

Физические явления – это изменение состояния вещества → превращение, переход из одного состояния в другое (изменяется объем, цвет, форма).

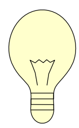
Движение тел – физическое явление.
Тело движется. Земля движется в пространстве.
Машина движется по дороге.
Тело движется, тело не движется.
Движение { по плоскости, по прямой, в пространстве. } механическое явление

Упражнение 2. *Рассмотрите внимательно рисунки. Какие физические явления приведены на них? Назовите физические процессы, изображенные на рисунках?*

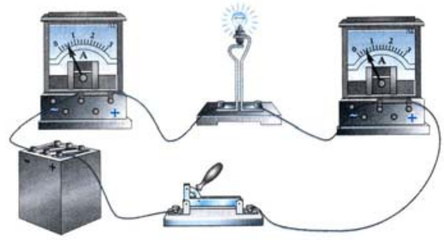
тепловое физическое явление



при нагревании тела расширяются

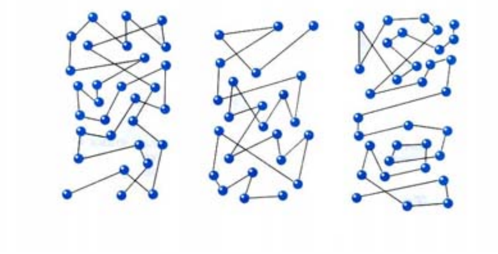
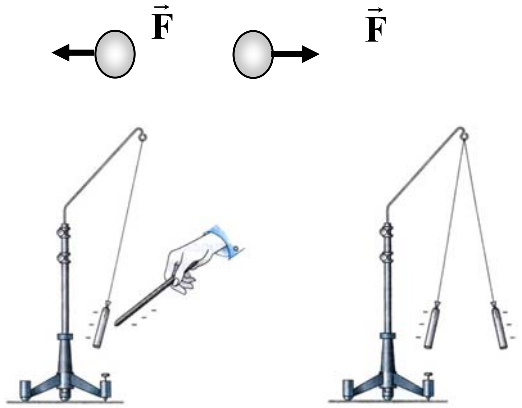


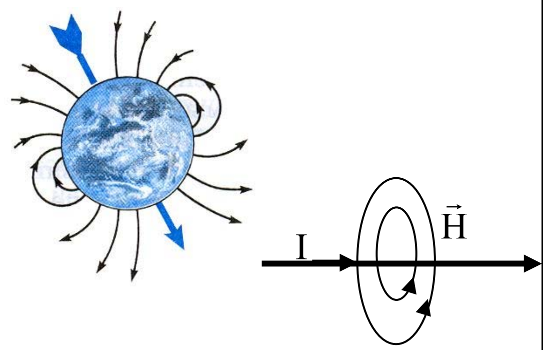
световое явление
лампочка горит (светит)

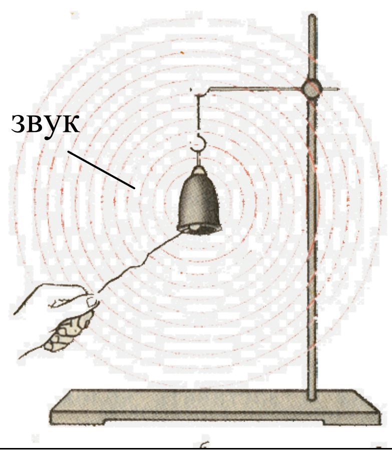
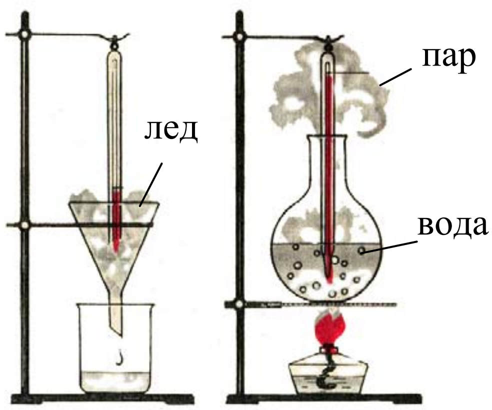


свет распространяется

<table>
<tr>
<td><u>механическое явление</u>

самолет летит</td>
<td><u>движение молекул – механическое явление</u>

молекулы движутся хаотично</td>
</tr>
<tr>
<td><u>электрическое явление</u>
взаимодействие зарядов


Вокруг заряда возникает электрическое поле</td>
<td><u>магнитное явление</u>
Это Земля. Вокруг Земли существует магнитное поле.


По проводнику течет ток I. Вокруг проводника возникает магнитное поле.</td>
</tr>
<tr>
<td><u>Звуковое явление</u>
звук движется
распространяется
звонок звенит

</td>
<td><u>Тепловое явление</u>


лед тает (таяние льда)
вода кипит (кипение воды)</td>
</tr>
</table>

Упражнение 3. *Ответьте на вопросы устно (по образцу).*

Пример. Вопрос: *Что такое физическое явление?*
Ответ: Физическое явление – это изменение состояния и свойств вещества и поля.

1. *Какие свойства вещества могут меняться?*
2. *Какие физические явления Вы знаете?*
3. *Что такое физический процесс?*
4. *Какие физические процессы Вы знаете?*

Упражнение 4. *Прочитайте текст. Ответьте на вопросы.*

ТЕКСТ

Любое изменение в природе – это явление. Движение Земли, движение человека, плавление металла, кипение воды, горение бумаги, растворение сахара в воде – это явления. Явления бывают физические и химические. Если изменяется форма, объем, положение тела, состояние вещества, то это физическое явление. Например, зимой вода отвердевает и превращается в лед. Весной снег и лед плавятся и превращаются в воду. Вода кипит и превращается в пар. Пар охлаждается и превращается в воду.

Земля и другие планеты движутся вокруг Солнца. Солнце и все небесные тела движутся в космическом пространстве. Все эти изменения называются физическими явлениями.

Если возникают или изменяется поле – это тоже физическое явление.

Физика – это наука о физических явлениях природы. Физика изучает механические, тепловые, световые, звуковые, электрические и магнитные явления.

Физическая среда – это материальная область, в которой происходят физические явления. Тело движется в воздухе. В этом случае воздух – это физическая среда. Звук распространяется в воде. Вода – это физическая среда.

Физическая среда влияет на процессы, которые происходят с физическими телами.

Вопросы.

1. Назовите физические явления, о которых говорится в тексте.
2. Какие явления называются физическими?
3. Приведите примеры тепловых явлений.
4. Кипение – это какой процесс?
5. Что такое физическая среда?

<u>Упражнение 5.</u> *Читаем, слушаем, повторяем.*

Явление
Явление природы
Звуковое явление
Физическое явление
Световое явление
Электрическое явление
Магнитное явление
Отвердевать, отвердеть
Вода отвердевает – это физический процесс
Плавиться, расплавиться
Лед плавится – это физический процесс
Превращаться, превратится (во что?)
Превращаться в пар – это физический процесс
Превращаться в воду – это физический процесс
Превращаться в лед – это физический процесс
Охлаждаться, охладиться.
Пар охлаждается – это физический процесс
Космос, космический
Планета движется в космосе.
Планеты движутся в космическом пространстве.
Движение тел.
Движение тел – это физическое явление
Тело движется, изменяет положение во времени – это физическое явление

<u>Упражнение 6.</u> *Определите, от каких существительных образованы данные прилагательные*:
физический, космический, тепловой, звуковой, световой, электрический, магнитный.

<u>Упражнение 7.</u> *Подберите существительные к прилагательным*:
а) физический, электрический, космический
б) тепловой, теплый, световой, светлый.

<u>Упражнение 8.</u> *Подберите прилагательные к существительному*:
явление, процесс.

<u>Упражнение 9.</u> *Поставьте вместо точек данные под чертой глаголы*:

1. Вода... и превращается в пар.
2. Лед ... и превращается в воду.

3. Вода... и превращается в лед.
4. Пар ... и превращается в воду.

Отвердевать, кипеть, плавиться, охлаждаться

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. **Физические явления** – это закономерные изменения состояния и физических свойств вещества и поля, которые происходят в пространстве и во времени.
2. **Изменения** физических **свойств вещества** – изменение агрегатного состояния, изменение положения тел, изменение формы, изменение объема, изменение температуры и т.д. – это **физические явления.**
3. **Изменения** физических **свойств полей** – возникновение, исчезновение, преобразование полей – это **физические явления.**
4. Физика изучает механические, тепловые, световые, звуковые, электрические и магнитные явления.
5. Переход вещества из одного состояния в другое – это **физический процесс**.

ТЕМА 4. **ФИЗИЧЕСКИЕ ТЕЛА**

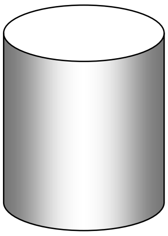
Новые слова и словосочетания

мяч	находиться
машина	двигаться (как?)
человек	по плоскости
тележка	Солнце
лампочка	Земля, спутник Земли
лодка	Луна
точка, материальная точка	самолет

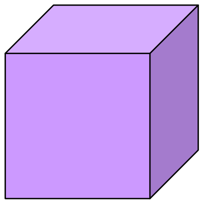
Физическое тело (тело) – это материальный объект, имеющий постоянную массу, объем и чаще всего простую форму.

Примеры тел простой геометрической формы:


шар (шарик)


цилиндр


параллелепипед


куб (кубик)

Физическое тело может иметь сложную форму и состоять из нескольких тел простой формы.

Примеры тел сложной геометрической формы:


мяч


снеговик

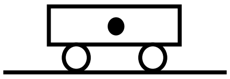
автомобиль (машина)


часы

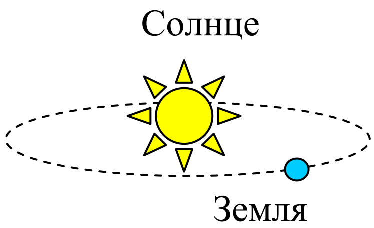

человек

Если размеры физического тела малы по сравнению с расстоянием до других тел, то размеры этого тела можно не учитывать (размерами тела можно пренебречь). Тело, размерами которого можно пренебречь в данных условиях, называется **<u>материальной точкой</u>**.

Материальная точка – это физическое тело. Она имеет массу.



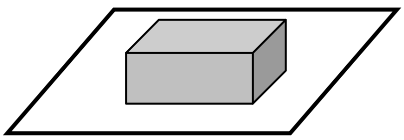
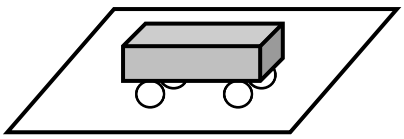
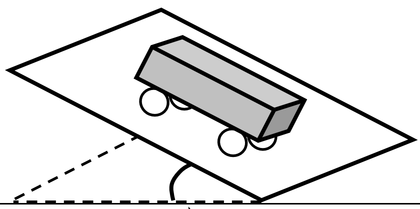
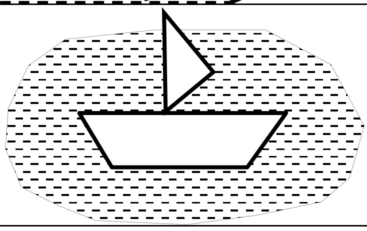
Тележка – это **физическое тело**. Если не рассматривать устройство тележки, её можно принять за материальную точку.

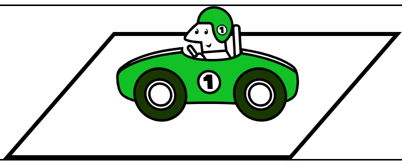
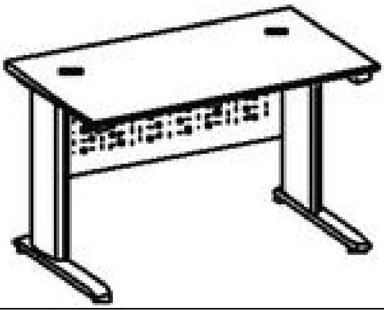
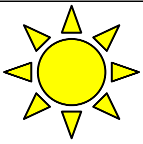
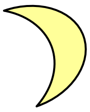
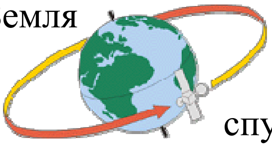


Земля движется вокруг Солнца. Размеры Земли много меньше расстояния от Земли до Солнца. Земля – материальная точка

Чтобы определить положение физического тела в пространстве необходимо указать, где оно находится.

Например, говорят…

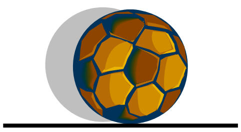
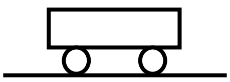
	Это тело. Это физическое тело. Тело находится на плоскости. Тело находится на горизонтальной плоскости
	Это тележка. Тележка – физическое тело. Тележка находится на плоскости. Тележка находится на горизонтальной плоскости.
	Это тележка. Тележка – физическое тело. Тележка находится на плоскости. Тележка находится на наклонной плоскости.
	Это лодка в море. Это физическое тело.

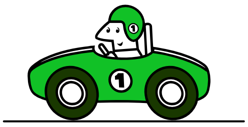
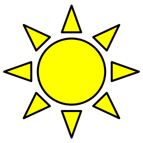
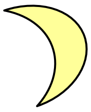
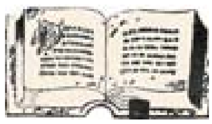
	Машина – физическое тело. Машина находится на горизонтальной плоскости
	Стол – физическое тело. Стол находится в комнате.
 Солнце  Луна Земля  спутник Земли	Это физические тела. Они находятся в космическом пространстве. Они находятся в космосе.

Чтобы определить, где находится тело, необходимо использовать предлоги: *НА, В.*

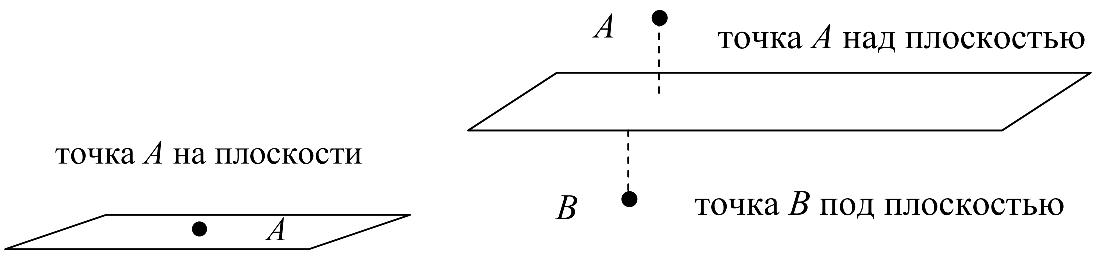
ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

где?	**на** плоскости	где?	**в** пространстве
на какой?	горизонтальной вертикальной наклонной	в каком?	космическом

 **мяч на поле** – это физическое тело	 **тележка на столе** – это физическое тело

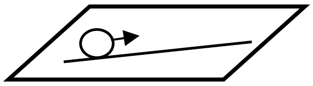
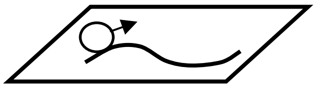
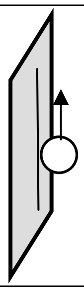
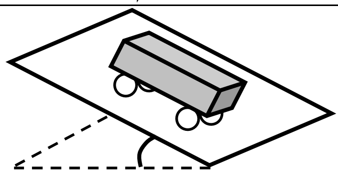
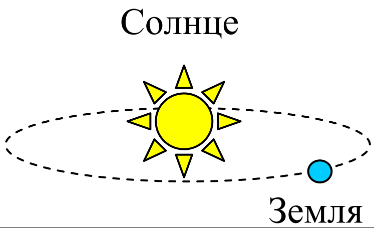
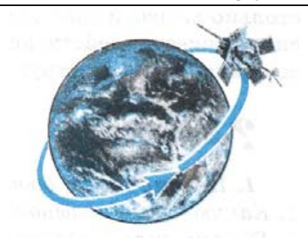
	**машина на дороге** – это физическое тело	•	**материальная точка на плоскости**
	**человек на Земле –** это физическое тело		**часы на столе –** это физическое тело
	**Солнце в космосе**		**самолет в воздухе** – это физическое тело
	Луна в космосе		
	**спутник Земли в космосе**		**это книга на столе** – это физическое тело

Чтобы определить положение одного тела относительно другого, необходимо использовать **слова: слева*, справа, выше, ниже, вверху, внизу* и предлоги: *над, под.***



Изменение положения тела в пространстве и во времени – это движение. Тело может двигаться по плоскости, прямой линии, по кривой линии, по окружности, по эллипсу.

	движение по прямой линии

	движение по горизонтальной плоскости
	движение по плоскости; движение по кривой линии
	движение по вертикальной плоскости
	движение по наклонной плоскости
	Земля движется вокруг Солнца. Земля движется в космическом пространстве по эллипсу
	спутник движется вокруг Земли по окружности
	Планеты Солнечной системы движутся вокруг Солнца по эллипсам

УПРАЖНЕНИЯ

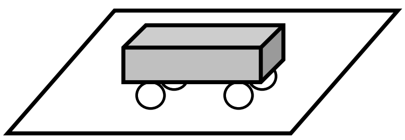
Упражнение 1. *Читаем, слушаем, повторяем*:

<table>
<tr><td>1) прямой угол
прямая линия
прямые линии</td><td>2) кривая линия
кривые линии</td><td>3) угол наклона
углы наклона</td></tr>
<tr><td colspan="2">4) горизонтальная плоскость
вертикальная плоскость
наклонная плоскость</td><td>5) горизонтальные плоскости
вертикальные плоскости
наклонные плоскости</td></tr>
<tr><td colspan="2">6) на горизонтальной плоскости
на вертикальной плоскости
на наклонной плоскости</td><td>7) космический
космическое пространство
в космическом пространстве</td></tr>
<tr><td colspan="3">8) тело находится на горизонтальной плоскости
тележка находится на наклонной плоскости
Земля находится в космическом пространстве</td></tr>
<tr><td colspan="2">9) Тело движется, тело не движется</td><td>10) Движение по плоскости
по прямой
в пространстве.</td></tr>
</table>

Упражнение 2. *Ответьте на вопросы по образцу.*

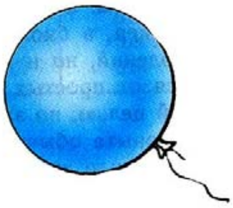
Образец:	вопрос?	ответ
	Это прямая линия?	Да, это прямая линия.

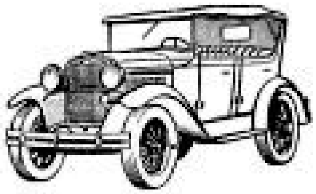
Это прямая линия?

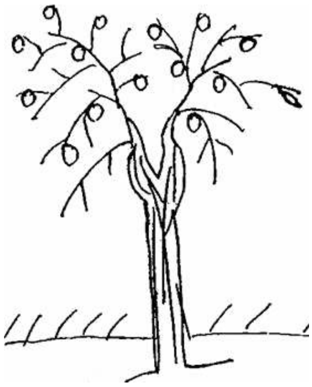


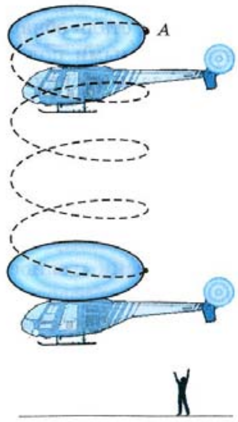
Что это?
Как называется это физическое тело?
Какая это плоскость?
Где находится физическое тело?
На какой плоскости находится тележка?

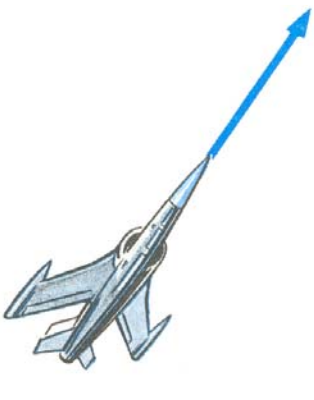
<u>Упражнение 3.</u> *Сделайте надписи к рисункам. Какие это физические тела?*

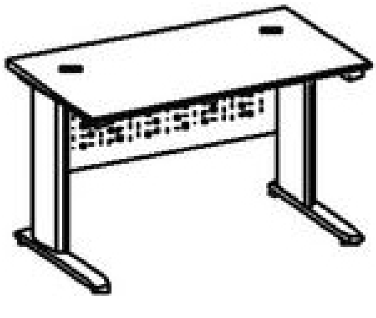


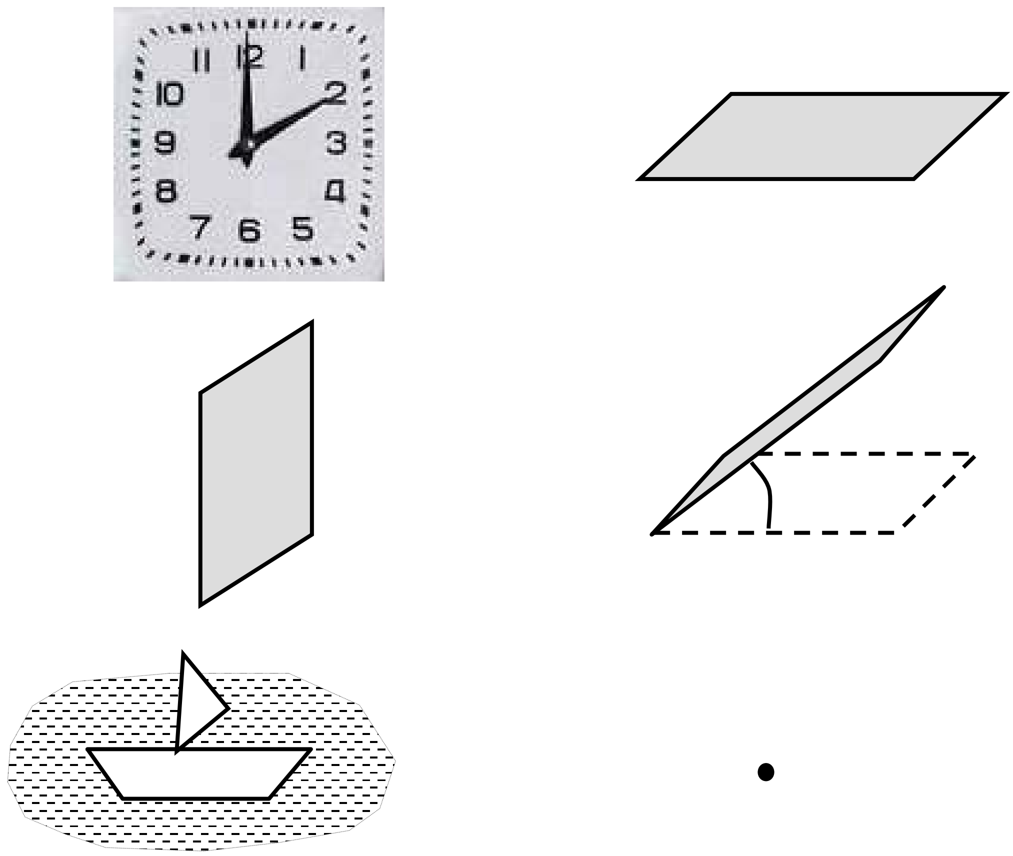












<u>Упражнение 4</u>. *Выполните упражнение по образцу.*

Образец: Физика – это наука о физических явлениях природы. Физика является наукой о физических явлениях природы.

1. Земля – это физическое тело.
2. Солнце и Луна – это физические тела.
3. Луна – это спутник Земли.
4. Венера и Марс – это планеты.
5. Планеты – это физические тела.

<u>Упражнение 5.</u> *Закончите предложения.*

а) 1. Земля движется вокруг...
2. Луна движется вокруг...
3. Все планеты движутся вокруг...
4. Спутник движется вокруг...
5. Все небесные тела движутся в ...

б) 1. Лед плавится и превращается...

2. Вода отвердевает и превращается...
3. Вода кипит и превращается...
4. Пар охлаждается и превращается ...

в) 1. Физическими явлениями называются изменения, которые ...
2. Физикой называется наука, которая ...

Упражнение 6. *Прочитайте, определите границы предложений и расставьте знаки препинания. Придумайте вопрос к каждому предложению.*

Физика является наукой о физических явлениях природы "физика" по-гречески значит природа физическое тело – это любой предмет здание, автобус, трамвай являются физическими телами все тела в природе движутся физика изучает движение тел.

Упражнение 7. *Прочитайте текст.*

ТЕКСТ

Вокруг нас находятся различные предметы: столы, стулья, доска, книги, тетради, карандаши. В физике всякий предмет называется физическим телом. Следовательно, стол, стул, книга, карандаш – это физические тела. Земля, Луна, Солнце также являются физическими телами. Физические тела – это материальные предметы, которые существуют в природе.

В природе с физическими телами происходят изменения. Например, зимой вода отвердевает и превращается в лед. Весной снег и лед плавятся и превращаются в воду. Вода кипит и превращается в пар. Пар охлаждается и превращается в воду.

Земля и другие планеты движутся вокруг Солнца. Солнце и все небесные тела движутся в космическом пространстве. Все эти изменения называются физическими явлениями.

Ответьте на вопросы:

1. Назовите тела, название которых встречается в тексте.
2. Какие физические явления происходят с физическими телами?

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. **Любой объект реального мира, участвующий в механическом движении называется физическим телом** (телом).

ТЕМА 5. **ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ**

5.1. **Размерность физической величины**

Новые слова и словосочетания

величина
характеристика
характеризовать (что?)
измерение
степень
измерить
индекс
значение
числовое значение (число)
единица физической величины
численно (число)
обозначить (назвать)
использовать
связь
показатель степени
наименование
зависимость
формула
уравнение
размерность

Каждое физическое тело или явление имеет свои свойства. Для изучения свойств физических тел и явлений используют определенные характеристики.

Количественная характеристика физического тела или явления, которую можно измерить – называется физической величиной.

Например: масса, путь, время, скорость, длина.

Физические величины обозначают обычно **буквой** латинского или греческого алфавита.

Например: длина – буква ***L***,
путь – буква ***S***,
скорость – буква υ,
температура – буква ***T***,
время – буква ***t***
и так далее.

Индексы пишут справа или слева, при этом используют арабские цифры, латинские и греческие буквы, строчные буквы русского алфавита. Например: $\boldsymbol{m}_1$, $\boldsymbol{l}_2$, $\boldsymbol{t}_3$, υ_a, υ_b, $\boldsymbol{\alpha}$, β, $\boldsymbol{\gamma}$, $\boldsymbol{\omega}$, υ^2, υ^n, ${}_2H^1$ и т.д. (Индекс, стоящий справа вверху – называется показатель степени, степень)

Физическая величина определяет численно свойства физического тела или физического явления.

Измерить физическую величину – значит **сравнить** ее с единицей измерения.

Единица физической величины – физическая величина, числовое значение которой равно 1. (Физическая величина, принятая за 1 – это единица физической величины).

Значение любой физической величины равно произведению числового значения величины на выбранную для нее единицу физической величины.

$\boldsymbol{Q} = n[Q]$. n – числовое значение, $[Q]$ – единица физической величины (размерность). Например: длина $L = 25$ метров, число 25 – это числовое значение физической величины.

Значение физической величины $\boldsymbol{Q}$ не зависит от выбора единицы физической величины.

Числовое значение физической величины n – это число, определяющее значение величины в выбранных единицах измерения. Числовое значение физической величины определяет, сколько единиц измерения составляет данная физическая величина. Числовое значение n физической величины $\boldsymbol{Q}$ зависит от выбора единиц измерения.

Пример: $L = 202$ *мм* = 20,2 *см*.

Число n изменилось, а $L = \text{const}$.

L = (202 – числовое значение) [*мм* – единица физической величины, размерность]

L = (20,2 – числовое значение) [*см* – единица физической величины, размерность].

Размерность определяет зависимость числового значения физической величины от выбора единиц измерения.

Например: длина $L = 25$ *метров*, 25 – это числовое значение физической величины, *метров* – единицы измерения (размерность).

По размерности можно определить единицы измерения физической величины. Размерность величины обозначается знаком [ ] или знаком dim (от латинского dimensio – «измерение»).

Поэтому при записи физической величины, необходимо указывать не только числовое значение величины, но и единицы измерения (размерность).

Между физическими величинами существуют связи и зависимости, которые могут быть выражены формулами и уравнениями.

Уравнение (формула) связи между физическими величинами – уравнение, отражающее законы природы. Уравнение связи записывают в виде математического выражения.

Например: $S = \upsilon t$ или $t = \dfrac{S}{\upsilon}$

$S = f(t)$ – зависимость (путь – это функция от времени)

$\upsilon = \upsilon_0 + at$ – уравнение движения или зависимость скорости от времени,

$\upsilon = f(t)$ – зависимость скорости от времени (скорость – функция времени).

<u>Формула связи не зависит от выбора единиц</u>, в которых будут выражены физические величины. Например: $S = \upsilon t$.

Уравнение связи между числовыми значениями физических величин – (уравнения между числами) зависит от выбора единиц измерения физических величин.

Например: $\upsilon = \dfrac{L}{t}$; $L = 3600\ \textit{м}$ $t = 1\ \textit{час}$

если L – в метрах, t – в секундах, то $\upsilon = 1\dfrac{\textit{м}}{\textit{с}}$,

если L – в километрах, t – в часах,

то $\upsilon = 3{,}6\dfrac{\textit{км}}{\textit{час}}$ $\upsilon = 1\dfrac{\textit{м}}{\textit{с}} = 3{,}6\dfrac{\textit{км}}{\textit{час}}$.

1 и 3,6 – числовые значения. Поэтому при записи физической величины необходимо ставить (указывать) наименование единиц измерения (размерность).

Размерность физической величины, определяемой по уравнению связи, зависит от выбора единиц измерения физических величин, входящих в это уравнение связи.

Чтобы определить единицы измерения (размерность) физической величины, которая определяется из уравнения связи, нужно в уравнение связи подставить единицы измерения величин, входящих в это уравнение.

Пример:

$\upsilon = \upsilon_0 + at$ – уравнение движения или зависимость скорости от времени.

Определим размерность (единицы измерения) физической величины υ

$$[\upsilon] = \frac{\textit{м}}{\textit{с}} + \frac{\textit{м}}{\textit{с}^2} \cdot \textit{с} = \frac{\textit{м}}{\textit{с}}.$$

Читаем, слушаем, повторяем:

характеристика (чего)	характеризовать (что)
обозначение	обозначать
обозначаться (чем) буквой	
измерение	измерить (что)
измерять	
физическая величина	размерность
масса	плотность
объем	скорость
температура	длина
измерить температуру	измерение температуры.

<u>УПРАЖНЕНИЯ</u>

<u>Упражнение 1.</u> *Прочитайте текст, ответьте на вопросы*

ТЕКСТ

Температура – физическая величина. Температура является физической величиной.

Масса, плотность, объем – это физические характеристики физических тел.

Путь, время, скорость – это характеристики движения тел.

Температура – это характеристика тепловых явлений.

Масса, плотность, время, скорость – это физические величины.

Физические величины – это характеристики физических явлений или тел.

Ответьте на вопросы по образцу.

Образец:
Вопрос: Что такое масса?
Ответ: Масса – это характеристика физического тела.

Вопрос: Какой буквой обозначается путь?
Ответ: Путь обозначается буквой S.

Что такое путь?
Что такое температура?
Что характеризует температура? Какой буквой обозначается?
Что характеризует скорость?
Какой буквой обозначается масса?

Какой буквой обозначается длина?
Какой буквой обозначается скорость?
Какой буквой обозначается время?
Какой буквой обозначается температура?
Что называют физической величиной?
Какие физические величины характеризуют свойства физических тел?
Какие физические величины характеризуют движение тел?
Какие физические величины характеризуют физические явления?
Как обозначаются физические величины?

Упражнение 2. *Укажите физические величины:*

1) движение	1) время	1) площадь
2) объем	2) перемещение	2) изменение
3) направление	3) сила	3) давление
4) температура	4) масса	4) ускорение
5) длина	5) падение	5) инерция
6) траектория	6) плотность	6) притяжение
7) скорость	7) плавление	7) измерение
8) полет	8) окисление	8) вращение

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. Количественная **характеристика физического тела или явления, которую можно измерить** – называется **физической величиной.**
2. **Физическая величина определяет численно свойства физического тела или физического явления**.
3. **Физические величины обозначают** обычно **буквой** латинского или греческого алфавита.
4. **Измерить** физическую величину – значит **сравнить** ее с единицей измерения.
5. **Размерность определяет зависимость числового значения физической величины от выбора единиц измерения.**

6. Уравнение (формула) связи между физическими величинами – уравнение, отражающее законы природы.
7. Формула связи не зависит от выбора единиц, в которых будут выражены физические величины.

5.2. Единицы измерения физических величин

Новые слова и словосочетания

система единиц	килограмм
основная	секунда
производная	Кельвин
кандела	моль
доля (часть)	десятичная доля
кратный	ртуть, ртутный
радиан	рекомендовать
совокупность	множество

Система единиц физических величин – совокупность (множество) единиц физических величин. Основу системы единиц составляют несколько единиц измерения физических величин, принятых для данной системы физических величин за **основу (основные единицы).**

Основная единица системы единиц – единица основной физической величины данной системы.

Универсальной системой является система СИ. Она охватывает все области измерений.

Международная система единиц СИ:

Основная физическая величина	Основная единица измерения	Обозначение единицы измерения
Длина	метр	*м*
Масса	килограмм	*кг*
Время	секунда	*с*
Количество вещества	моль	*моль*
Температура	градус Кельвина	*°К*
Сила тока	Ампер	*А*
Сила света	кандела	*кд*
Угол	радиан	

Физическая величина, не включенная в число основных величин данной системы единиц, называется производной физической величиной. Производная физическая величина связана с основными величинами данной системы уравнениями связи. Единицы измерения производной физической величины можно выразить (определить) через единицы измерения основных физических величин по уравнению связи.

Например:

- скорость – производная физическая величина, единица скорости $1\frac{м}{с}$ определяется по уравнению связи $\upsilon = \frac{L}{t}$, где L – длина, t – время;
- сила – производная физическая величина. Единица силы (Ньютон) $1Н = 1\frac{кг \cdot м}{с^2}$ определяется уравнением связи $F = ma$, где F – сила, m – масса , a – ускорение.

Кроме основных единиц могут применяться другие единицы, которые называют внесистемными (не системными), **дополнительными**.

<u>Внесистемные (не системные) единицы</u> – это единицы, которые не входят в основные единицы системы. Они часто используются вместе с основными единицами в различных областях науки и техники. Такие единицы <u>разрешены</u>, <u>допущены</u> <u>к применению</u> вместе с основными единицами СИ и называются **<u>дополнительными</u>.**

К дополнительным (внесистемным) единицам относятся:

- **единицы времени кратные 1 секунде** (единице времени системы СИ). Они имеют свои названия: 60 *с* = **1 *минута***; (60×60) *с* = 3600 *с* = **1 *час***; (24×60×60) *с* = **1 *сутки***; (365×24×60×60) *с* = 3,15 $\cdot 10^7$ *с* = **1 *год*** и с ними связанные (*км/час*).
- **единица угла градус: 1°** – один градус (1° = 0,01745 *радиан,* 1 *радиан* = 57,3°) и единицы, составляющие долю (часть) от 1°: 1° = 60′ (1′ – **одна минута)**; 1′ = 60′′ (1′′– **одна секунда**).
- единица длины (**световой год**) – это расстояние, на которое распространяется свет за один год: 1 *св.год* = 3,15 $\cdot 10^7 \cdot 3 \cdot 10^8 = 9{,}46 \cdot 10^{15}$ *м.*
- единица давления (**миллиметр ртутного столба**, **атмосфера**): 1 *мм.рт.ст.* = 133,3 *Па;* 1 *атм* = 1,013$\cdot 10^5$ *Па.*
- единица объема (**литр**): 1 *л* = 10^{-3} *м*^{3}.
- единицы величин, которые составляют десятичную долю (часть) от системной единицы или единицы кратные десяти. Для обозначения таких единиц используются **десятичные приставки к названиям единиц:**

Приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц

Степень	Приставка	Обозначение
10^{18}	экса	Э
10^{15}	пета	П
10^{12}	тера	Т
10^{9}	гига	Г
10^{6}	мега	М
10^{3}	кило	к
10^{2}	гекто	г
10	дека	да
10^{-1}	деци	д
10^{-2}	санти	с
10^{-3}	милли	м
10^{-6}	микро	мк
10^{-9}	нано	н
10^{-12}	пико	п
10^{-15}	фемто	ф
10^{-18}	атто	а

Пример: к дополнительным единицам относятся единицы, **кратные десяти или составляющие долю (часть) (десятичную часть) от основной единицы**. Такие единицы образованы (получены) от основных при помощи специальных приставок:

от **метра** – километр (10^3 м), сантиметр (10^{-2} м), миллиметр(10^{-3} м), микрометр (10^{-6} м), нанометр (10^{-9} м),

от **килограмма** (10^3 грамм); 1 грамм (10^{-3} кг), миллиграмм (10^{-6} кг), тонна (10^3 кг),

от **секунды** – миллисекунда (10^{-3} с), наносекунда (10^{-9} с).

(Как читается: 1 г = 10^{-3} кг. Например, грамм – десять в минус третьей килограмма, грамм – одна тысячная килограмма).

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Ответьте на вопросы письменно.*

1. Назовите основные единицы системы СИ.
2. Какие единицы измерения называют производными?
3. Единица измерения скорости 1 м/с – это основная единица системы СИ?

4. Единица измерения времени 1 час является основной единицей системы СИ?
5. Какие единицы измерения являются внесистемными?
6. Какие внесистемные единицы Вы знаете?
7. Сколько метров в одном километре?
8. Сколько килограмм в одном грамме?
9. Назовите дольные единицы физических величин.

Упражнение 2. *Назовите дольные единицы физических величин*:

десятая доля метра – это ….
сотая доля метра – это ….
тысячная доля метра– это ….
тысячная доля километра – это …
тысячная доля секунды – это …

Упражнение 3. *Назовите кратные единицы физических величин*:

1000 метров – это один ….
10 сантиметров – это один ….
60 секунд – это одна ….
3600 секунд – это один ….
1000 килограмм – это одна ….

Упражнение 4. *Прочитайте формулы*.

Пример: *1 км = 10^3 м (один километр равен десять в третьей степени метров).*

1 мм = 10^{-3} м, 1 км = 10^3м, 1 мм = 10^{-1} см, 1 кг = 10^3 г, 1 нм = 10^{-9} м, 1 пФ = 10^{-12} Ф, 1 т = 10^3 кг, 1 мкм = 10^{-6} м.

Упражнение 5. *Заполните пропуски, запишите выражения словами*:

1 мм = … см, 1 мс = ….. с, 1 м = …. нм, 1 кг = …. мг, 1 кг = … т, 1 час = … с, 1 год = ….. с, 1 мг = … кг, 1 год = … мин, 1 сутки = …. мин.

Упражнение 6. *Заполните таблицу.*

длина 1 км	= м	= см	= мм	= мкм
масса 1 тонна	= кг	= г	= мг	= мкг
время 1 час	= мин	= сек	= мкс	= нс
время 1 год	= суток	= часов	= мин	= сек

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. **Система единиц физических величин** – совокупность (множество) единиц физических величин, принятых для данной системы физических величин.
2. **Основная единица системы единиц** – единица основной физической величины данной системы.
3. Международная система единиц СИ.

Основные единицы:

метр (м) – единица длины
килограмм (кг) – единица массы
секунда (с) – единица времени
Ампер (А) – единица силы тока
Кельвин (К) – единица термодинамической температуры
кандела (кд) – единица силы света
моль (моль) – единица количества вещества
радиан – единица угла

4. **Производная единица** – это единица физической величины, полученная из основных единиц по уравнению связи.
5. **Внесистемные (не системные, дополнительные) единицы** – это единицы, которые не входят в основные единицы системы.
6. К внесистемным единицам относятся:
   - единицы кратные единице времени (минута (60 с), час (60×60 с), сутки (24×60×60 с), год (365×24×60×60 с)) и с ними связанные (км/час),

- единицы плоского угла – полный угол (градус, минута, секунда),
- единица длины (световой год),
- единица давления (миллиметр ртутного столба, атмосфера),
- единица объёма (литр).

7. К дополнительным единицам относятся единицы, **кратные десяти или составляющие долю (часть) (десятичную часть) от основной единицы**. Такие единицы образованы (получены) от основных при помощи специальных приставок.

5.3. Экспериментальное измерение физических величин

Новые слова и словосочетания

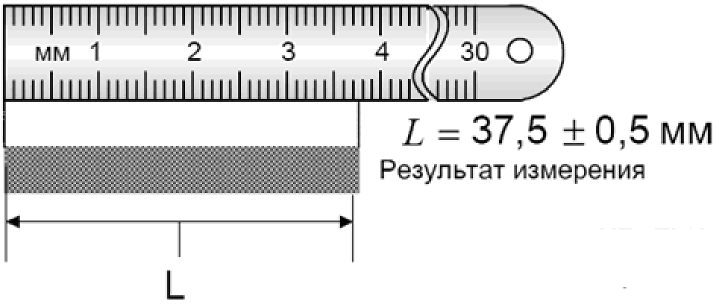
прибор	секундомер
инструмент	линейка
масштаб	термометр
числовая ось	изображать (изобразить)
момент времени	изображение
интервал времени	отложить
эксперимент, опыт	вычислить
прямой	взвесить, взвешивать
амперметр	вольтметр
мензурка	косвенный
непосредственный (но)	косвенно
микроскоп	компас
рулетка	весы

Физическая величина определяет (характеризует) свойства физического тела или физического явления.

Физическую величину можно определить (измерить) на опыте (эксперименте, экспериментально).

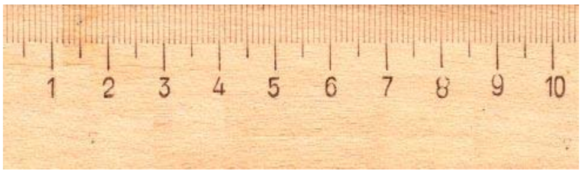
Измерить – значит сравнить с другой (подобной) физической величиной – единицей измерения. Такие измерения называются прямыми.

<u>Прямые измерения</u> – это такие измерения, когда измеряемая величина непосредственно сравнивается с единицей измерения. Непосредственно можно измерить длину, время, массу, температуру.



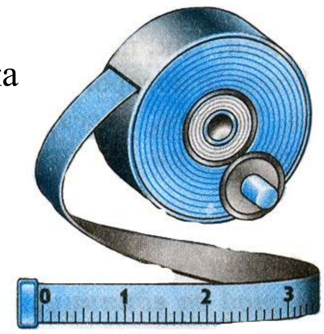
Тело, имеющее длину L, сравнивается с единицей измерения линейки 1 *мм*

Измерить физическую величину можно при помощи **прибора (инструмента).** Прибором для измерения размера, длины, расстояния является линейка или рулетка.

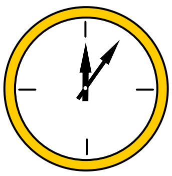


это линейка

Это рулетка



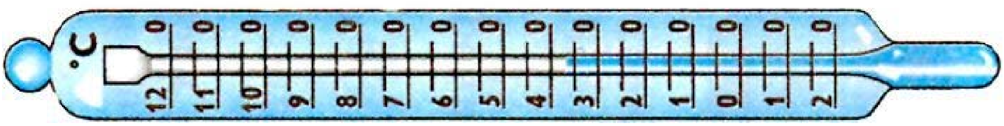
Время (момент времени, промежуток времени, интервал времени) измеряют при помощи часов (секундомера).



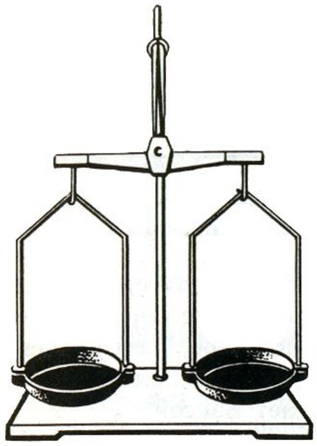
это часы

это секундомер

Температуру измеряют термометром.

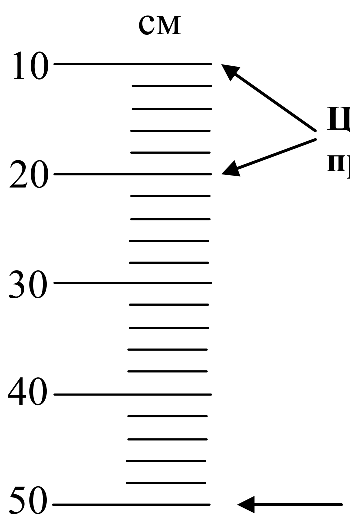


это термометр

		
Это весы. Весами измеряют массу (вес).	Это мензурка. Мензуркой измеряют объем жидкости.	Это динамометр. Динамометром измеряют силу.

Любой физический прибор имеет **шкалу, на которой указана единица измерения**. Например: по линейке можно измерить длину в сантиметрах или в миллиметрах. По часам определить время в часах, минутах и секундах. Температуру можно измерить в градусах Цельсия, Кельвина, Фаренгейта.

На физическом приборе указана цена (точность) деления прибора – минимальная единица измерения.



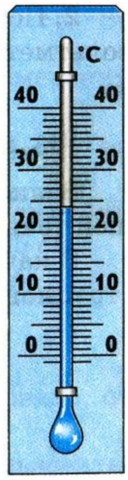
Цена деления прибора $= \dfrac{\textbf{разность 2-х соседних чисел}}{\textbf{число делений между ними}}$

Цена деления прибора $= \dfrac{20 - 10}{5} = 2$ ***см***

Предел измерения – максимальное значение по шкале

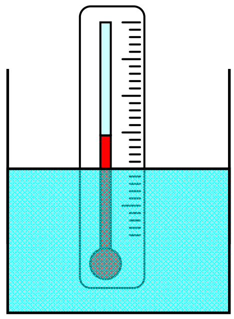
Пример: на рисунке прибор имеет
цену деления (точность) 2 *см*,
предел измерения этого прибора 50 *см*.

Термометр на рисунке имеет
точность 1°C,
предел измерений термометра 40° C.



Пример: прямые измерения температуры воды при помощи термометра.

термометр

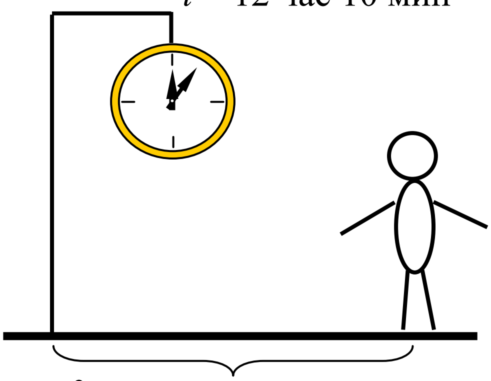


Результаты измерений можно представить (записать) в виде числа с указанием единиц измерения.

Результаты измерения: $t = 20°$ C

Пример: прямые измерения времени и положения человека на остановке.

t = 12 час 10 мин



0 L = 200 м

Физическую величину и результаты измерений можно изобразить на рисунке или схеме.

Время измерено по часам.
Расстояние измерено рулеткой.

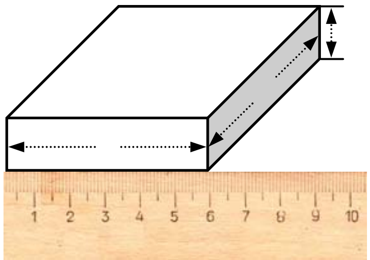
Результаты измерений:
t = 12 *час* 10 *мин*
Положение человека относительно столба L = 200 *м*

Многие физические величины, такие как площадь, объем, скорость и другие **нельзя измерить непосредственно прибором**. Эти физические величины можно вычислить (определить) при помощи формул связи или уравнений. Такие измерения называют <u>**косвенными**</u>.

Формулы (уравнение связи) описывает, как одна физическая величина зависит от другой.

Например: объем тела, изображенного на рисунке равен $V = a \cdot b \cdot c$ или $V = 6 \cdot 8 \cdot 2 = 96\left(см^3\right)$

параллелепипед



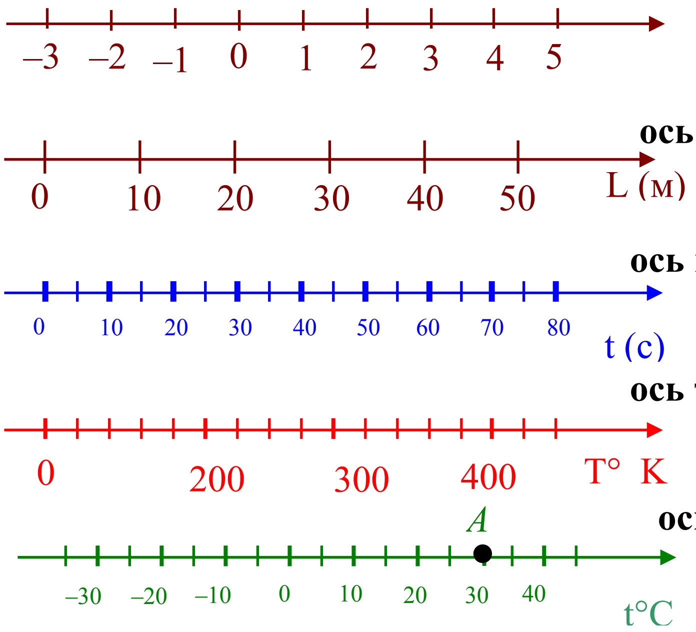
размеры тела измерены линейкой
результаты измерений:

$a = 6$ *см*
$b = 8$ *см*
$c = 2$ *см*

Результаты измерений можно изобразить (отложить) на оси.

Значение физической величины можно отложить (изобразить) на числовой оси при помощи **<u>масштаба</u>.** На оси указываются единицы измерения физической величины и ее обозначение.

Масштаб – это цена одного деления оси, на которой отложена физическая величина.



числовая ось

ось длины
масштаб: 1 деление – 10 *м*

ось времени
масштаб: 1 деление – 5 *с*

ось температур
масштаб: 1 деление – 40°К

ось температур
масштаб: 1 деление – 5° *C*

Измеренную физическую величину можно изобразить (отложить) на оси. Например: $t = 30°\ C$ – это точка A на рисунке.

Если физическая величина изменяется в пространстве или во времени, то необходимо производить одновременно измерение двух (или более) величин.

Например: человек идёт по улице. Расстояние, пройденное человеком, изменяется со временем $S = f(t)$. Возьмём **два прибора**: **часы** и прибор, при помощи которого можно измерить расстояние, пройденное человеком к этому моменту времени (**рулетку**).

Результаты измерений удобнее представить в виде таблицы результатов.

Например: результаты измерений приведены в таблице:

t, (c)	1	2	3	4	5
S, ($м$)	50	100	150	200	250

Так как физические величины, измеряемые на опыте, связаны уравнением связи, то результаты таких измерений можно наглядно изобразить (показать) на рисунке в виде графика.

График – это линия, которая показывают, как одна физическая величина зависит от другой. График представляет зависимость физических величин.

Чтобы построить график, необходимо взять две оси (с обозначением физических величин и масштабов).

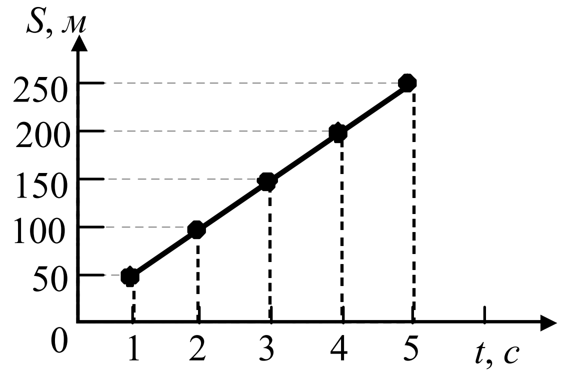
Например: $S = f(t)$.

Результаты измерений:

t, (c)	1	2	3	4	5
S, ($м$)	50	100	150	200	250

Результаты измерений можно изобразить на графике (построить график зависимости $S = f(t)$).

Возьмем две оси – ось времени t и ось расстояния S. По каждой оси выбираем свой масштаб и единицы измерения. Рассмотрите внимательно рисунок.



Какой масштаб по оси времени t?

В каких единицах измерено время?

Какой масштаб по оси расстояния S?

В каких единицах измерено расстояние?

Какова зависимость S от t?

Такой рисунок, изображающий зависимость одной физической величины от другой называется графиком зависимости.

По графику зависимости можно определить физическую величину, связанную с величинами на графике формулой связи. Из приведенного графика зависимости $S = f(t)$ можно найти скорость равномерного движения. Скорость равномерного движения (из графика) равна 50 *м/с*.

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Читаем, слушаем, повторяем.*

Для измерения длины используют линейку.
Длину измеряют линейкой. Длину измеряют при помощи линейки.
Большие расстояния измеряют рулеткой.
Время измеряют по часам. Для измерения времени используют часы.
Время (промежуток времени) измеряют часами.
Время можно измерить секундомером. Время можно измерить по секундомеру.
Массу измеряют при помощи весов. Массу измеряют взвешиванием.
Чтобы определить массу, тело взвешивают на весах.
Температуру измеряют термометром. Температуру определяют по термометру.
Время можно определить по часам. Температуру можно определить по термометру. Длину можно определить по линейке.
Объём жидкости можно измерить мензуркой.

Упражнение 2. *Ответьте на вопросы:*

Как можно измерить физическую величину?
Как обозначается физическая величина?
Все физические величины можно измерить непосредственно?
Какие измерения называются прямыми?
Какие измерения называются косвенными?
Как изобразить физическую величину на рисунке?
Что такое график физической величины?

Упражнение 3. *Закончите предложение:*

Мензурка – это физический прибор для измерения ……
Весы – это физический прибор для измерения ….
Термометр – это физический прибор, который используют для измерения …..
Секундомером можно измерить …..
Секундомер – это физический прибор для измерения ……
Весы – это физический прибор, который используют для …………
Линейка – это физический прибор (инструмент) для измерения …
Рулетка – это физический прибор, который используют для ………

Упражнение 4.

- *Изобразите на осях следующие физические величины:* L = 300 м, S = 5км, t = 2,5 часа, t = 25° C, t = –50° C, m = 85 г.
- *Изобразить на рисунке результаты измерений:* в момент времени t = 12^{00} час автомобиль находился в точке А, а в момент времени t = 12 час 30 мин автомобиль находился в точке В. Расстояние между точками А и В равно 500 м.
- *Постройте графики по результатам измерений:*

1. график зависимости скорости от времени $\upsilon = f(t)$

t, (c)	0	1	2	3	4	5
υ, ($м/c$)	10	8	6	4	2	0

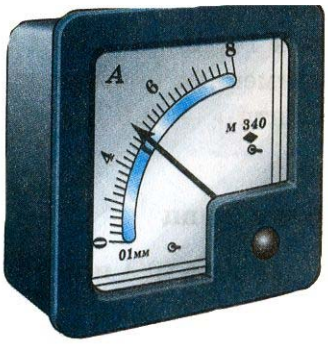
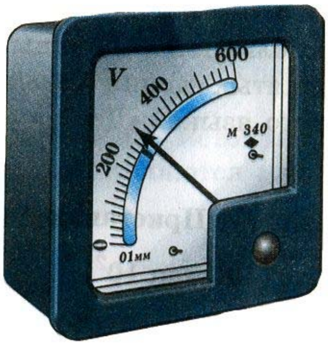
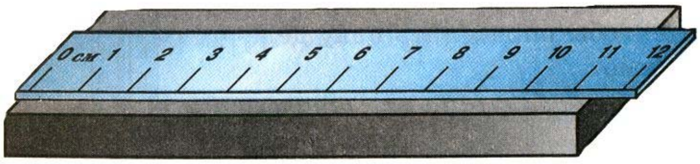
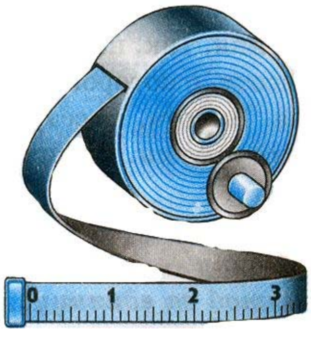
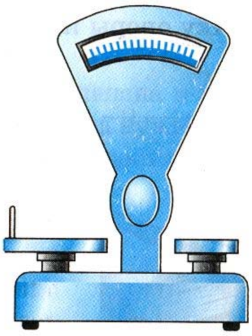
2. график зависимости расстояния от времени $S = f(t)$

t, (c)	0	1	2	3	4
S, ($м$)	0	1	4	9	16

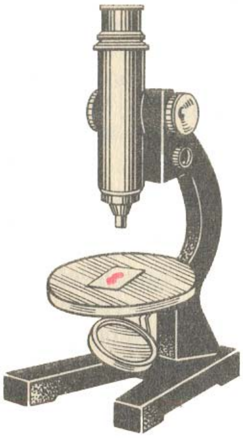
3. график зависимости ускорения от силы $a = f(F)$

F, (H)	200	400	600	800	1000
a, ($м/c^2$)	10	20	30	40	50

Упражнение 5. *Рассмотрите внимательно физические приборы, изображенные на рисунках. Ответьте на вопросы.*


A
0
4
6
8
М 340
01мм

V
0
200
400
600
М 340
01мм

0 см 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

0 1 2 3



12 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11

°C


Н
50
100
150
200

60 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55

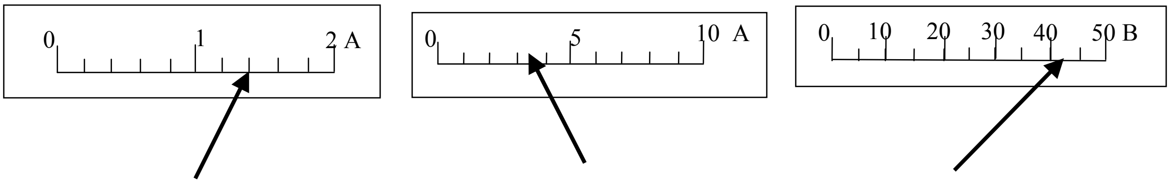
1. *Какие физические приборы изображены на рисунках? Найдите соответствие:*

линейка, термометр, часы, компас, амперметр, рулетка, микроскоп, вольтметр, весы, динамометр.

2. *Какие физические величины можно измерить при помощи приборов, изображенных на рисунках? Найдите соответствие:*

температуру, массу, силу, напряжение, силу тока, длину, направление, время.

<u>Упражнение 6.</u> *Определите цену деления шкалы приборов, изображенных на рисунках, запишите показания приборов:*



<u>Упражнение 7.</u> *Прочитайте текст, ответьте на вопросы.*

ТЕКСТ

Физическая величина – это свойство материи, которое может быть измерено. Измерить физическую величину, значит сравнить ее с однородной величиной, принятой за единицу. Измерить физическую величину можно при помощи приборов. Такие измерения – это прямые измерения.

Если физическая величина определяется по формуле, то такие измерения называются косвенными.

Результаты измерений можно представить:

- в виде числа с указанием единиц измерения,
- в виде таблиц, рисунков,
- в виде графиков.

Вопросы.

1. Что значит измерить физическую величину?
2. Какие измерения называются прямыми?
3. Какие измерения называются косвенными?
4. Как можно представить результаты измерений?

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. **Измерить** – значит сравнить с другой (подобной) физической величиной – единицей измерения.
2. **Прямые измерения** – это такие измерения, когда измеряемая величина непосредственно сравнивается с единицей измерения.
3. Измерить физическую величину можно при помощи **физического прибора (инструмента).**
4. Если физическую величину можно вычислить при помощи формул связи или уравнений, то такие измерения называют **косвенными.**
5. Результаты измерений можно изобразить на оси, на рисунке, графике, представить в виде таблицы.
6. **Масштаб** – это цена одного деления оси, на которой отложена физическая величина.
7. **Цена (точность) деления прибора** – минимальная единица измерения.
8. Рисунок, изображающий зависимость одной физической величины от другой называется **графиком зависимости**.

ТЕМА 6. **ЭЛЕМЕНТЫ ВЕКТОРНОЙ АЛГЕБРЫ**

6.1. **Скалярные величины**

Новые слова и словосочетания

вектор	модуль вектора
стрелка	величина
обозначение, обозначить	
противоположный, противоположно	
направление, иметь направление	совпадать
коллинеарный	
параллельный (параллелен)	

Физическая величина – это количественная характеристика физического явления или свойства физического тела. Физические величины могут быть скалярными и векторными.

Скалярная физическая величина (скаляр) – это величина, которая характеризуется только числовым значением (числом).

Например: время (t), длина (l), масса (m).

Скаляр может быть больше нуля ($a > 0$), меньше нуля ($a < 0$) или равен нулю ($a = 0$).

Можно говорить: положительное число, отрицательное число (положительный скаляр, отрицательный скаляр). Положительное число – это число больше, чем нуль. Отрицательное число – это число меньше, чем нуль.

Скаляры можно складывать, вычитать, умножать и делить.

Скалярные физические величины одного рода (определяющие одинаковые свойства физического тела или явления), имеющие одинаковые единицы измерения, тоже можно складывать, вычитать, умножать и делить.

Пример 1: человек прошел расстояние $l_1 = 5$ *м,* после этого он прошел ещё расстояние $l_2 = 10$ *м*. Общее расстояние, которое прошел человек равно $l = l_1 + l_2 = 15$ (*м*).

Пример 2: объём параллелепипеда определяется по формуле $V = a \cdot b \cdot c$, где a, b, c – длина, ширина и высота параллелепипеда.

Результаты измерений: $a = 51$ *см* 2 *мм;* $b = 6$ *см*; $c = 0{,}2$ *см*. Объём параллелепипеда равен: $V = 512 \cdot 60 \cdot 2 = 61440$ (*мм*^{3}) или $V = 51{,}2 \cdot 6 \cdot 0{,}2 = 61{,}44$ (*см*^{3}).

Вопросы.

Что такое скалярная физическая величина?

Какие математические действия можно выполнять над скалярными физическими величинами?

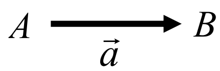
6.2. Векторные величины (векторы)

Новые слова и словосочетания

это прямая линия

это отрезок прямой линии

это стрелка

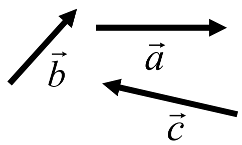


это вектор $\vec{a}$ или $\overrightarrow{AB}$,
точка A – это начало вектора,
точка B – это конец вектора

Вектор – это отрезок прямой линии, который имеет направление и величину (модуль).

Например, векторными величинами в физике являются скорость, сила, импульс, ускорение и др.

Обозначение вектора – буква со стрелкой $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$.



это векторы $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$.

Стрелка показывает направление вектора.

Вектор – это отрезок прямой линии, который имеет направление и величину (модуль).

Модуль вектора равен длине отрезка прямой линии в определенном масштабе.

Модуль вектора обозначается той же буквой, что и вектор, но без стрелки:

модуль вектора $\vec{a}$ равен a или

модуль вектора $\overrightarrow{AB}$ равен $|\overrightarrow{AB}|$

длина отрезка AB в определенном масштабе равна модулю вектора $\overrightarrow{AB}$, стрелка указывает направление вектора $\overrightarrow{AB}$.

Модуль вектора – это число. Оно может быть больше, чем нуль или равно нулю ($|\vec{a}| \geq 0$).

Вектор, модуль которого равен единице, называется единичным вектором.

ЗАПОМНИТЕ!

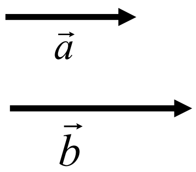
Модуль вектора равен длине отрезка. Модуль – это число.

Модуль вектора больше, чем нуль, или равен нулю ($|\vec{a}| \geq 0$).

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

он равен (модуль равен)	
она равна (длина равна)	на рисунке видим
оно равно (число равно)	рассмотрим рисунок
они равны (модули равны)	на рисунке изображены

На рисунке два вектора $\vec{a}$ и $\vec{b}$. Векторы направлены одинаково (в одну сторону).



направления векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ совпадают;

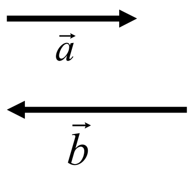
векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$ направлены одинаково;

векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$ имеют одинаковые направления;

векторы, имеющие одинаковое направление можно обозначить так $\vec{a} \uparrow\uparrow \vec{b}$.

Запись $\vec{a} \uparrow\uparrow \vec{b}$ ***можно прочитать:*** вектор $\vec{a}$ параллелен вектору $\vec{b}$. Векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$ имеют одинаковые направления.

На рисунке два вектора $\vec{a}$ и $\vec{b}$. Векторы направлены в разные стороны.



направления векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ противоположные;

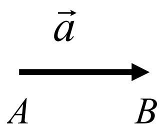
векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$ направлены противоположно;

векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$ имеют противоположные направления;

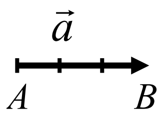
векторы, имеющие противоположные направления можно записать так $\vec{a} \uparrow\downarrow \vec{b}$.

Запись $\vec{a} \uparrow\downarrow \vec{b}$ ***можно прочитать:*** вектор $\vec{a}$ направлен противоположно вектору $\vec{b}$. Векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$ имеют противоположные направления.

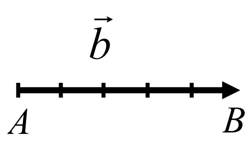
Вектор имеет <u>направление</u> и <u>модуль</u>.



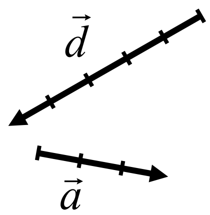
Точка A – это начало вектора $\vec{a}$.
Точка B – это конец вектора $\vec{a}$.
Модуль вектора $\vec{a}$ равен 1 (единице).



Модуль $|\vec{a}| = a = 3$;
Длина отрезка AB (в масштабе) $|\overrightarrow{AB}| = 3$,
Модуль вектора $\vec{a}$ равен трем

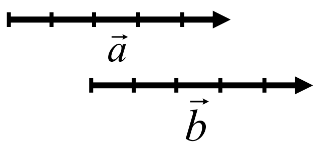


Это вектор $\vec{b}$. Точка A – это начало вектора $\vec{b}$, точка B – это конец вектора $\vec{b}$. Модуль вектора $|\vec{b}| = b,\ b = 5$. Стрелка показывает направление вектора.



Это векторы $\vec{d}$ и $\vec{a}$. Модуль вектора $|\vec{d}| = d, \quad d = 5$
Модуль вектора $|\vec{a}| = a, \quad a = 3$
$|\vec{d}| \neq |\vec{a}|; \quad d \neq a; \quad d > a.$

1. Если два вектора $\vec{a}$ и $\vec{b}$ равны по модулю ($|\vec{a}| = |\vec{b}|$), и имеют одинаковые направления, то



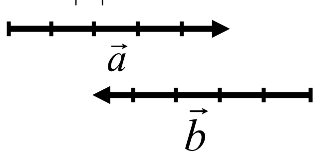
это **равные векторы:**

$\vec{a} \uparrow\uparrow \vec{b}$, $|\vec{a}| = |\vec{b}|$,

$\vec{a} = \vec{b}$,

(вектор $\vec{a}$ равен вектору $\vec{b}$)

2. Если два вектора $\vec{a}$ и $\vec{b}$ равны по модулю ($|\vec{a}| = |\vec{b}|$), параллельны, но имеют противоположные направления, то



это **противоположные векторы:**

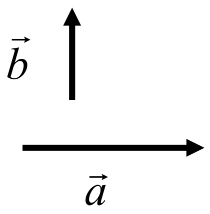
$\vec{a} \uparrow\downarrow \vec{b}$, $|\vec{a}| = |\vec{b}|$,

$\vec{a} = -\vec{b}$,

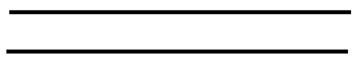
(вектор $\vec{a}$ равен минус вектору $\vec{b}$).

3. Два вектора $\vec{a}$ и $\vec{b}$ <u>перпендикулярные</u>, если угол между векторами равен 90° или $\frac{\pi}{2}$.

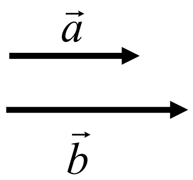
$\vec{a} \perp \vec{b}$



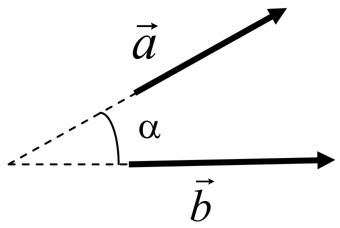
Векторы, направленные вдоль параллельных прямых (в одну и ту же сторону) называются <u>коллинеарными.</u>



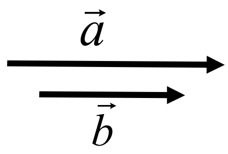
параллельные линии



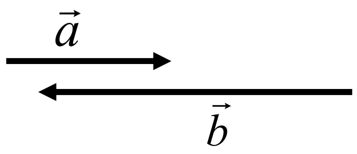
векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$ имеют одинаковые направления
векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$ – коллинеарные векторы



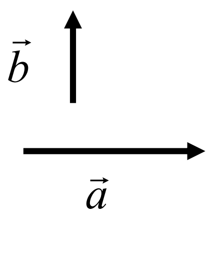
угол между векторами α острый



угол между векторами 0° (ноль градусов)



угол между векторами π (пи или 180°)



угол между перпендикулярными векторами равен $\pi/2$ (пи на два или 90°)

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

если направления векторов одинаковые, то угол между векторами равен 0 градусов ($\alpha = 0°$),
если направления векторов противоположные, то угол между векторами равен 180° ($\alpha = 180°$),
если направления векторов перпендикулярные, то угол между векторами равен 90° ($\alpha = 90°$).

УПРАЖНЕНИЯ

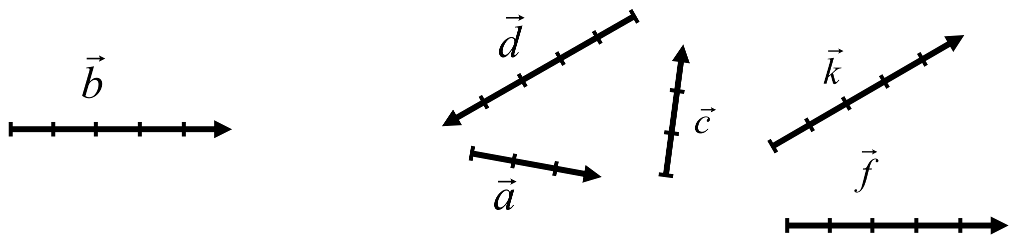
Упражнение 1. *Читаем, слушаем, повторяем.*

1. Прямая линия Отрезок Отрезок прямой линии	2. Направление Направление вектора Направления векторов
3. Иметь направление Направлен Вектор имеет направление	4. Стрелка вектора Стрелки векторов
5. Вектор – это отрезок прямой линии Вектор направлен по стрелке Стрелка показывает	6. Вектор обозначается буквой со стрелкой Модуль вектора Модуль вектора равен длине отрезка в определенном масштабе
7. Строить Построить Совпадать Разный Одинаковый Противоположный Параллельный	8. Число больше нуля. Число меньше нуля. Число равно нулю. Положительное число. Отрицательное число.
9. Скаляр Скаляр может быть больше нуля. Скаляр может быть меньше нуля. Скаляр может быть равен нулю.	10. Сложение скаляров Вычитание скаляров Умножение скаляров Деление скаляров

11. Модуль вектора может быть больше нуля. Модуль вектора может быть равен нулю. Модули векторов равны Противоположные векторы Одинаковые векторы	12. Направления векторов одинаковые Направления векторов совпадают Противоположные направления векторов Перпендикулярные направления векторов

Упражнение 2. *На рисунке изображены 6 векторов. Какие из них:*

1. одинаковые
2. противоположные
3. перпендикулярные
4. одинаково направленные
5. противоположно направленные

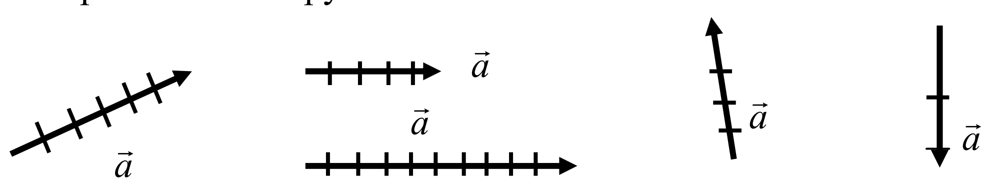


Упражнение 3. *Постройте векторы.*

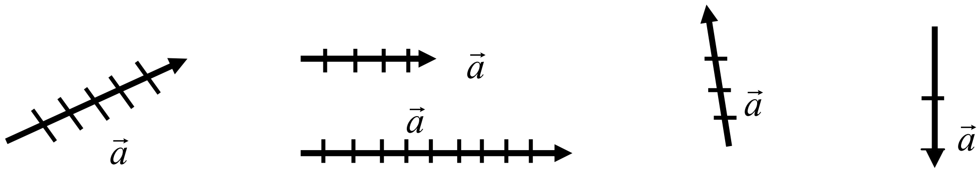
1. $a = 2$ $b = 6$ $\alpha = 0°$	2. $a = 7$ $b = 5$ $\alpha = 180°$	3. $b = 4$ $c = 3$ $\alpha = 60°$	4. $k = f = 5$ $\alpha = 90°$
5. $b = 2$ $c = 5$ $\alpha = 45°$	6. $a = 5$ $b = 7$ $\alpha = 30°$	7. $k = 8$ $f = 4$ $\alpha = 120°$	8. $a = 12$ $b = 6$ $\alpha = 135°$

Упражнение 4. *Постройте вектор:*

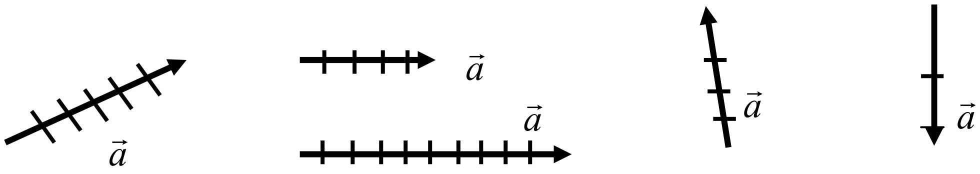
1. равный вектору $\vec{a}$



2. противоположный вектору $\vec{a}$



3. перпендикулярный вектору $\vec{a}$

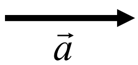


<u>Упражнение 5.</u> *Ответьте на вопросы устно.*

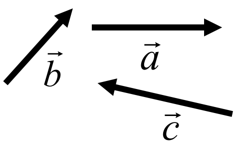
Пример:

Что это? Это отрезок прямой линии.

Что это?



Что это?



Что это?

<u>Упражнение 6.</u> *Ответьте на вопросы письменно.*

1. Что такое скаляр?
2. Что такое вектор? Что показывает стрелка вектора?
3. Какими могут быть скаляры?
4. Каким может быть модуль вектора?
5. Какие математические действия Вы знаете?
6. Как обозначается вектор?

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. **<u>Физическая величина</u>** – это количественная характеристика физического явления или свойства физического тела.
2. **<u>Скалярная физическая величина</u>** (скаляр)– это величина, которая имеет только числовое значение (число).
3. Векторная физическая величина – вектор. **<u>Вектор</u>** – это отрезок прямой линии, который имеет направление и величину (модуль).
4. **<u>Стрелка</u>** <u>показывает</u> направление вектора.
5. **Модуль вектора** <u>равен длине отрезка прямой линии в определенном масштабе</u>.
6. Если два вектора $\vec{a}$ и $\vec{b}$ равны по модулю ($|\vec{a}| = |\vec{b}|$), и имеют одинаковые направления, то это **равные векторы:** $\vec{a} \uparrow\uparrow \vec{b}$, $|\vec{a}| = |\vec{b}|$, $\vec{a} = \vec{b}$, (вектор $\vec{a}$ равен вектору $\vec{b}$)
7. Если два вектора $\vec{a}$ и $\vec{b}$ равны по модулю ($|\vec{a}| = |\vec{b}|$), параллельны, но имеют противоположные направления, то это **противоположные векторы:**
   $\vec{a} \uparrow\downarrow \vec{b}$, $|\vec{a}| = |\vec{b}|$, $\vec{a} = -\vec{b}$,
   (вектор $\vec{a}$ равен минус вектору $\vec{b}$).
8. Два вектора $\vec{a}$ и $\vec{b}$ <u>перпендикулярные</u>, если угол между векторами равен 90° или $\frac{\pi}{2}$. $\vec{a} \perp \vec{b}$ (вектор $\vec{a}$ перпендикулярен вектору $\vec{b}$).
9. **Векторы,** направленные вдоль параллельных прямых (в одну и ту же сторону) называются **<u>коллинеарными.</u>**

6.3. **Сложение векторов**

Новые слова и словосочетания

сложить, сложение	сложить по правилу
вычесть, вычитание	правило треугольника
умножить, умножение	правило параллелограмма
делить, деление, разделить	сложить векторно
расположить	геометрически
вычислить по формуле	найти
диагональ параллелограмма	проекция
соединить	соединяет
разложить	проектировать

Действия с векторами

Сложение, вычитание, умножение, деление – математические действия.

В математике изучают действия с числами и векторами.

Вектор – это отрезок прямой линии, который имеет направление.

Модуль вектора – это число. Модуль вектора может быть $|\vec{a}| = 0$, $|\vec{a}| > 0$ или $|\vec{a}| \geq 0$. Модуль вектора не может быть меньше нуля.

Скаляр – это число. У скаляра нет направления. Скаляр может быть $n > 0$, $n < 0$ или $n = 0$.

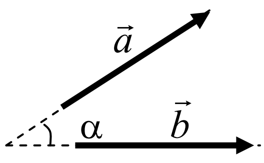
Число может быть положительным, отрицательным или нулевым. Отрицательное число меньше, чем нуль.

Скаляры можно складывать, вычитать, умножать, делить.

Векторы можно **складывать, вычитать, умножать.** Делить вектор на вектор нельзя. Операции деления вектора на вектор не существует.

Векторы можно спроектировать (найти проекцию) на некоторое направление. Векторы можно разложить на составляющие.

Сложение двух векторов



Даны два вектора $\vec{a}$ и $\vec{b}$.

α – угол между векторами.

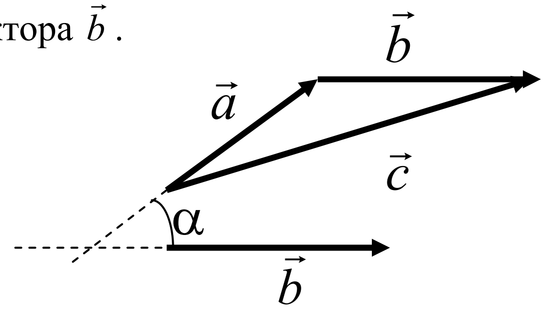
Сложим два вектора – найдем вектор $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$.

Векторные величины можно складывать только векторно (геометрически).

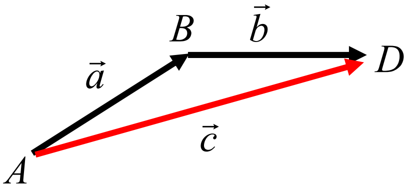
Есть два правила сложения векторов – <u>правило треугольника</u> и <u>правило параллелограмма</u>.

<u>Правило треугольника</u>: чтобы сложить вектор $\vec{a}$ и вектор $\vec{b}$, нужно расположить их так, чтобы начало вектора $\vec{b}$ и конец вектора $\vec{a}$ совпадали.

Перенесем вектор $\vec{b}$ параллельно так, чтобы начало вектора $\vec{b}$ совпало с концом вектора $\vec{a}$. Вектор $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$ соединяет начало вектора $\vec{a}$ и конец вектора $\vec{b}$.



Чтобы сложить векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$, нужно построить треугольник.



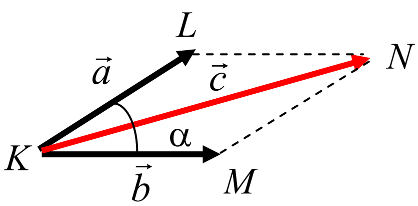
$\overrightarrow{AB} = \vec{a}$, $\overrightarrow{BD} = \vec{b}$, $\overrightarrow{AD} = \vec{c}$

Начало вектора $\vec{b}$ совпадает с концом вектора $\vec{a}$. Вектор $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$ соединяет начало вектора $\vec{a}$ и конец вектора $\vec{b}$.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Сложить векторы – значит получить сумму векторов.
Сложить векторы по правилу треугольника – значит построить треугольник.
Чтобы сложить векторы, нужно построить треугольник.

<u>Правило параллелограмма</u>: чтобы сложить вектор $\vec{a}$ и вектор $\vec{b}$, нужно расположить векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$ так, чтобы их начало было в одной точке. На векторах $\vec{a}$ и $\vec{b}$ строим параллелограмм. Диагональ параллелограмма – это вектор $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$.



Чтобы сложить векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$, можно построить параллелограмм.

$\overrightarrow{KL} = \vec{a}$, $\overrightarrow{KM} = \vec{b}$, $\overrightarrow{KN} = \vec{c}$

Построить линию MN параллельно $\vec{a}$.

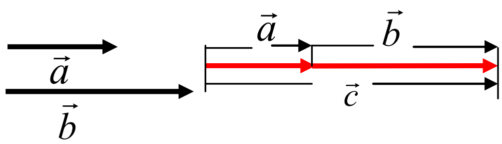
Построить линию LN параллельно $\vec{b}$.
Начало вектора $\vec{c}$ – точка K.
Конец вектора $\vec{c}$ – точка N.
Модуль вектора $\vec{c}$ равен длине KN.

> ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!
>
> Чтобы сложить векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$, можно построить параллелограмм.

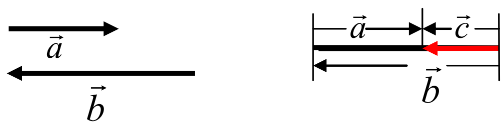
Модуль вектора $\vec{c}$ можно найти по формуле $c=\sqrt{a^2+b^2+2ab\cos\alpha}$, в этой формуле a – модуль вектора $\vec{a}$, b – модуль вектора $\vec{b}$, c – модуль вектора $\vec{c}$, α – угол между векторами (cos α – косинус угла между векторами).

Читаем формулу: $c=\sqrt{a^2+b^2+2ab\cos\alpha}$, модуль вектора $\vec{c}$ равен корню квадратному из a в квадрате, плюс b в квадрате, плюс удвоенное произведение a на b на косинус альфа (косинус угла между векторами).

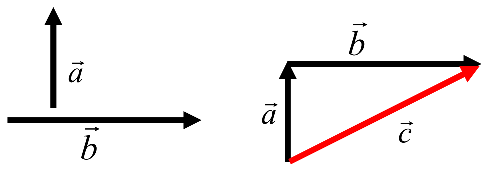
Векторные величины можно складывать только геометрически (векторно) по правилу треугольника или параллелограмма.
Рассмотрим примеры сложения векторов:



$$c=\sqrt{a^2+b^2+2ab\cos 0^\circ}=$$
$$=\sqrt{(a+b)^2}=a+b$$
$$\cos 0^\circ=1$$



$$c=\sqrt{a^2+b^2+2ab\cos\pi}=|a-b|$$
$$\cos 180^\circ=-1$$

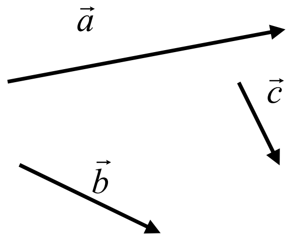


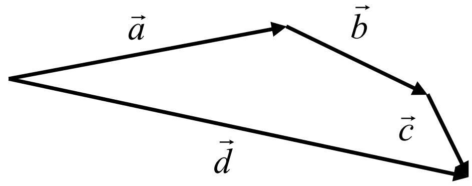
$$c=\sqrt{a^2+b^2+2ab\cos\frac{\pi}{2}}=\sqrt{a^2+b^2}$$
$$\cos 90^\circ=0$$

Сложение нескольких векторов

Чтобы сложить несколько векторов, нужно перенести вектора параллельно так, чтобы конец одного вектора совпал с началом следующего вектора. Вектор, соединяющий начало первого вектора и конец последнего – это вектор суммы векторов.

Пример: нужно сложить векторы $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$. Определим вектор $\vec{d} = \vec{a} + \vec{b} + \vec{c}$.





сумма векторов
$\vec{d} = \vec{a} + \vec{b} + \vec{c}$

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Читаем, слушаем, повторяем.*

Математические действия:	*что делать?*	*что сделать?*
сложение	складывать	сложить
вычитание	вычитать	вычесть
умножение	умножать	умножить
деление	делить	разделить

Векторы можно: складывать, вычитать, умножать.
Делить вектор на вектор нельзя.
Получить сумму векторов
Построить треугольник
Построить параллелограмм
Чтобы сложить векторы, нужно построить треугольник.
Чтобы сложить векторы, нужно построить параллелограмм.
Скаляр – это число. У скаляра нет направления.
Число может быть больше нуля, меньше нуля, равно нулю.

положительное число, — скаляр положительный,
отрицательное число, — скаляр отрицательный,
число равно нулю, — скаляр равен нулю.

Положительное число больше нуля.
Положительное число больше, чем нуль.
Отрицательное число меньше нуля.
Отрицательное число меньше, чем нуль.

Модуль вектора – это длина отрезка прямой линии.
Модуль вектора может быть больше нуля или равен нулю.

Упражнение 2. *Прочитайте текст и ответьте на вопросы.*

ТЕКСТ

Сложить векторы можно по правилу треугольника или параллелограмма. Это векторное сложение (сложение геометрически).

Правило треугольника: чтобы сложить вектор $\vec{a}$ и вектор $\vec{b}$, нужно расположить их так, чтобы начало вектора $\vec{b}$ и конец вектора $\vec{a}$ совпадали. Вектор $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$ соединяет начало вектора $\vec{a}$ и конец вектора $\vec{b}$.

Правило параллелограмма: расположим векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$ так, чтобы их начало было в одной точке. На векторах $\vec{a}$ и $\vec{b}$ строим параллелограмм. Диагональ параллелограмма – это вектор $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$.

Модуль $c = \sqrt{a^2 + b^2 + 2ab\cos\alpha}$, где
a – модуль вектора $\vec{a}$,
b – модуль вектора $\vec{b}$,
α – угол между векторами.

Вопросы.

1. Какие величины называют векторными?
2. Какие алгебраические операции можно производить с векторными величинами?
3. Сформулируйте правило треугольника и параллелограмма для сложения двух векторов. Сделайте пояснительные рисунки.

Упражнение 3. *Постройте векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$ в тетради. Постройте сумму векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$. Найдите модуль вектора $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$.*

1. Сложите векторы по правилу треугольника

$a = 4$	$a = 3$	$a = 2$
$b = 3$	$b = 5$	$b = 2$
$\alpha = 90°$	$\alpha = 30°$	$\alpha = 120°$
$a = 4$	$a = 4$	$a = 2$
$b = 8$	$b = 8$	$b = 6$
$\alpha = 180°$	$\alpha = 45°$	$\alpha = 60°$
$a = 4$	$a = 2$	$a = 3$
$b = 10$	$b = 4$	$b = 5$
$\alpha = 0°$	$\alpha = 90°$	$\alpha = 120°$

2. Сложите векторы по правилу параллелограмма.

$a = 4$	$a = 3$	$a = 2$
$b = 3$	$b = 5$	$b = 2$
$\alpha = 90°$	$\alpha = 30°$	$\alpha = 120°$
$a = 4$	$a = 4$	$a = 2$
$b = 8$	$b = 8$	$b = 6$
$\alpha = 180°$	$\alpha = 45°$	$\alpha = 60°$
$a = 4$	$a = 2$	$a = 3$
$b = 10$	$b = 4$	$b = 5$
$\alpha = 0°$	$\alpha = 90°$	$\alpha = 120°$

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. **Векторы** можно **складывать, вычитать, умножать.** Делить вектор на вектор нельзя. Операции деления вектора на вектор не существует.
2. **Векторы** можно **спроектировать** (**найти проекцию**) на некоторое направление. **Векторы** можно **разложить на составляющие**.

3. Векторные величины можно складывать только векторно (геометрически).
4. **<u>Правило треугольника</u>:** чтобы сложить вектор $\vec{a}$ и вектор $\vec{b}$, нужно расположить их так, чтобы начало вектора $\vec{b}$ и конец вектора $\vec{a}$ совпадали. Вектор $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$ соединяет начало вектора $\vec{a}$ и конец вектора $\vec{b}$.
5. **<u>Правило параллелограмма</u>**: чтобы сложить вектор $\vec{a}$ и вектор $\vec{b}$, нужно расположить векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$ так, чтобы их начало было в одной точке. На векторах $\vec{a}$ и $\vec{b}$ строим параллелограмм. Диагональ параллелограмма – это вектор $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$.

6.4. <u>Вычитание векторов</u>

Новые слова и словосочетания

вычитание	вычитаемое
вычесть	уменьшаемое
равенство	разность
построение	

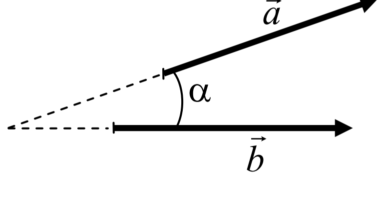
Даны два вектора $\vec{a}$ и $\vec{b}$ и угол между векторами α. Нужно найти вектор $\vec{c}$ равный разности $\vec{a}-\vec{b}$ или $\vec{c}=\vec{a}-\vec{b}$.

<u>Вычитание векторов можно выполнить по правилу треугольника или по правилу параллелограмма.</u>

<u>Вычитание векторов по правилу треугольника</u>

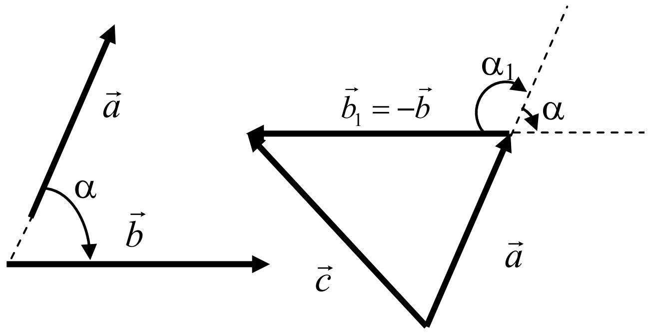
1. Правило треугольника: чтобы вычесть вектор $\vec{b}$ из вектора $\vec{a}$, нужно построить вектор $\vec{a}$ и вектор $\vec{b}$. Вычитание $\vec{c}=\vec{a}-\vec{b}$ можно заменить сложением $\vec{c}=\vec{a}+\left(-\vec{b}\right)$. Значит, **чтобы вычесть вектор $\vec{b}$ из вектора $\vec{a}$, нужно построить вектор $\vec{a}$ и вектор $-\vec{b}$, а затем сложить вектор $\vec{a}$ и вектор $-\vec{b}$ по правилу треугольника.**

Нужно найти разность векторов $\vec{c}=\vec{a}-\vec{b}$.

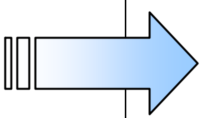


Вектор $-\vec{b}$ и вектор $\vec{b}$ – это противоположные векторы ($\left|\vec{b}\right| = \left|-\vec{b}\right|$ и $\vec{b} \downarrow\uparrow -\vec{b}$).

Вычитание по правилу треугольника



Вектор $\vec{c}$ – это разность векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ или $\vec{c} = \vec{a} - \vec{b} = \vec{a} + (-\vec{b}) = \vec{a} + \vec{b}_1$. Модуль вектора $\vec{c}$ можно найти: $c = \sqrt{a^2 + b_1^2 + 2ab_1 \cos\alpha_1}$, так как $\left|\vec{b}_1\right| = \left|-\vec{b}\right| = \left|\vec{b}\right|$ или $b_1 = b$, а $\cos\alpha_1 = \cos(180° - \alpha) = -\cos\alpha$, то $c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab\cos\alpha}$.



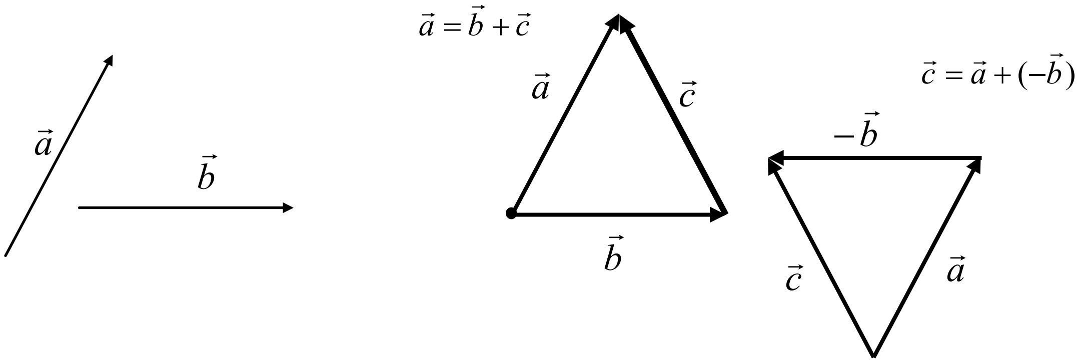
ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Вычесть вектор $\vec{b}$ из вектора $\vec{a}$ – значит сложить вектор $\vec{a}$ и вектор $-\vec{b}$.
Вычесть – значит найти разность.
Вычесть векторы можно только векторно.

2. Равенство $\vec{c} = \vec{a} - \vec{b}$ можно записать как $\vec{a} = \vec{b} + \vec{c}$. Следовательно, вычесть вектор $\vec{b}$ из вектора $\vec{a}$, значит найти вектор $\vec{c}$, который в сумме с вектором $\vec{b}$ равен $\vec{a}$. Сложить векторы $\vec{b}$ и $\vec{c}$ можно по правилу треугольника. Вектор $\vec{c}$ направлен от конца вектора $\vec{b}$ к концу вектора $\vec{a}$.

Рассмотрите внимательно рисунок

Правило треугольника



Значит, **чтобы найти разность векторов** $\vec{a}$ и $\vec{b}$, нужно:

- расположить векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$ так, чтобы их начало было в одной точке.
- соединить концы векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ вектором $\vec{c}$, который направлен от конца вектора $\vec{b}$ к концу вектора $\vec{a}$ (от <u>вычитаемого к уменьшаемому</u>).
- вектор $\vec{c}$ равен разности векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ ($\vec{c} = \vec{a} - \vec{b}$) или $\vec{a} = \vec{b} + \vec{c}$.

$$\vec{c} = \vec{a} - \vec{b}$$

Вычитаемое

Разность

Уменьшаемое

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Вычесть векторы можно по правилу треугольника.
Выражение $\vec{c} = \vec{a} - \vec{b}$ можно записать так $\vec{a} = \vec{b} + \vec{c}$.
Соединить концы векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ вектором $\vec{c}$.
Вектор $\vec{c}$ направлен от вычитаемого к уменьшаемому.

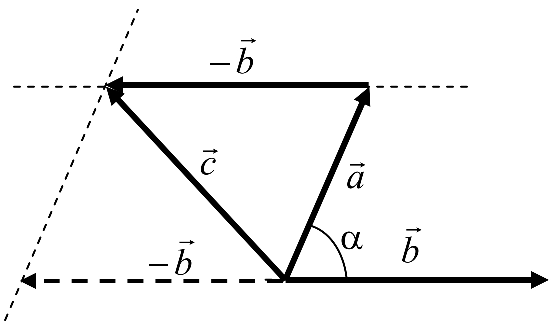
<u>Вычитание векторов по правилу параллелограмма</u>

<u>Правило параллелограмма</u>: чтобы вычесть вектор $\vec{b}$ из вектора $\vec{a}$, нужно сложить вектор $\vec{a}$ и вектор $-\vec{b}$. Векторы $\vec{a}$ и $-\vec{b}$ нужно расположить так, чтобы их начало было в одной точке. На векторах $\vec{a}$ и

$-\vec{b}$ строим параллелограмм. Диагональ параллелограмма – это вектор $\vec{c} = \vec{a} - \vec{b}$.

Чтобы сложить векторы $\vec{a}$ и $-\vec{b}$, можно построить параллелограмм.

Вычитание по правилу параллелограмма



ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Расположить векторы $\vec{a}$ и $-\vec{b}$ так, чтобы их начало было в одной точке.

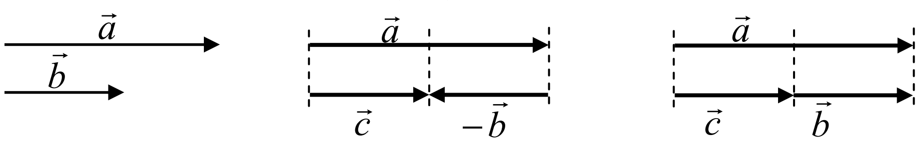
Рассмотрим примеры вычитания векторов.

Даны два вектора $\vec{a}$ и $\vec{b}$. Нужно из вектора $\vec{a}$ вычесть вектор $\vec{b}$ и найти равность – вектор $\vec{c}$ и модуль вектора $\vec{c}$.

Рассмотрим рисунки.

1. Направления векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ совпадают $\left(\vec{a} \uparrow\uparrow \vec{b}\right)$.

$\left(\vec{a} \uparrow\uparrow \vec{b}\right)$ | $\vec{a} - \vec{b} = \vec{c}$ или $\vec{a} + \left(-\vec{b}\right) = \vec{c}$ | $\vec{a} - \vec{b} = \vec{c}$ или $\vec{a} = \vec{b} + \vec{c}$



По правилу треугольника

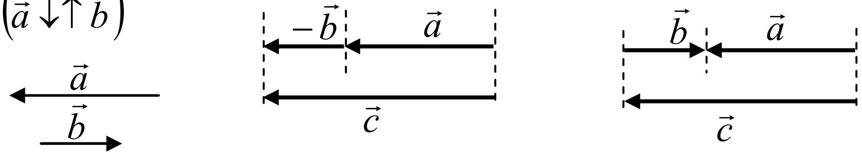
Направления векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ совпадают, поэтому угол между векторами $\vec{a}$ и $\vec{b}$ равен $\alpha = 0°$, тогда $\cos\alpha = \cos 0° = 1$ и модуль вектора $\vec{c}$ равен

$$c=\sqrt{a^2+b^2-2ab\cos\alpha}=|a-b|$$

$$c=|a-b|$$

2. Направления векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ противоположные $\left(\vec{a}\downarrow\uparrow\vec{b}\right)$.

$\left(\vec{a}\downarrow\uparrow\vec{b}\right)$ $\qquad \vec{a}-\vec{b}=\vec{c}$ $\qquad \vec{a}=\vec{b}+\vec{c}$



$\vec{a}+\left(-\vec{b}\right)=\vec{c}$

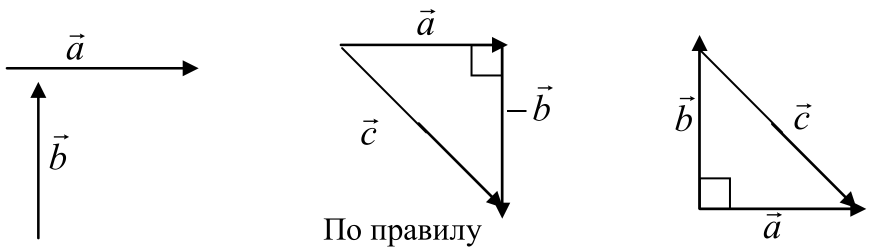
по правилу треугольника

Направление векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ противоположное $\left(\vec{a}\downarrow\uparrow\vec{b}\right)$, поэтому угол между векторами $\vec{a}$ и $\vec{b}$ равен $\alpha=\pi=180°$, тогда $\cos\alpha=\cos 180°=-1$

Модуль вектора $c=\sqrt{a^2+b^2-2ab\cos\alpha}=a+b$

3. Направления векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ перпендикулярные ($\vec{a}\perp\vec{b}$).

$\left(\vec{a}\perp\vec{b}\right)$ $\qquad \vec{a}-\vec{b}=\vec{c}$, $\vec{a}+\left(-\vec{b}\right)=\vec{c}$ $\qquad \vec{a}-\vec{b}=\vec{c}$, $\vec{a}=\vec{b}+\vec{c}$

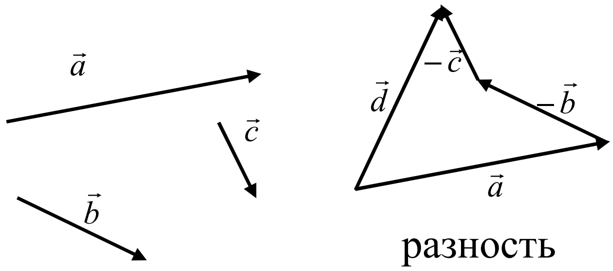


По правилу треугольника

Направления векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ перпендикулярные ($\vec{a}\perp\vec{b}$), поэтому угол между векторами равен $\alpha=90°$, тогда $\cos\alpha=\cos 90°=0$.

Модуль вектора $c=\sqrt{a^2+\left(-b^2\right)}=\sqrt{a^2+b^2}$ или $c^2=a^2+b^2$.

4. Если нужно вычесть несколько векторов, $\vec{d}=\vec{a}-\vec{b}-\vec{c}$.



разность

$$\vec{d} = \vec{a} - \vec{b} - \vec{c}$$

ЗАПОМНИТЕ!

сложить = получить сумму
вычесть = получить разность

результат сложения – сумма
результат вычитания – разность

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Постройте векторы* $\vec{a}$ *и* $\vec{b}$. *Найдите разность* $\vec{a} - \vec{b} = \vec{c}$. *Найдите вектор* $\vec{c}$ *по правилу треугольника.*

$a = 4$ $b = 8$ $\alpha = 45°$	$a = 10$ $b = 4$ $\alpha = 45°$	$a = 4$ $b = 8$ $\alpha = 180°$	$a = 10$ $b = 4$ $\alpha = 60°$	$a = 6$ $b = 12$ $\alpha = 0°$	$a = 8$ $b = 3$ $\alpha = 90°$

Найдите модуль вектора $\vec{c}$ *по формуле* $c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab\cos\alpha}$.

Упражнение 2. *Постройте векторы* $\vec{a}$ *и* $\vec{b}$. *Найдите разность* $\vec{a} - \vec{b} = \vec{c}$. *Найдите вектор* $\vec{c}$ *по правилу параллелограмма.*

$a = 4$ $b = 4$ $\alpha = 90°$	$a = 2$ $b = 8$ $\alpha = 90°$	$a = 2$ $b = 10$ $\alpha = 0°$	$a = 10$ $b = 2$ $\alpha = 0°$	$a = 10$ $b = 2$ $\alpha = 30°$	$a = 8$ $b = 3$ $\alpha = 30°$

Найдите модуль вектора $\vec{c}$ *по формуле* $c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab\cos\alpha}$.

Упражнение 3. *Постройте векторы* $\vec{a}$ *и* $\vec{b}$. *Найдите разность* $\vec{b} - \vec{a} = \vec{c}$. *Найдите вектор* $\vec{c}$.

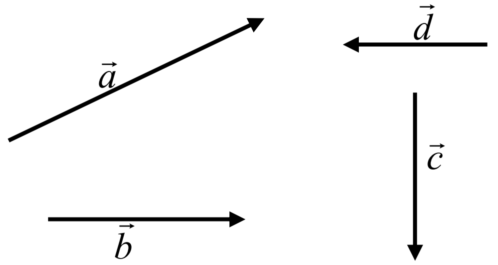
- Найдите разность векторов по правилу параллелограмма.

$a = 3$ $b = 6$ $\alpha = 60°$	$a = 6$ $b = 3$ $\alpha = 60°$	$a = 2$ $b = 5$ $\alpha = 120°$

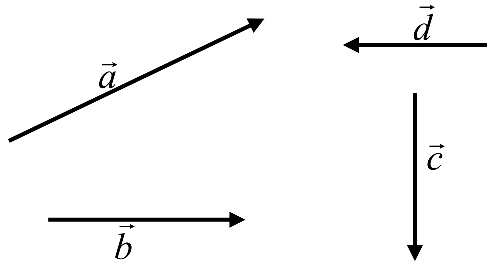
- Найдите разность векторов по правилу треугольника.

$a = 5$ $b = 2$ $\alpha = 120°$	$a = 10$ $b = 2$ $\alpha = 180°$	$a = 10$ $b = 2$ $\alpha = 45°$

Упражнение 4. *Найдите сумму векторов* $\vec{a} + \vec{b} + \vec{c} + \vec{d} = \vec{f}$.



Упражнение 5. *Найдите разность векторов* $\vec{a} - \vec{b} - \vec{c} - \vec{d} = \vec{k}$.



ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. <u>Вычитание векторов можно выполнить по правилу треугольника или по правилу параллелограмма.</u>
2. **Правило треугольника:** чтобы вычесть вектор $\vec{b}$ из вектора $\vec{a}$, нужно построить вектор $\vec{a}$ и вектор $-\vec{b}$, а затем сложить вектор $\vec{a}$ и вектор $-\vec{b}$ по правилу треугольника.
3. Вычесть вектор $\vec{b}$ из вектора $\vec{a}$, значит найти вектор $\vec{c}$, который в сумме с вектором $\vec{b}$ равен $\vec{a}$. Сложить векторы $\vec{b}$ и $\vec{c}$ можно по правилу треугольника. Вектор $\vec{c}$ направлен от конца вектора $\vec{b}$ к концу вектора $\vec{a}$.
4. Чтобы найти **разность векторов** $\vec{a}$ и $\vec{b}$, нужно:
   - расположить векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$ так, чтобы их начало было в одной точке.
   - соединить концы векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ вектором $\vec{c}$, который направлен от конца вектора $\vec{b}$ к концу вектора $\vec{a}$ (от <u>вычитаемого к уменьшаемому</u>).
   - вектор $\vec{c}$ равен разности векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ ($\vec{c}=\vec{a}-\vec{b}$) или $\vec{a}=\vec{b}+\vec{c}$.

5. <u>**Правило параллелограмма**</u>: чтобы вычесть вектор $\vec{b}$ из вектора $\vec{a}$, нужно сложить вектор $\vec{a}$ и вектор $-\vec{b}$. Векторы $\vec{a}$ и $-\vec{b}$ нужно расположить так, чтобы их начало было в одной точке. На векторах $\vec{a}$ и $-\vec{b}$ строим параллелограмм. Диагональ параллелограмма – это вектор $\vec{c} = \vec{a} - \vec{b}$.
6. Модуль вектора $\vec{c}$ можно найти по формуле $c=\sqrt{a^2+b^2-2ab\cos\alpha}$, где a и b – модули вычитаемых векторов, α – угол между векторами.

6.5. **Система координат**

Новые слова и словосочетания

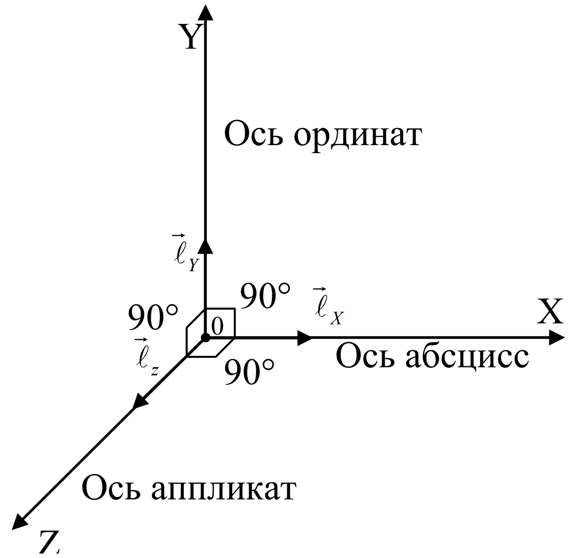
координата	пространственная система
система координат	плоская система
ось (оси)	прямоугольная система
абсцисс	одномерная система
ординат	двумерная система
аппликат	трехмерная система
базис (базисный)	декартовая система

Система координат (на плоскости или в пространстве) **состоит из точки 0 – начала координат, осей координат и базисных (единичных) векторов.** Базисные (единичные) вектора ($\vec{\ell}_x, \vec{\ell}_y, \vec{\ell}_z$) начинаются в точке 0 и указывают направление осей координат. Оси координат проходят через точку 0 в направлении базисных векторов. **Оси координат имеют масштаб длины.**

Единичный вектор определяет масштаб оси и положительное направление оси. На рисунках чаще всего единичные векторы не указываются.

Если оси координат взаимно перпендикулярны, то такая система координат называется **прямоугольной (декартовой).** Оси координат OX, OY и OZ перпендикулярны друг другу.

Рассмотрим рисунок.



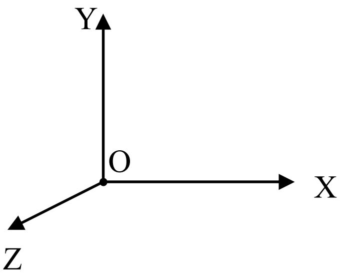
Это система координат *XOYZ*. Она имеет три оси *OX*, *OY*, *OZ* – оси координат. Ось *OX* – ось абсцисс, ось *OY*– ось ординат, ось *OZ*– ось аппликат.

Оси перпендикулярны друг другу ($OX \perp OY \perp OZ$).

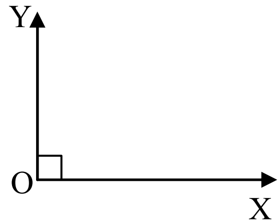
Угол между осью *OX* и осью *OY* равен 90° (девяноста градусам).

Угол 90° – это прямой угол.

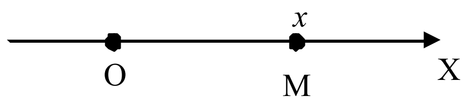
Система *XOYZ* – прямоугольная система координат (декартовая система координат). Точка 0 – это начало координат.



Это пространственная прямоугольная система координат XOYZ. Это трехмерная система координат.



Это плоская система координат. Это прямоугольная система координат XOY. Это <u>двумерная</u> система координат.



Одномерная система координат

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Одномерная система координат
Двумерная система координат
Трехмерная система координат

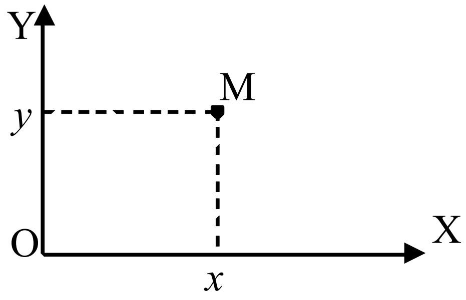
<u>Положение точки на оси координат называется ее координатой.</u>

1. <u>Одномерная система координат определяет положение точки *M* на прямой линии (на оси).</u> Положение точки на оси определяется чис-

лом x (**одним числом**). Можно записать так: M (x) – точка M имеет координату x по оси OX или x – координата точки M по оси OX.

2. Плоская система координат определяет положение точки M на плоскости.

Чтобы определить координаты точки M, нужно из точки M опустить (провести) перпендикуляры к осям OX и OY.



x и y – это координаты точки M в системе координат XOY.

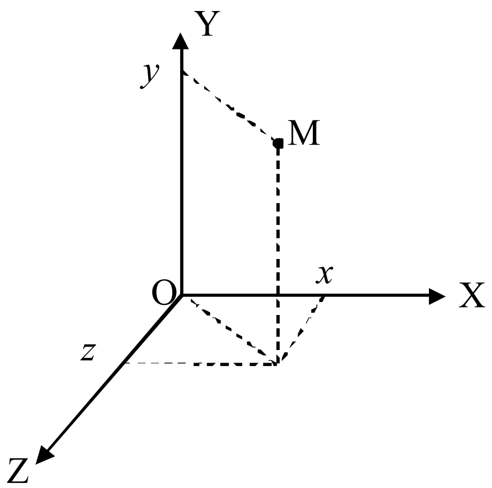
Можно записать так M (x, y).

x – координата точки M по оси OX,

y – координата точки M по оси OY.

Положение точки на плоскости определяется двумя координатами (**двумя числами**).

3. Пространственная система координат определяет положение точки M в пространстве.



Чтобы определить положение точки M в пространстве нужно из точки опустить (провести) перпендикуляры к осям OX, OY, OZ.

Можно записать так M (x, y ,z).

x, y, z – координаты точки M в пространственной прямоугольной системе координат.

Положение точки в пространственной системе координат определяется тремя координатами (**тремя числами**).

ЗАПОМНИТЕ!

Один – одной Два – двумя Три – тремя

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

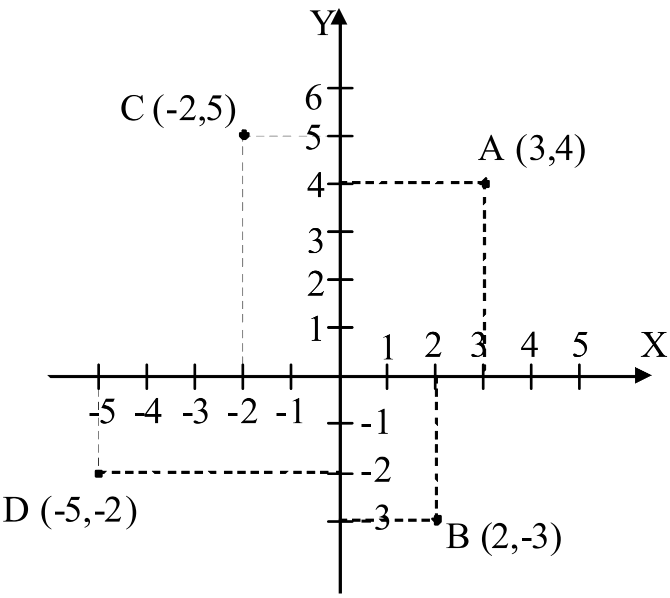
В одномерной системе координат положение точки M определяется одной координатой (x) – одним числом.
В плоской системе координат положение точки M определяется двумя координатами (x, y) – двумя числами.
В пространственной системе координат положение точки M определяется тремя координатами (x, y, z) – тремя числами.

Пример.

Рассмотрите рисунок.

На рисунке прямоугольная плоская (двумерная) система координат XOY.

Координата точки A: $x = 3$, $y = 4$, можно записать $A(3,4)$. Чему равны координаты точек B, C, $Д$?

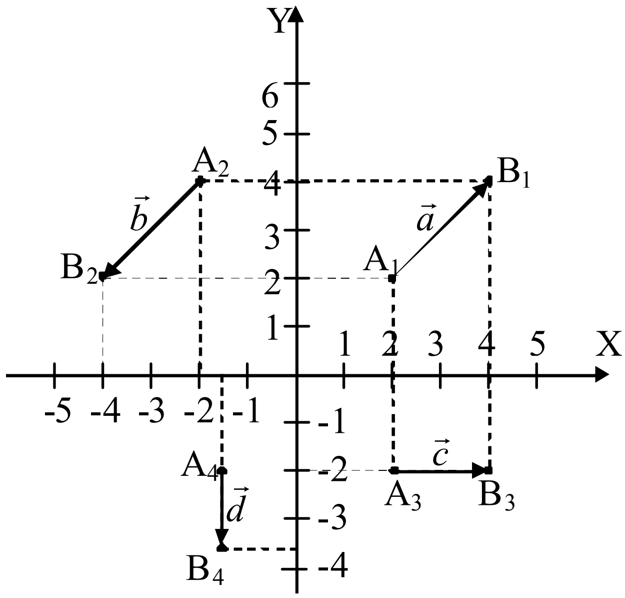


Вектор $\vec{a}$ в плоской системе координат определяется положением точки A (начало вектора $\vec{a}$) и точки B (конец вектора $\vec{a}$).

Пример.

На рисунке изображены векторы $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}, \vec{d}$. Определим координаты начала и конца каждого вектора.

Вектор $\vec{a}$: A_1 (2, 2) B_1 (4, 4)
Вектор $\vec{b}$: A_2 (–2, 4) B_2 (–4, 2)
Вектор $\vec{c}$: A_3 (2, –2) B_3 (4, –2)
Вектор $\vec{d}$: A_4 (–1,5, –2)
B_4 (–1,5, –3,5)



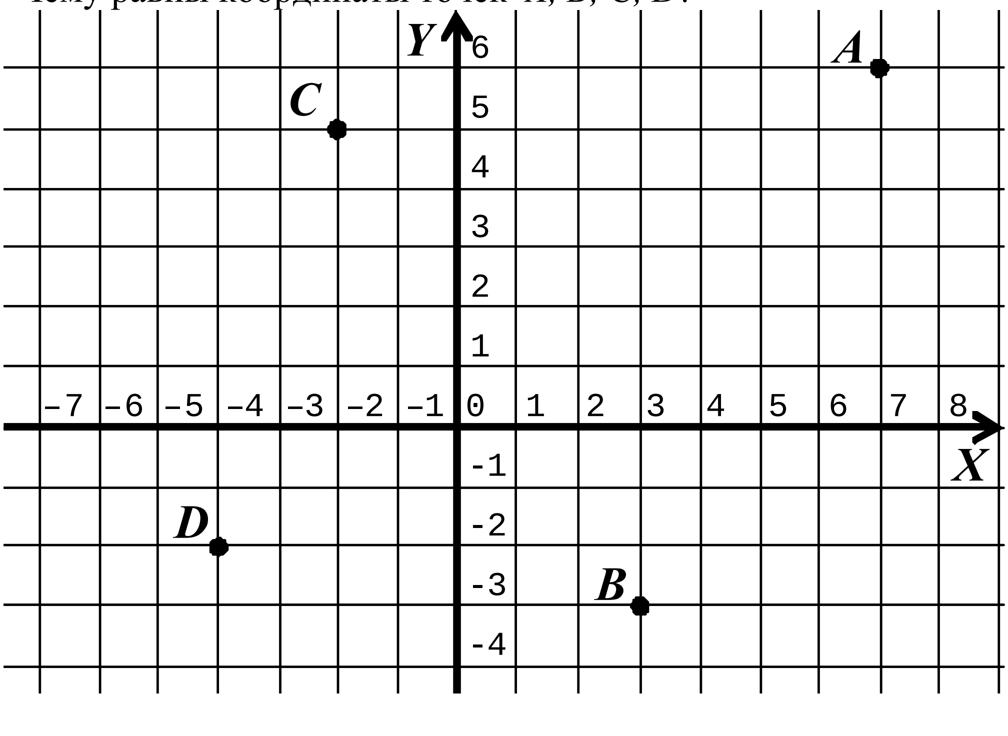
УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Читаем, слушаем, повторяем.*

1) Система координат Ось координат Ось OX Ось OY Ось OZ	2) Ось абсцисс или OX Ось ординат или OY Ось аппликат или OZ Угол между осями $\frac{\pi}{2}$ Координата точки по оси OX Координаты точки по оси OY
3) Одномерная система координат Двумерная система координат Трехмерная система координат	4) Положение точки на плоскости определяется двумя координатами Положение точки в пространстве определяется тремя координатами Положение точки на прямой определяется одной координатой.

Упражнение 2. *Рассмотрите рисунок и ответьте на вопрос.*

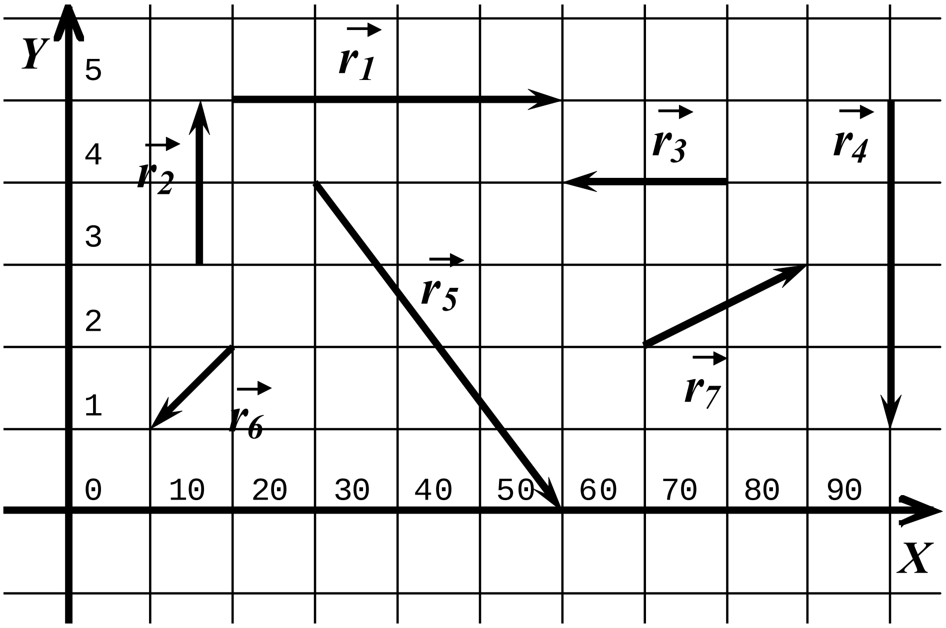
Чему равны координаты точек *A, B, C, D?*



Упражнение 3. *В плоской прямоугольной системе координат постройте точки:*

$A\,(-3,\ 5)$, $B\,(2,\ 1)$, $A_2\,(4,\ -1)$, $B_2(1,\ 3)$, $A_3\,(0,\ -2)$, $B_3\,(0,\ 2)$

Упражнение 4. *На рисунке изображены векторы. Найдите координаты начала и конца каждого вектора.*



Упражнение 5. *Постройте векторы, если известны координаты начала и конца вектора.*

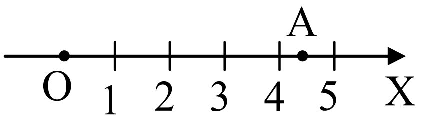
Вектор	Координаты начала вектора		Координаты конца вектора	
	x	y	x	y
$\vec{a}$	8	10	–2	5
$\vec{b}$	–2	6	6	–2
$\vec{c}$	5	–8	4	1
$\vec{d}$	1	–4	–3	0
$\vec{r}$	–3	–5	0	–5
$\vec{l}$	–10	0	1	8

Упражнение 6. *Сделайте подписи к рисункам.*

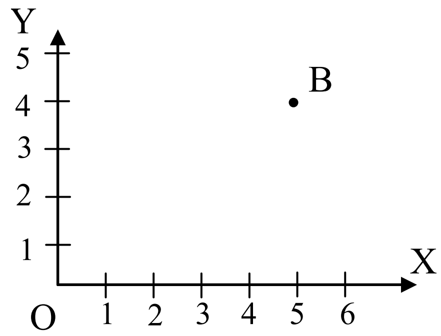
Какая это система координат?
Чему равны координаты точек, изображенных на рисунках?

<table>
<tr>
<td>Это……………………

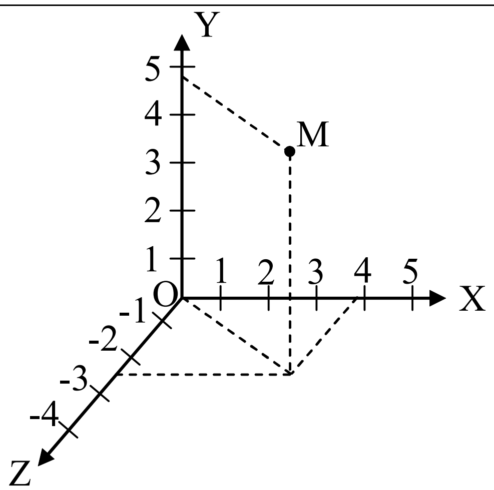
Координата точки А равна …….


</td>
<td>Это……………………

Координаты точки В равны:……


</td>
</tr>
<tr>
<td colspan="2">Это …………………

Координаты точки М равны:……


</td>
</tr>
</table>

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. **<u>Система координат</u>** (на плоскости или в пространстве) состоит из <u>точки 0 – начала координат, осей координат и базисных (единичных) векторов</u>**.**
2. Базисные (единичные) вектора ($\vec{\ell}_x, \vec{\ell}_y, \vec{\ell}_z$) начинаются в точке 0 и указывают направление осей координат.
3. **Оси координат имеют <u>масштаб длины.</u>**
4. Единичный вектор определяет масштаб оси и положительное направление оси.
5. Если оси координат взаимно перпендикулярны, то такая система координат называется **<u>прямоугольной (декартовой)</u>.**

6. Положение точки на оси координат называется ее координатой.
7. В одномерной системе координат положение точки M определяется одной координатой (x) – одним числом.
   В плоской системе координат положение точки M определяется двумя координатами (x, y) – двумя числами.
   В пространственной системе координат положение точки M определяется тремя координатами (x, y, z) – тремя числами.
8. Вектор $\vec{a}$ в плоской системе координат определяется положением точки A (начало вектора $\vec{a}$) и точки B (конец вектора $\vec{a}$).

6.6. Разложение вектора на составляющие

Новые слова и словосочетания

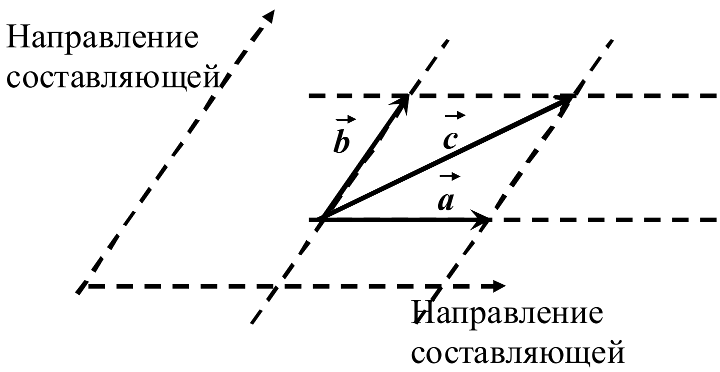
разложение, разложить
составляющие
раскладывать
компонента
представление
ось координат
условие задачи
решение задачи
представить

Любой вектор можно представить суммой двух или нескольких векторов. Например, вектор $\vec{c}$ можно представить как сумму векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$. Это действие называется ***разложением вектора на составляющие*** (представление вектора в виде суммы других векторов). **Векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$ – это составляющие вектора $\vec{c}$.**

Векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$ – это **компоненты** вектора $\vec{c}$.

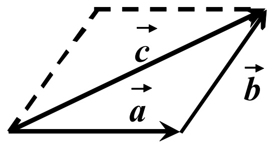
Разложить вектор на составляющие, лежащие в одной плоскости, можно, если известно:

1) **известны направления составляющих**.
На рисунке изображен вектор $\vec{c}$, который нужно разложить, и направления составляющих (векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$). Проводим через концы вектора $\vec{c}$ прямые па-



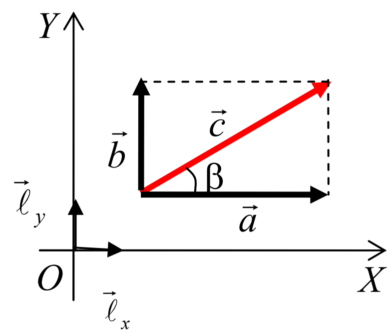
раллельные составляющим (векторам $\vec{a}$ и $\vec{b}$). По правилу треугольника (или по правилу параллелограмма) находим составляющие вектора $\vec{c}$ – это вектора $\vec{a}$ и $\vec{b}$. Из рисунка видно, что вектор $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$.

2) **известна одна из составляющих вектора**. На рисунке изображен вектор $\vec{c}$, который нужно разложить, и известна одна из составляющих, например, вектор $\vec{a}$. По правилу параллелограмма $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$. Соединяем концы векторов $\vec{c}$ и $\vec{a}$. Полученный вектор и есть вектор $\vec{b}$.



Вектор можно разложить по осям координат OX и OY.

На рисунке изображен вектор $\vec{c}$, который нужно разложить и плоская система координат XOY. Оси координат OX и OY определяют направление составляющих вектора $\vec{c}$.



Чтобы разложить вектор $\vec{c}$ на составляющие по осям координат, нужно через начало и конец вектора $\vec{c}$ построить линии, параллельные оси OX и оси OY. Построим векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$. Вектор $\vec{a}$ – это составляющая вектора $\vec{c}$ по оси OX. Вектор $\vec{b}$ – это составляющая вектора $\vec{c}$ по оси OY. $\vec{\ell}_x, \vec{\ell}_y$ – орты (единичные векторы) координатных осей OX и OY. Направление составляющих (векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$) определяется направлением ортов $\vec{\ell}_x, \vec{\ell}_y$ координатных осей. Из рисунка видно, что $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$, а модуль вектора $\vec{c}$ можно найти по формуле: $c = \sqrt{a^2 + b^2 + 2ab\cos\alpha}$, где α – угол между векторами $\vec{a}$ и $\vec{b}$. Так как $\vec{a}$ и $\vec{b}$ – это перпендикулярные векторы, то угол α между ними равен 90°, а cos (90°) = 0. Тогда $c = \sqrt{a^2 + b^2}$.

Составляющие (компоненты) вектора $\vec{c}$ – это векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$. Составляющие имеют направление и модуль. Направление составляющих (векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$) определяется направлением ортов $\vec{\ell}_x, \vec{\ell}_y$ координатных осей.

Если знаем модуль вектора $\vec{c}$ и угол β между вектором $\vec{c}$ и осью OX, то найдем модули векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$: $a = c \cos β$, $b = c \sin β$.

Вектор $\vec{a}$ равен $\vec{a} = a \cdot \vec{\ell}_x$, если направление вектора $\vec{a}$ и направление орта координатной оси $\vec{\ell}_x$ совпадают. И $\vec{a} = -a \cdot \vec{\ell}_x$, если направление вектора $\vec{a}$ и направление орта координатной оси $\vec{\ell}_x$ противоположны.

Вектор $\vec{b}$ равен $\vec{b} = b \cdot \vec{\ell}_y$, если направление вектора $\vec{b}$ и направление орта координатной оси $\vec{\ell}_y$ совпадают или $\vec{b} = -b \cdot \vec{\ell}_y$, если направление вектора $\vec{b}$ и направление орта координатной оси $\vec{\ell}_y$ противоположны.

Пример.

Дано: вектор $\vec{c}$ и система координат XOY. Модуль вектора $c = 5$. Угол между вектором $\vec{c}$ и осью OX $\alpha = 30°$. Разложить вектор на составляющие по осям координат и определить модули составляющих.

Дано

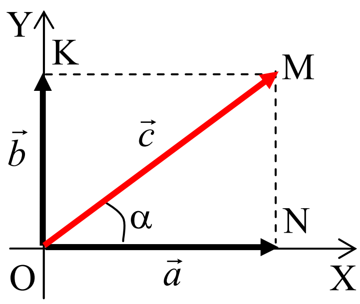
$c = 5$

$\alpha = 30°$

Найти:

составляющие вектора $\vec{c}$ по оси OX и по оси OY и их модули

Решение



Построим линии KM и MN, параллельные оси OX и оси OY. Построим векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$.

$a = c \cos \alpha = c \cos 30° = 4{,}2$

$b = c \sin \alpha = c \sin 30° = 2{,}5$

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

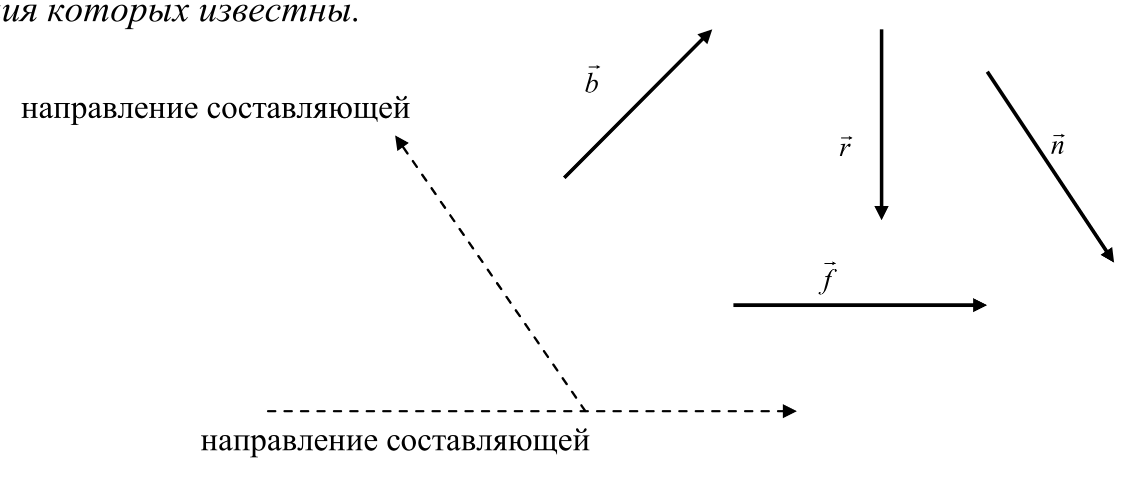
Разложить вектор на составляющие
Составляющая вектора по оси OX
Составляющая вектора по оси OY
Угол между вектором и осью OX
Направление составляющих определяется направлением ортов

УПРАЖНЕНИЯ

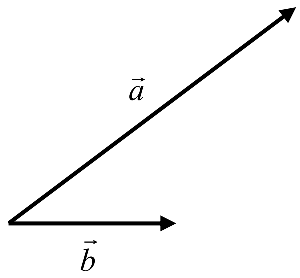
Упражнение 1. *Читаем, слушаем, повторяем.*

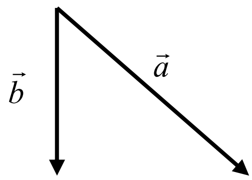
разложить вектор разложение вектора разложение вектора на составляющие по осям координат	составляющая вектора по оси OX составляющая вектора по оси OY разложить на составляющие по осям координат
по оси – по осям по оси OX по осям координат компонента вектора	составляющие вектора – это векторы сложить векторы – значит получить новый вектор разложить вектор – значит получить два вектора
вектор равен произведению модуля на орт орт – единичный вектор единичный вектор имеет направление	направление составляющих вектора положительное направление отрицательное направление ось имеет направление по орту положительное направление оси совпадает с направлением орта этой оси

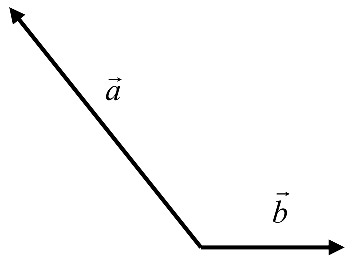
Упражнение 2. *Разложите векторы по составляющим, направления которых известны.*



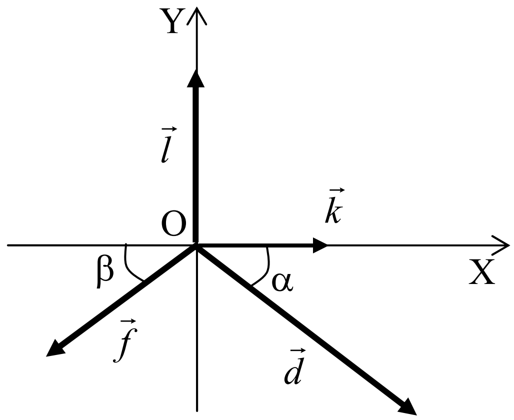
Упражнение 3. *Разложите векторы $\vec{a}$ по составляющим, если известна одна из составляющих, вектор $\vec{b}$.*







<u>Упражнение 4.</u> *Разложите векторы* $\vec{d}$, $\vec{f}$, $\vec{k}$, $\vec{l}$ *на составляющие по осям координат. Найдите модули составляющих.*



1) $d = 8$, $\alpha = 45°$ 2) $k = 4$

3) $f = 6$, $\beta = 60°$ 4) $l = 5$

<u>Упражнение 5.</u> Даны координаты начала (точка A) и конца (точка B) векторов в системе координат XOY. *Постройте векторы. Разложите векторы на составляющие по осям координат и найдите модули составляющих.*

1)	A(1, 5)	B(7, 4)	2)	A(6, 2)	B(3, 3)
3)	A(4, –5)	B(7, –1)	4)	A(–6, –2)	B(–3, –4)

<u>Упражнение 6.</u> Дана система координат XOY, модуль вектора и угол α между вектором и осью OX. Найдите модули составляющих этого вектора по осям координат.

1) $a = 20$	$\alpha = 30°$	3) $a = 10$	$\alpha = 180°$	5) $a = 5$	$\alpha = 90°$
2) $a = 6$	$\alpha = 45°$	4) $a = 4$	$\alpha = 120°$	6) $a = 9$	$\alpha = 0°$

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

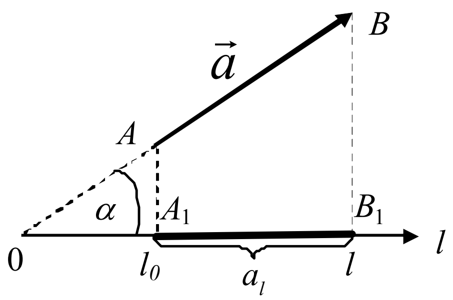
1. Любой вектор можно представить суммой двух или нескольких векторов. Это действие называется ***<u>разложением вектора на составляющие</u>*** (представление вектора в виде суммы других векторов).
2. **Разложить вектор $\vec{c}$ на составляющие**, лежащие в одной плоскости, можно, **если известны направления составляющих.** Проводим через концы вектора $\vec{c}$ прямые параллельные составляющим и по правилу треугольника (или по правилу параллелограмма) находим составляющие вектора $\vec{c}$ – это вектора $\vec{a}$ и $\vec{b}$.
3. **Разложить вектор $\vec{c}$ на составляющие**, лежащие в одной плоскости, можно, **если известна одна из составляющих, например, вектор $\vec{a}$**. По правилу параллелограмма $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$. Соединяем концы векторов $\vec{c}$ и $\vec{a}$. Полученный вектор и есть вектор $\vec{b}$.
4. **Разложить вектор $\vec{c}$ на составляющие**, лежащие в одной плоскости, можно по осям координат. Оси координат OX и OY определяют направление составляющих вектора $\vec{c}$. Чтобы разложить вектор $\vec{c}$ на составляющие по осям координат, нужно через начало и конец вектора $\vec{c}$ построить линии, параллельные оси OX и оси OY. Построим векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$. Направление составляющих вектора $\vec{c}$ (векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$) определяется направлением ортов $\vec{\ell}_x, \vec{\ell}_y$ координатных осей.
5. Если знаем модуль вектора $\vec{c}$ и угол β между вектором $\vec{c}$ и осью OX, то найдем модули векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$: $a = c \cos\beta$, $b = c \sin\beta$.

6.7. Проекция вектора

Новые слова и словосочетания

проекция	проекция на ось OY
проекции векторов	проекция на ось абсцисс
проектировать на оси	спроектировать на оси
найти проекции	

Рассмотрим некоторое направление в пространстве, которое определяется осью *l*. Угол между вектором $\vec{a}$ и осью l равен α. **Спроектировать вектор на ось, значит провести (опустить) перпендикуляры на ось из начала и конца вектора.** A_1 – проекция точки A (начало вектора) на ось *l;* B_1 – проекция точки B (конец вектора) на ось *l*.



Величина $a_l = a \cdot \cos\alpha$ **называется проекцией вектора** $\vec{a}$ **на ось** $\boldsymbol{l}$**.** Проекция обозначается той же буквой, что и вектор $\vec{a}$, с добавлением индекса, указывающего направление, на которое спроектирован вектор. **Проекция вектора скалярная величина (скаляр).**

Если угол α между вектором $\vec{a}$ и осью l острый, то $\cos\alpha > 0$ и проекция вектора положительная величина (**положительное число**).

Если угол α тупой, то $\cos\alpha < 0$ и проекция вектора отрицательная величина (**отрицательное число**).

Когда угол $\alpha = 90°$ (вектор $\vec{a}$ перпендикулярен к оси *l)* – проекция вектора равна **нулю**.

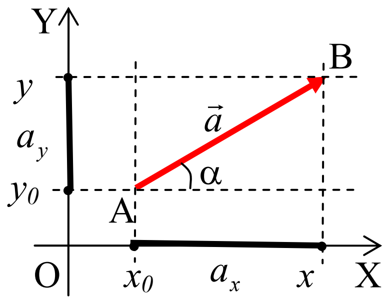
ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Проекция вектора на ось – это скаляр (число). Проекция может быть положительной, отрицательной или равной 0.

Величина $a_l = a \cdot \cos\alpha$ равна длине отрезка B_1A_1 (разности координат точек B_1 и A_1). Таким образом, $l - l_0 = a_l = a \cdot \cos\alpha$.

Проекция вектора равна разности координат проекций конца и начала вектора на ось (разность координат точек B_1 и A_1).

Проекция вектора на оси координат



Спроектируем вектор $\vec{a}$ на оси координат *OX* и *OY*.

Точка *A* – начало вектора.

Точка *B* – конец вектора.

Построим перпендикуляры из точки *A* и точки *B* на оси *OX* и *OY* (спроектируем вектор на оси координат).

(x_0, y_0) – координаты точки *A*.

(x, y) – координаты точки *B*.

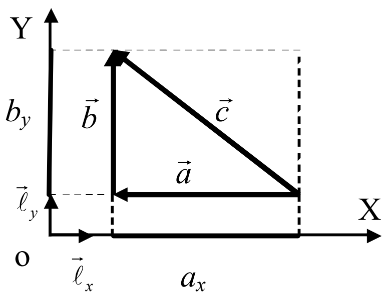
Проекцией вектора $\vec{a}$ на ось *OX* называется разность $x - x_0$ между координатами проекций конца и начала вектора на эту ось. Проекцию вектора $\vec{a}$ на ось *OX* обозначают a_x, $a_x = x - x_0$.

Если $x > x_0$, то $x - x_0 > 0$ значит проекция положительная величина, $a_x = x - x_0 > 0$ или $a_x = a \cos \alpha > 0$, следовательно, $\cos \alpha > 0$. Вектор $\vec{a}$ образует с осью *OX* острый угол, проекция вектора на ось *OX* **положительная величина**.

Проекцией вектора $\vec{a}$ на ось *OY* называется разность $y - y_0$ между координатами проекций конца и начала вектора на эту ось. Проекцию вектора $\vec{a}$ на ось *OY* обозначают a_y, $a_y = y - y_0$. На рисунке проекция вектора $\vec{a}$ на ось *OY* тоже положительная величина, так как $y > y_0$ или $a_y = a \cos (90° - \alpha) = a \sin \alpha$, где a – модуль вектора, α – угол между $\vec{a}$ и осью *OX*.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Проекция вектора равна разности координат проекций конца и начала вектора на ось



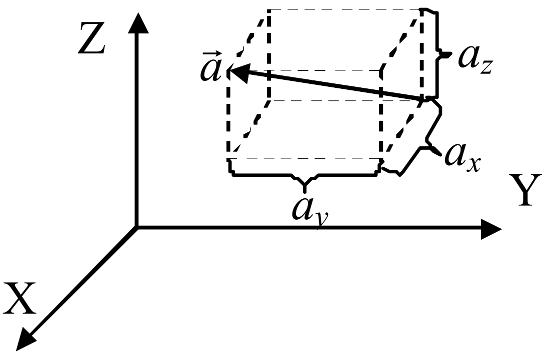
Выражение вектора через его проекции на оси координат

Возьмем декартовую систему координат и рассмотрим вектор $\vec{c}$, лежащий в плоскости *XOY*. Обозначим орты (единичные векторы) координатных осей

$\vec{\ell}_x, \vec{\ell}_y$. Из рисунка видно, что вектор $\vec{c}$ можно представить в виде: $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$.

Вектор $\vec{a}$ направлен против орта $\vec{\ell}_x$, поэтому $\vec{a} = -a \cdot \vec{\ell}_x$. Проекцию вектора $\vec{a}$ на ось OX можно определить $a_x = a \cdot \cos\pi = -a$, тогда $\vec{a} = a_x \cdot \vec{l}_x$.

Вектор $\vec{b}$ направлен по орту $\vec{\ell}_y$, поэтому $\vec{b} = b \cdot \vec{\ell}_y$. Проекцию вектора $\vec{b}$ на ось OY можно определить $b_y = b \cdot \cos 0^0 = b$, тогда $\vec{b} = b_y \cdot \vec{\ell}_y$. Тогда $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b} = a_x \cdot \vec{\ell}_x + b_y \cdot \vec{\ell}_y$.

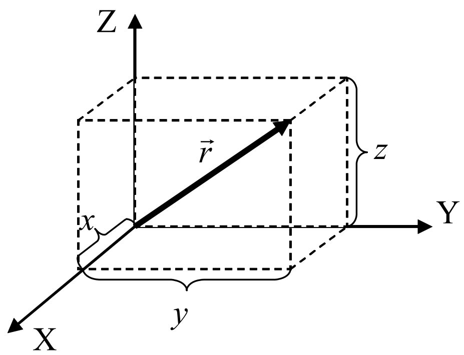


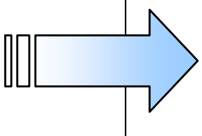
Модуль вектора $\vec{c}$ равен $c = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{a_x^2 + b_y^2}$.

В общем случае, когда вектор задан в пространстве, величины a_x, a_y, a_z равны сторонам параллелепипеда, большой диагональю которого является сам вектор $\vec{a}$.

Модуль вектора $\vec{a}$ **равен** $a^2 = a_x^2 + a_y^2 + a_z^2$.

Если вектор $\vec{r}$ проведен из начала координат, то его проекции на координатные оси равны декартовым координатам конца этого вектора: $r_x = x, \quad r_y = y, \quad r_z = z$. Следовательно, такой вектор можно представить в виде $\vec{r} = x \cdot \vec{\ell}_x + y \cdot \vec{\ell}_y + z \cdot \vec{\ell}_z$, а модуль этого вектора $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$.





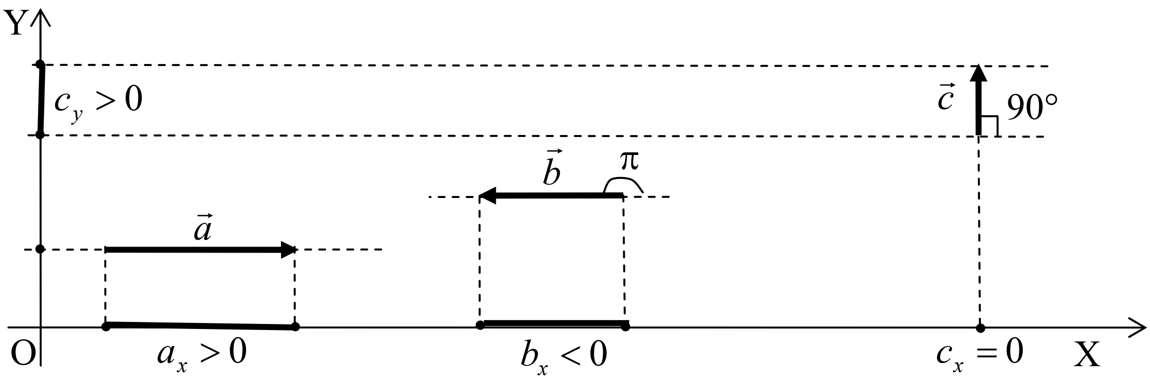
ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Чтобы найти проекции вектора $\vec{a}$ на оси координат, нужно построить (опустить) перпендикуляры из начала вектора и из конца вектора на оси координат OX и OY.

ЗАПОМНИТЕ

Проекция вектора на ось OX равна:
$a_x = a \cos \alpha$ или $a_x = x - x_0$;
Проекция вектора на ось OY равна:
$a_y = a \cos (90° - \alpha) = a \sin\alpha$ или $a_y = y - y_0$,
где α – угол между $\vec{a}$ и осью OX, x_0, y_0 – координаты начала вектора $\vec{a}$; x,y – координаты конца вектора $\vec{a}$.
Если известны проекции вектора $\vec{a}$ на оси координат OX и OY, то можно найти угол наклона вектора к оси OX:
$\cos\alpha = \dfrac{a_x}{a}$ или $tg\alpha = \dfrac{a_y}{a_x}$

Пример 1.



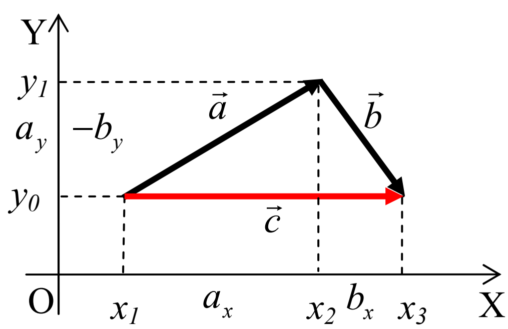
$a_x = a \cos \alpha > 0$ ($\cos 0° = 1$)
$b_x = b \cos \pi < 0$ ($\cos \pi = -1$)
$c_x = c \cos \pi/2 = 0$ ($\cos \pi/2 = 0$)

$a_y = a \sin \alpha = 0$ ($\sin 0° = 0$)
$b_y = b \sin \pi = 0$ ($\sin \pi = 0$)
$c_y = c \sin \pi/2$ ($\sin \pi/2 = 1$)

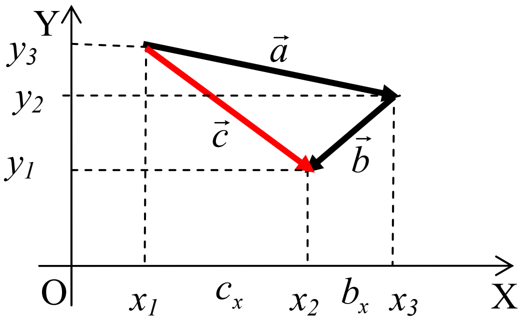
Проекция суммы векторов $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$ на ось равна алгебраической сумме проекций векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ на эту ось $c_x = a_x + b_x$.

Пример 2.

$c_x = a_x + b_x$
$a_x = x_2 - x_1$ $b_x = x_3 - x_2$
$c_x = a_x + b_x$
$c_x = (x_2 - x_1) + (x_3 - x_2) = x_3 - x_1$
$c_y = a_y + b_y$
$a_y = y_1 - y_0$ $b_y = y_0 - y_1$
$c_y = (y_1 - y_0) + (y_0 - y_1) = 0$



Пример 3.



$$c_x = a_x + b_x$$

$a_x = x_3 - x_1 \qquad b_x = x_2 - x_3$

$c_x = a_x + b_x$

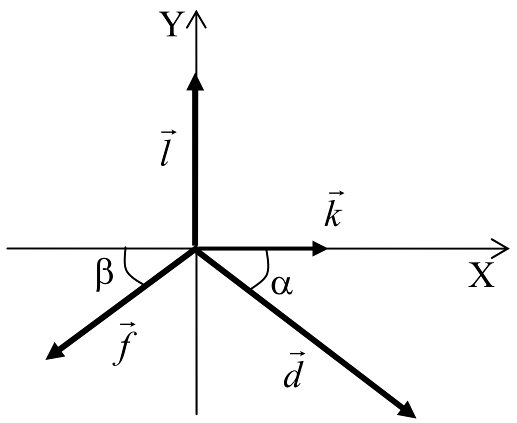
$c_x = (x_3 - x_1) + (x_2 - x_3) = x_2 - x_1$

$$c_y = a_y + b_y$$

$a_y = y_2 - y_3 \qquad b_y = y_1 - y_2$

$c_y = (y_2 - y_3) + (y_1 - y_2) = y_1 - y_3$

УПРАЖНЕНИЯ



Упражнение 1. *Найдите проекции векторов* $\vec{d}$, $\vec{f}$, $\vec{k}$, $\vec{l}$ *на оси координат.*

1) $d = 8$; $\alpha = 45°$ 2) $k = 4$

3) $f = 6$; $\beta = 60°$ 4) $l = 5$

Упражнение 2. *Постройте векторы. Найдите проекции векторов на оси координат XOY, если известны координаты начала (точка A) и конца (точка B) векторов.*

1) $A_1(1, 5)$, $B_1(7, 4)$ 2) $A_2(6, 2)$, $B_2(3, 3)$

3) $A_3(4, -5)$, $B_3(7, -1)$ 4) $A_4(-6, -2)$, $B_4(-3, -4)$

Упражнение 3. *Найдите проекции векторов на оси координат, если известен угол между вектором и осью OX.*

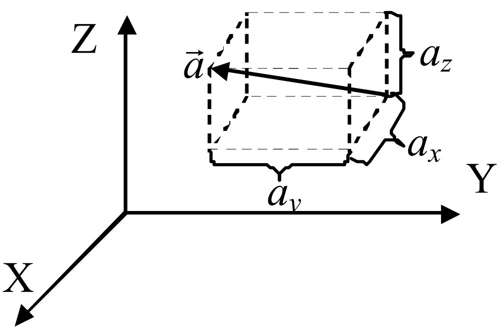
1) $a = 20$; $\alpha = 30°$; 3) $a = 10$; $\alpha = 180°$; 5) $a = 5$; $\alpha = 90°$;

2) $a = 6$ $\alpha = 45°$; 4) $a = 4$ $\alpha = 120°$; 6) $a = 9$; $\alpha = 0°$.

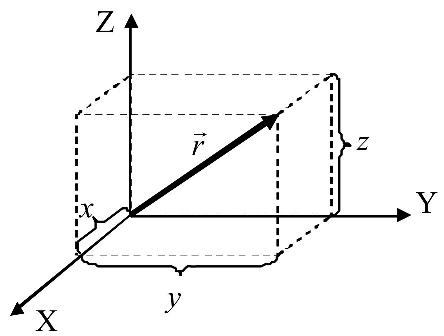
ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. Спроектировать вектор на ось, значит провести (опустить) перпендикуляры на ось из начала и конца вектора.
2. Величина $a_l = a \cdot \cos\alpha$ называется проекцией вектора $\vec{a}$ на ось l.
3. **Проекция вектора скалярная величина (скаляр).** Проекция может быть положительной, отрицательной или равной 0.
4. Проекция вектора равна разности координат проекций конца и начала вектора на ось (разность координат точек B_1 и A_1).
5. **Выражение вектора через его проекции на оси координат:** $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b} = a_x \cdot \vec{\ell}_x + b_y \cdot \vec{\ell}_y$
6. Модуль вектора $\vec{c}$ равен $c = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{a_x^2 + b_y^2}$.
7. В общем случае, когда вектор задан в пространстве, величины a_x, a_y, a_z равны сторонам параллелепипеда, большой диагональю которого является сам вектор $\vec{a}$. Модуль вектора $\vec{a}$ **равен** $a^2 = a_x^2 + a_y^2 + a_z^2$.



8. Если вектор $\vec{r}$ проведен из начала координат, то его проекции на координатные оси равны декартовым координатам конца этого вектора: $r_x = x, \quad r_y = y, \quad r_z = z$. Следовательно, такой вектор можно представить в виде $\vec{r} = x \cdot \vec{\ell}_x + y \cdot \vec{\ell}_y + z \cdot \vec{\ell}_z$ а модуль этого вектора $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$.

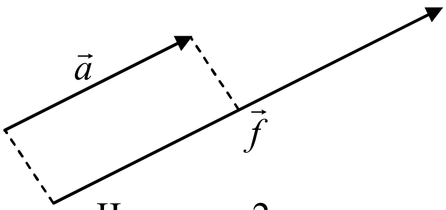


6.8. **Умножение векторов**

Новые слова и словосочетания

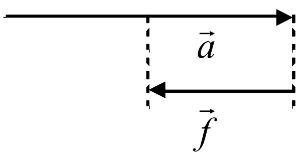
умножение	скалярное умножение векторов
умножить	векторное умножение векторов
умножить на скаляр	буравчик
умножить на вектор	правило векторного произведения
произведение	по правилу правого винта

Умножение вектора на скаляр (на число)



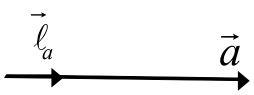
Число m=2
$\vec{f} = 2\vec{a}; \left|\vec{f}\right| = 2a$

В результате умножения вектора на скаляр m получится новый вектор $\vec{f} = m\vec{a}$, модуль которого в m раз больше, чем модуль вектора $\vec{a}$ ($f = |m|a$ или $\left|\vec{f}\right| = |m| \cdot |\vec{a}|$). Направление вектора $\vec{f}$ совпадает с вектором $\vec{a}$, если m>0, либо противоположно вектору $\vec{a}$, если m<0.



m=-0,5 $\vec{f} = -0{,}5 \cdot \vec{a}$;
$\left|\vec{f}\right| = |-0{,}5|a = 0{,}5a$

Значит, умножение вектора $\vec{a}$ на –1 изменяет направление вектора на противоположное. Следовательно, векторы $\vec{a}$ и $-\vec{a}$ имеют одинаковые модули, но противоположны по направлению, или $-\vec{a} = -1 \cdot \vec{a}$, модуль вектора $-\vec{a}$ равен a или $|-\vec{a}| = a$.



Из операции умножения вектора на скаляр следует, что любой вектор $\vec{a}$ можно представить в виде: $\vec{a} = a \cdot \vec{\ell}_a$, где a – модуль вектора $\vec{a}$, $\vec{\ell}_a$ – вектор с модулем, равным единице, но имеющий такое же направление, что и вектор $\vec{a}$.

Вектор $\vec{\ell}_a$ называется **<u>единичным вектором</u>** или **<u>ортом</u>** вектора $\vec{a}$.

Орт вектора можно представить в виде

$$\vec{\ell}_a = \frac{\vec{a}}{a}$$

Орт вектора $\vec{\ell}_a$ – <u>безразмерная</u> величина, равная единице.

Орты можно сопоставить не только с вектором, но и любым направлением в пространстве.

Например, $\vec{\ell}_x$ – это орт координатной оси OX. Орт оси OX направлен в положительном направлении оси OX.

$\vec{\ell}_x, \vec{\ell}_y, \vec{\ell}_z$ – орты координатных осей OX, OY и OZ.

> ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!
>
> Орты координатных осей OX, OY, OZ обозначают $\vec{\ell}_x, \vec{\ell}_y, \vec{\ell}_z$.
>
> $\vec{\ell}_x, \vec{\ell}_y, \vec{\ell}_z$ – единичные векторы (орты) совпадают с положительным направлением соответственно осей OX, OУ, OZ.

Умножение вектора на вектор

Два вектора $\vec{a}$ и $\vec{b}$ можно умножить друг на друга двумя способами: скалярно и векторно. В результате скалярного умножения (произведения) векторов получается скалярная величина. В результате векторного умножения (произведения) векторов получается новый вектор.

Скалярное умножение (произведение) векторов

Скалярным произведением векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ называется скаляр, равный произведению модулей этих векторов на косинус угла между ними: $c = (\vec{a}\vec{b}) = ab\cos\alpha$, где α – угол между векторами $\vec{a}$ и $\vec{b}$; a и b – модули векторов. *<u>Скалярное произведение это – скаляр (число), алгебраическая величина</u>*. Скалярное произведение векторов может быть больше нуля (> 0), если угол α острый. Если угол α тупой, то скалярное произведение меньше нуля (< 0). Если угол $\alpha = \frac{\pi}{2}$ (вектора $\vec{a} \perp \vec{b}$), то скалярное произведение равно 0.

Скалярное произведение векторов не зависит от порядка сомножителей: $c=\left(\vec{a}\,\vec{b}\right)=\left(\vec{b}\,\vec{a}\right)$.

Выражение $c=\left(\vec{a}\,\vec{b}\right)=a\,b\cos\alpha$ можно записать несколькими способами:

$$c=\left(\vec{a}\,\vec{b}\right)=a\,b\cos\alpha=\left(a\cos\alpha\right)\cdot b=a_b b=ab_a,$$

так как $a\cos\alpha=a_b$ – проекция вектора $\vec{a}$ на направление вектора $\vec{b}$. Аналогично $b\cos\alpha=b_a$ – проекция вектора $\vec{b}$ на направление вектора $\vec{a}$.

Поэтому скалярное произведение – это скаляр, равный произведению модуля <u>одного из векторов на проекцию другого вектора на направление первого.</u>

.

<u>Квадрат вектора</u> – это скалярное произведение вектора на самого себя:

$$\vec{a}^{\,2}=\left(\vec{a}\vec{a}\right)=aa\cos 0^0=a^2.$$

<u>Квадрат вектора равен квадрату его модуля.</u>

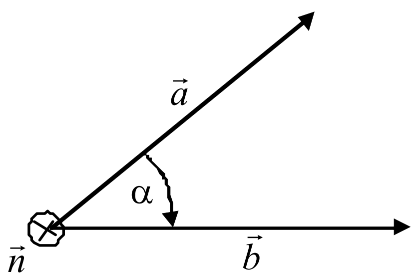
Квадрат любого орта равен единице.

$$\vec{\ell}_x^{\,2}=\vec{\ell}_y^{\,2}=\vec{\ell}_z^{\,2}=1$$

Скалярное произведение взаимно перпендикулярных ортов равно нулю.

$$\left(\vec{\ell}_x\vec{\ell}_y\right)=0$$
$$\left(\vec{\ell}_y\vec{\ell}_z\right)=0$$
$$\left(\vec{\ell}_x\vec{\ell}_z\right)=0$$

<u>Векторное умножение (произведение) векторов</u>



Векторным произведением векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ называется вектор $\vec{c}$, определяемый формулой

$$\vec{c}=[\vec{a}\vec{b}],\ \vec{c}=ab\sin\alpha\cdot\vec{n},$$

где a и b модули перемножаемых векторов, α – угол между векторами, $\vec{n}$ – единичный вектор нормали к плоскости, в которой лежат векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$.

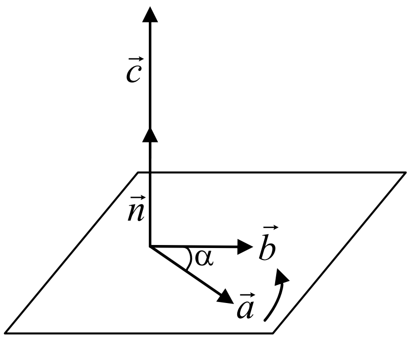
Направление $\vec{n}$ выбирается так, чтобы последовательность векторов $\vec{a}$, $\vec{b}$, $\vec{n}$ образовывала (составляла) **правовинтовую систему. Это означает, что если смотреть вдоль вектора $\vec{n}$, то поворот вектора $\vec{a}$ к вектору $\vec{b}$ происходит по часовой стрелке по кратчайшему пути.** На рисунке $\vec{n}$ направлен от нас и обозначен $\otimes\vec{n}$. **Направление вектора $\vec{c}$ совпадает с вектором $\vec{n}$.**

Направление вектора $\vec{c}$ можно определить по правилу векторного произведения или правилу буравчика (винта): если вращать буравчик (винт) от вектора $\vec{a}$ к вектору $\vec{b}$ по часовой стрелке, то поступательное движение буравчика (винта) совпадает с вектором $\vec{n}$ или с вектором $\vec{c}$.

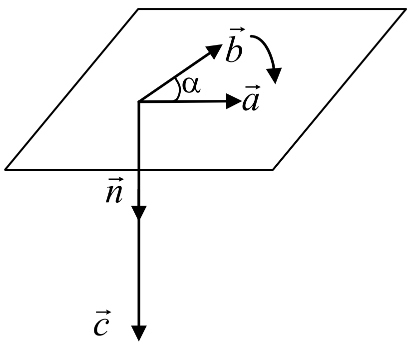
Результат векторного произведения зависит от порядка сомножителей

$$[\vec{b}\vec{a}] = -[\vec{a}\vec{b}].$$

Направление вектора $\vec{c}$ связано с вращением от первого вектора в произведении ко второму по часовой стрелке: $\vec{c} = [\vec{a}\vec{b}]$.



$\vec{c} = [\vec{a}\vec{b}]$



$\vec{c} = [\vec{b}\vec{a}]$

Модуль вектора $\vec{c}$ равен: $c = ab\sin\alpha$.

Векторное произведение вектора на самого себя равно 0, так как $\alpha = 0$.

$$[\vec{a}\vec{a}] = 0$$

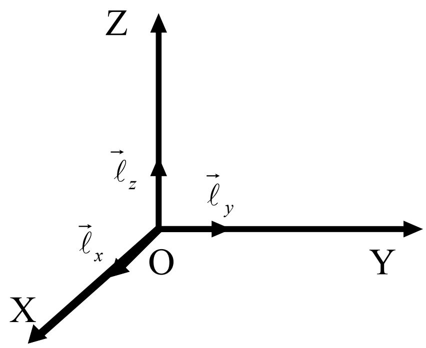
Векторное произведение ортов координатных осей в декартовой системе координат:

$$[\vec{\ell}_x\vec{\ell}_x] = [\vec{\ell}_y\vec{\ell}_y] = [\vec{\ell}_z\vec{\ell}_z] = 0$$

$$[\vec{\ell}_x\vec{\ell}_y] = \vec{\ell}_z; \qquad [\vec{\ell}_y\vec{\ell}_x] = -[\vec{\ell}_x\vec{\ell}_y] = -\vec{\ell}_z$$

$$[\vec{\ell}_y \vec{\ell}_z] = -[\vec{\ell}_z \vec{\ell}_y] = \vec{\ell}_x$$

$$[\vec{\ell}_z \vec{\ell}_x] = -[\vec{\ell}_x \vec{\ell}_z] = \vec{\ell}_y$$



УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Постройте векторы*, равные $m\vec{a}, m\vec{b}, m\vec{c}, m\vec{d}$, если известны векторы $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}, \vec{d}$.

	a = 3	*b = 5*	*c = 2*	*d = 6*
m	2	3	4	1
m	–1	–2	–3	–2

Упражнение 2. *Найдите скалярное произведение векторов*:

$a = 4$	$a = 3$	$a = 2$
$b = 3$	$b = 5$	$b = 2$
$\alpha = 90°$	$\alpha = 30°$	$\alpha = 120°$

Упражнение 3. *Найдите и постройте векторное произведение векторов* $\vec{c} = [\vec{a}\vec{b}]$. Найдите модуль вектора $\vec{c}$.

$a = 4$	$a = 3$	$a = 2$
$b = 3$	$b = 5$	$b = 2$
$\alpha = 90°$	$\alpha = 30°$	$\alpha = 120°$

Упражнение 4. *Найдите и постройте векторное произведение векторов* $\vec{c} = [\vec{b}\vec{a}]$. Найдите модуль вектора $\vec{c}$.

$a = 4$	$a = 3$	$a = 2$
$b = 3$	$b = 5$	$b = 2$
$\alpha = 90°$	$\alpha = 30°$	$\alpha = 120°$

Упражнение 5. *Ответьте на вопросы письменно.*

Вопросы.

1. Что такое вектор?
2. Что такое скаляр?
3. Какие действия с векторами Вы знаете?
4. Какие правила сложения векторов Вы знаете?
5. Результат сложения векторов – это вектор или скаляр?
6. Результат умножения вектора на число – это вектор или скаляр?
7. Результат скалярного умножения векторов – это вектор или скаляр?
8. Результат векторного умножения векторов – это вектор или скаляр?
9. Результат разложения вектора на составляющие – это векторы или скаляры?
10. Проекция вектора на ось координат – это вектор или скаляр?

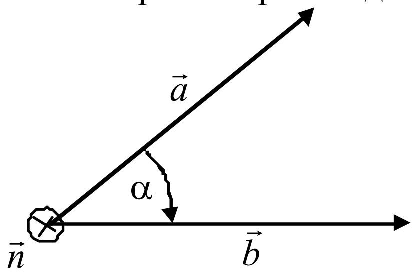
ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. В результате умножения вектора на скаляр m получится новый вектор $\vec{f} = m\vec{a}$, модуль которого в m раз больше, чем модуль вектора $\vec{a}$ ($f = |m|a$ или $|\vec{f}| = |m| \cdot |\vec{a}|$).
2. Скалярным произведением векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ называется скаляр, равный произведению модулей этих векторов на косинус угла между ними: $c = (\vec{a}\,\vec{b}) = ab\cos\alpha$, где α – угол между векторами $\vec{a}$ и $\vec{b}$; a и b – модули векторов.
3. Скалярное произведение – это скаляр, равный произведению модуля <u>одного из векторов на проекцию другого вектора на направление первого.</u>

4. <u>Квадрат вектора равен квадрату его модуля.</u>

5. Векторным произведением векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ называется вектор $\vec{c}$, определяемый формулой



$\vec{c} = [\vec{a}\vec{b}]$, $\vec{c} = ab\sin\alpha \cdot \vec{n}$, где a и b модули перемножаемых векторов, α – угол между векторами, $\vec{n}$ – единичный вектор нормали к плоскости, в которой лежат векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$. Модуль вектора $\vec{c}$ равен: $c = ab\sin\alpha$.

6. Правило векторного произведения: если смотреть вдоль вектора $\vec{n}$, то поворот вектора $\vec{a}$ к вектору $\vec{b}$ происходит по часовой стрелке по кратчайшему пути. Направление вектора $\vec{c}$ связано с вращением от первого вектора в произведении ко второму по часовой стрелке: $\vec{c} = [\vec{a}\vec{b}]$.

7. Правило векторного произведения или правило буравчика (винта): если вращать буравчик (винт) от вектора $\vec{a}$ к вектору $\vec{b}$ по часовой стрелке, то поступательное движение буравчика (винта) совпадает с вектором $\vec{n}$ или с вектором $\vec{c}$.

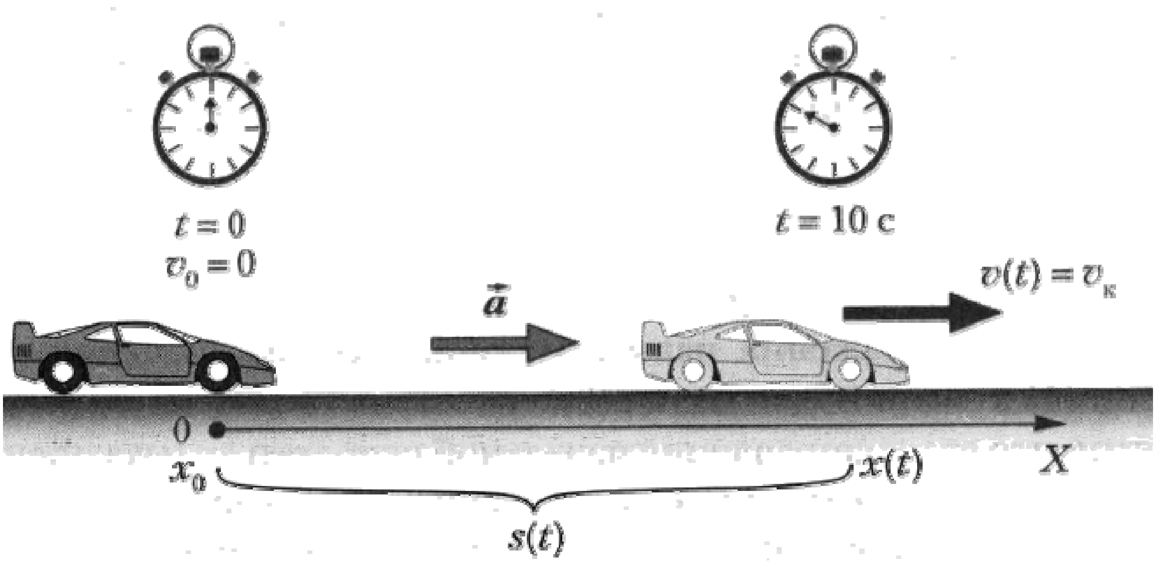
8. Векторное произведение вектора на самого себя равно 0, так как α = 0.

$$[\vec{a}\vec{a}] = 0$$

9. Результат векторного произведения зависит от порядка сомножителей

$$[\vec{b}\vec{a}] = -[\vec{a}\vec{b}].$$

Глава 2.
КИНЕМАТИКА



ТЕМА 1. **МЕХАНИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ**

1.1. **Кинематика – часть механики**

Новые слова и словосочетания

поступательный	вращательный
вращение	ось вращения
колебательный	изучать
периодический	

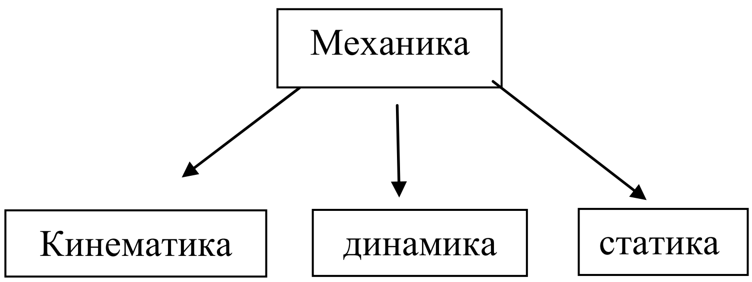
Физика – это наука о природе. Она изучает свойства материи и ее изменения. **Любое изменение материи – это движение.** Формы движения материи – механическая, химическая, биологическая и т.д.

Простейшей формой движения материи является механическое движение.

Механика изучает механическое движение. Механика – это часть физики, которая изучает законы механического движения.

Основная задача механики – определение положения тела в любой момент времени. Механика изучает: как движется тело, почему движется тело, почему тело не движется (находится в покое).

Механика состоит из трех частей:



Кинематика изучает виды механического движения: прямолинейное, криволинейное, колебательное, вращательное и отвечает на вопрос «как движется тело?».

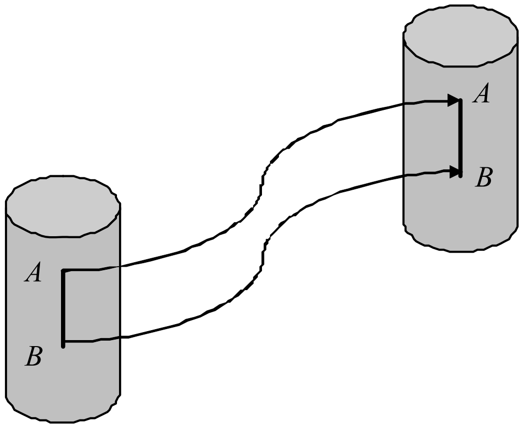
Динамика изучает причины движения тела и отвечает на вопрос «почему движется тело?».

Статика изучает причины покоя и отвечает на вопрос «почему тело не движется (находится в покое)?».

<u>Механическое движение</u> – <u>это изменение положения физического тела в пространстве относительно других тел с течением времени.</u>

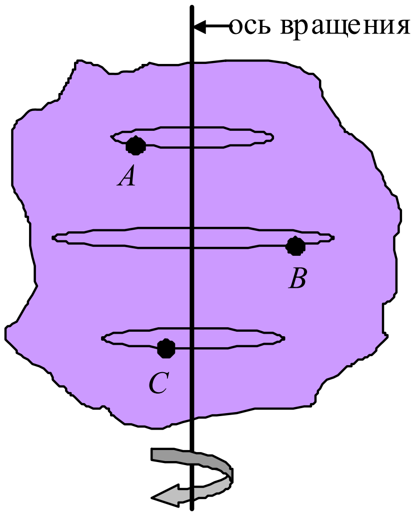
Простейшие виды механического движения – поступательное и вращательное.

<u>Поступательное движение</u> – это движение, при котором отрезок прямой, соединяющий любые две точки тела остается параллельным самому себе.



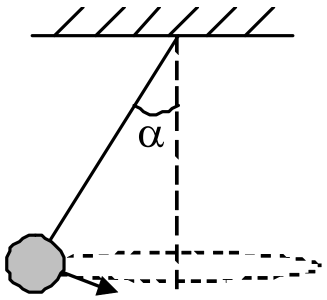
Самое важное свойство этого движения – то, что при поступательном движении все точки тела движутся <u>одинаково.</u> При поступательном движении у всех точек тела одинаковое изменение положения в пространстве. Поэтому при изучении поступательного движения можно рассматривать движение **одной точки** этого тела.

<u>Вращательное движение</u> – это движение, при котором все точки тела движутся по окружностям с центрами, лежащими на одной прямой – <u>оси вращения</u>.

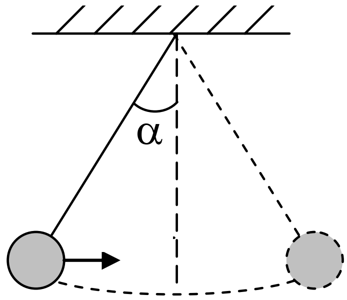


Ось вращения может находиться и вне тела. Разные точки тела движутся по разным окружностям. Движение каждой точки по окружности повторяется через один поворот тела вокруг оси вращения.

<u>Если движение тела повторяется через определенный промежуток времени, то такое движение называется периодическим.</u> Вращательное движение – **это периодическое** движение.



Это вращательное движение.



Это колебательное движение.

К периодическим движениям относится также колебательное движение.

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. Простейшей формой движения материи является механическое движение.
2. **Механика изучает механическое движение**. **Механическое движение** – это изменение положения физического тела в пространстве относительно других тел с течением времени.
3. Механика изучает: как движется тело, почему движется тело, почему тело не движется (находится в покое).
4. **Кинематика изучает виды механического движения:** прямолинейное, криволинейное, колебательное, вращательное и отвечает на вопрос «как движется тело?».
5. **Динамика изучает причины движения тела** и отвечает на вопрос «почему движется тело?».
6. **Статика изучает причины покоя** и отвечает на вопрос «почему тело не движется (находится в покое)?».
7. **Поступательное движение** – это движение, при котором отрезок прямой, соединяющий любые две точки тела остается параллельным самому себе.
8. Вращательное движение – это движение, при котором все точки тела движутся по окружностям с центрами, лежащими на одной прямой – оси вращения.

9. Если движение тела повторяется через определенный промежуток времени, то такое движение называется **периодическим.**

1.2. Относительность движения

Новые слова и словосочетания

отвечать на вопрос	причина движения
причина	определение
определить	прямолинейный
произвольно	криволинейный
покой	тело отсчета
относительно	автомобиль

Кинематика изучает виды механического движения: прямолинейное, криволинейное, колебательное, вращательное и отвечает на вопрос «как движется тело?».

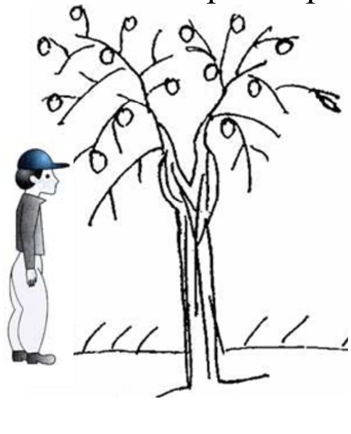
Основная задача кинематики:

- определение положения тела в любой момент времени,
- определение физических (кинематических) величин, характеризующих движение;
- описание движения тела с помощью математических формул, графиков или таблиц.

Определить положение тела в пространстве можно только относительно других тел.

Двигаться = изменять положение **относительно** другого тела (тел). Не двигаться = находиться в покое **относительно** другого тела (тел). Поэтому **движение и покой всегда относительны.**

Рассмотрите рисунки.



Человек стоит.

Человек находится в покое.

Человек находится в покое относительно дерева.

Человек находится в покое относительно дороги.

Человек не перемещается, не двигается.

Человек не изменяет своего положения относительно других тел.

Человек идет.

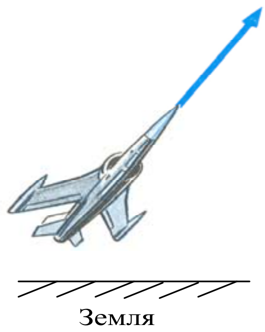
Человек перемещается относительно дерева.

Человек двигается относительно дороги.

Человек изменяет свое положение относительно других тел.

Положение тела относительно другого тела изменяется со временем – значит, тело движется.

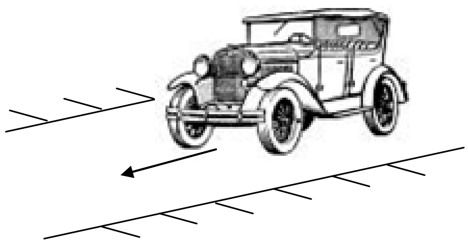
Положение тела относительно другого тела не изменяется со временем – значит, тело находится в покое (тело не движется)



Самолет летит.

Самолет перемещается относительно Земли.

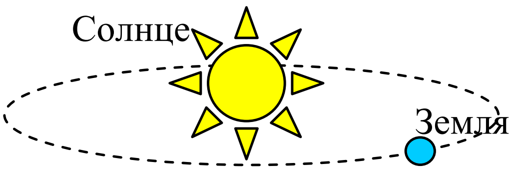
Самолет изменяет свое положение относительно другого тела (Земли).



Машина едет по дороге.

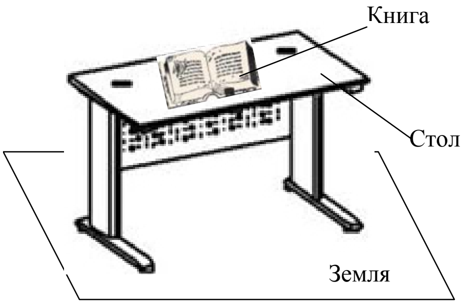
Машина перемещается.

Машина изменяет свое положение относительно других тел.



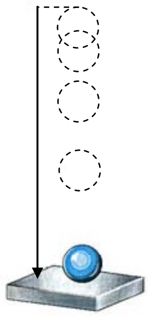
Земля движется относительно Солнца.

Земля изменяет свое положение относительно другого тела.



Книга покоится относительно стола.

Положение книги не изменяется относительно стола, пола, Земли, комнаты.



Тело движется относительно Земли.

Положение тела изменяется относительно стола.

Тело, относительно которого можно определить положение другого тела, называется телом отсчета.

Тело отсчета выбираем произвольно. Телом отсчета может быть любое тело.

Человек идет по дороге.

Тело отсчета – дорога.

Тело отсчета – дерево.

Рассмотрим физическое явление: **в движущемся автомобиле сидит человек.**

физическое тело

тело отсчета

Человек сидит в автомобиле

Земля → Автомобиль движется, изменяет положение относительно Земли. Человек вместе с автомобилем движется относительно Земли.

автомобиль → Человек не движется относительно автомобиля. Человек покоится относительно автомобиля

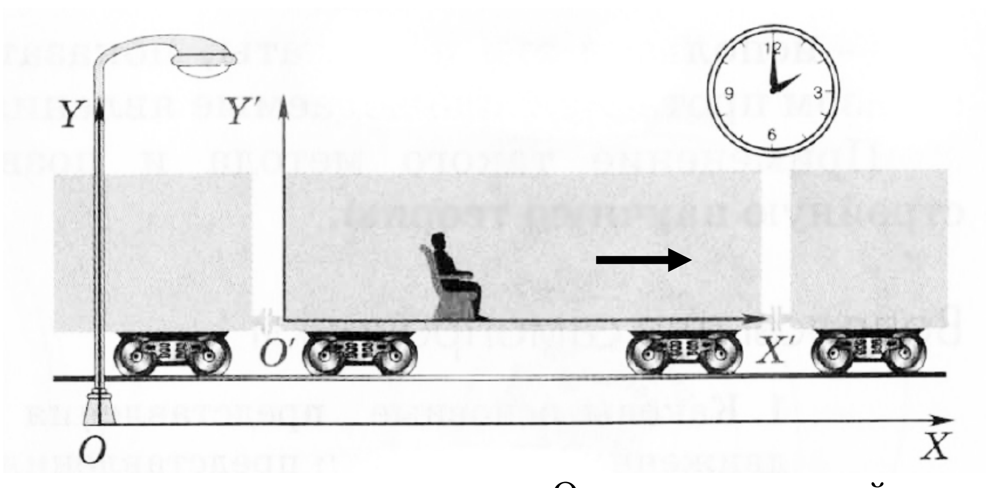
Движение и покой относительны.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

тело находится **на** плоскост**и** (**в** пространств**е**),
тело движется **по** плоскост**и** (**в** пространств**е**),
тело движется относительно другого тела,
тело находится в покое относительно другого тела,
тело дви**жется** = тело дви**гается**
тела дви**жутся** = тела дви**гаются**

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Движение, двигаться	**Покой, не двигаться**
Человек идет	Человек стоит
Человек бежит	Человек не движется
Человек прыгает	Тело находится в покое
Человек падает	Тело не изменяет положение
Машина едет	
Машина движется	
Самолет летит	
Лодка плывет	
Земля вращается	
Тело совершает колебания	
Тело колеблется	
Тело падает	
Тело изменяет положение	



Рассмотрите внимательно рисунок. Относительно какой системы отсчёта пассажир движется, а относительно какой находится в покое?

1.3. Система отсчета. Радиус-вектор

Новые слова и словосочетания

радиус-вектор	система отсчета
материальная точка	начальное положение
конечное положение	соединять точки
с течением времени	координата
пренебрегать (не учитывать)	пренебречь

Разные физические тела имеют различную форму и размеры. **Если размеры тела малы по сравнению с расстоянием, которое оно проходит, или по сравнению с расстоянием до других тел, то размерами тела можно пренебречь (не учитывать).** Тогда тело можно считать **точкой (материальной точкой)**.

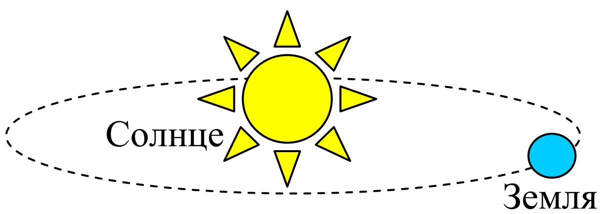
Например, Земля имеет форму шара, размер (диаметр) Земли $\sim 13 \cdot 10^3$ км. Размер Земли в 24 000 раз меньше, чем расстояние от Солнца до Земли. Поэтому можно Землю считать точкой, которая движется вокруг другой точки – центра Солнца.

Автомобиль мал по сравнению с расстоянием, которое он проехал, поэтому автомобиль можно считать точкой (материальной точкой).

Тело, размерами которого в данных условиях движения можно пренебречь (не учитывать), называется ***материальной точкой***.

Одно и то же тело при одних условиях можно считать материальной точкой, а при других условиях – нет.

Например, движение Земли вокруг Солнца (Земля – материальная точка); движение спутника вокруг Земли (Земля – не материальная точка, размерами Земли пренебречь нельзя).



Положение материальной точки (тела) можно определить только относительно другого тела (точки) отсчета. ***Тело отсчета можно выбрать произвольно.***

Чтобы определить, как изменяется положение тела с течением времени (во времени), нужно иметь **тело отсчета, систему координат и часы** – систему отсчета.

Система отсчета – **это тело отсчета (начало отсчета), система координат и часы (метод измерения времени).**

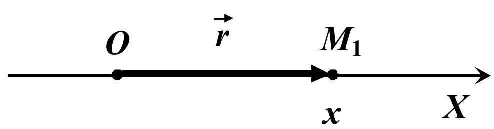
Систему координат связывают с телом отсчета. Телом отсчета может быть материальная точка.

Положение тела (материальной точки) **в декартовой системе отсчета** можно определить координатным или векторным способом.

1. **Координатный способ.** Координатный способ – одна, две или три координаты, определяющие положение тела в данный момент времени в системе отсчета.

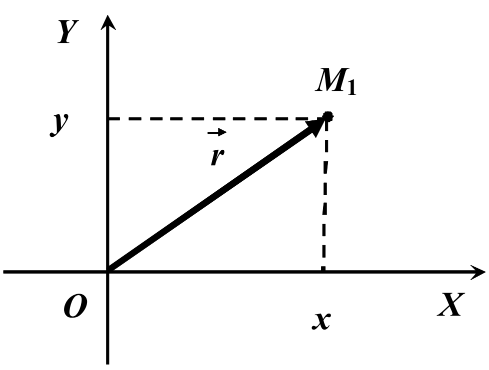
Координаты (x, y, z) – это числа, которые определяют положение тела в пространстве относительно точки О (начало координат). Точка О – тело отсчета.

Одномерная система отсчета



В неё входит: одномерная система координат ось OX, начало оси координат точка O, тело отсчета – материальная точка O, часы.
Положение точки в этой системе отсчета определяется одной координатой x.

Двумерная система отсчета



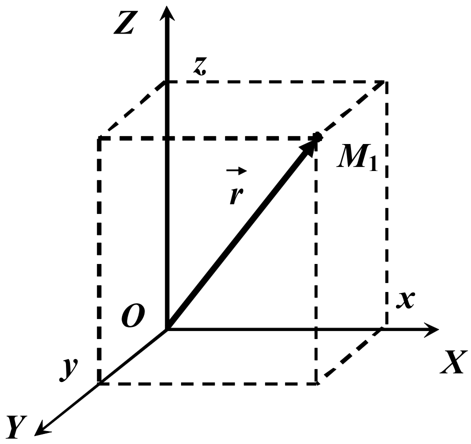
В неё входит: двумерная система координат XOY, начало осей координат точка *0,* тело отсчета – материальная точка *0* , часы.

Положение точки в двумерной системе отсчета (на плоскости) определяется двумя координатами x, y.

Трехмерная система отсчета

В неё входит: трехмерная система координат $XOYZ$, начало осей координат точка *0,* тело отсчета – материальная точка *0* , часы.

Положение тела в трехмерной системе отсчета (в пространстве) определяется тремя координатами x, y, z.



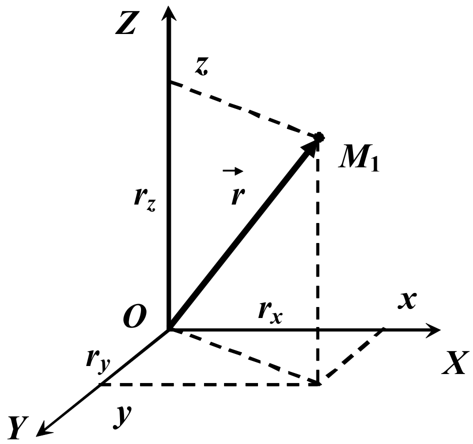
Если материальная точка перемещается по траектории, то координаты её со временем изменяются. Тогда можно записать:

$$\begin{cases} x = x\ (t), \\ y = y\ (t), \\ z = z\ (t). \end{cases}$$

Уравнения, определяющие изменение координат материальной точки со временем, называются ***<u>кинематическими уравнениями движения в координатной форме</u>***.

2. **Векторный способ.** При векторном способе положение точки относительно любой системы отсчета определяется радиус-вектором $\vec{r}$, проведенным из начала координат от точки O к точке M_1.

Радиус-вектор $\vec{r}$ (или вектор положения) – **это вектор, который соединяет начало системы отсчета и тело (точку), положение которого нужно определить.**



Из рисунка видно, что r_x, r_y, r_z – это проекции радиус-вектора $\vec{r}$ на координатные оси (r_x – проекция $\vec{r}$ на ось OX, r_y – проекция $\vec{r}$ на ось OY, r_z – проекция $\vec{r}$ на ось OZ). Проекции вектора $\vec{r}$ численно равны координатам x, y, z точки M_1: $r_x = x$, $r_y = y, r_z = z$.

Модуль радиус-вектора $\vec{r}$

$$r = |\vec{r}| = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}.$$

Если материальная точка перемещается по траектории, то координаты её со временем изменяются. Тогда можно записать: $\vec{r} = \vec{r}(t)$ – **это**

кинематическое уравнение движения материальной точки в векторной форме.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ:

Уравнения, определяющие изменение положения материальной точки со временем, называются ***<u>кинематическими уравнениями движения</u>***.

$$\vec{r} = \vec{r}(t) \text{ или } \begin{cases} x = x\ (t), \\ y = y\ (t), \\ z = z\ (t). \end{cases}$$

<u>УПРАЖНЕНИЯ</u>

<u>Упражнение 1.</u> *Читайте, слушайте, повторяйте.*

ТЕКСТ

Тело, физическое тело, тело отсчета, неподвижное тело.

Изменять, изменить, изменение положения, изменять положение тела, положение тела изменяется, положение тела изменилось.

Относительный, относительно.

Движение, механическое движение, механическое движение относительно.

Механическое движение происходит в пространстве и во времени.

Точка, материальная точка, размер, форма, пренебрегать, пренебречь.

Радиус-вектор, модуль радиус-вектора, направление радиус-вектора, вектор перемещения, модуль вектора перемещения.

Начальное положение, конечное положение, начальный момент времени, конечный момент времени, промежуток времени, интервал времени, начальная координата, конечная координата.

Система, система координат, система отсчета, связывать, связать, связь, плоскость, пространство, ось координат, оси координат, начало координат.

Радиус-вектор зависит от времени, координата зависит от времени, зависимость.

Зависимость от времени, функция времени.

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. Тело, размерами которого в данных условиях движения можно пренебречь, называется ***материальной точкой***.
2. ***Система отсчета*** – это тело отсчета (начало отсчета), система координат и часы (метод измерения времени).
3. **Координатный способ.** Координатный способ – одна, две или три координаты, определяющие положение тела в данный момент времени в декартовой системе отсчета.
4. **Векторный способ.** При векторном способе положение точки определяется радиус-вектором $\vec{r}$, проведенным из начала координат системы отсчета к точке M_1.
5. **Радиус-вектор** $\vec{r}$ (или вектор положения) – это вектор, который соединяет начало системы отсчета и тело (точку), положение которого нужно определить.
6. Уравнения, определяющие изменение положения материальной точки со временем, называются ***кинематическими уравнениями движения***.
7. $\vec{r} = \vec{r}_0 + \Delta\vec{r}$. Это уравнение является **уравнением движения в векторной форме.**
8. Уравнения

$$x = x_0 + \Delta x$$
$$y = y_0 + \Delta y$$
$$z = z_0 + \Delta z$$

это **уравнения движения в координатной форме.**

ТЕМА 2. **ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕХАНИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ**

2.1. **Траектория**

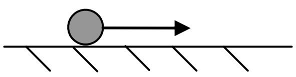
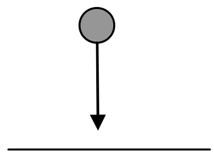
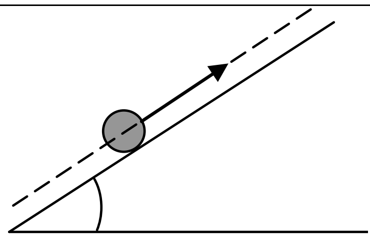
Новые слова и словосочетания

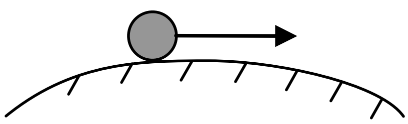
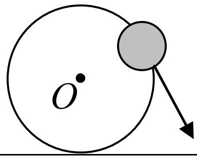
траектория	падать
криволинейно	падение
прямолинейно	окружность
прямолинейно	замкнутая линия
выпуклая поверхность	эллипс

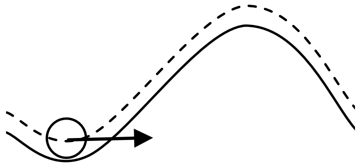
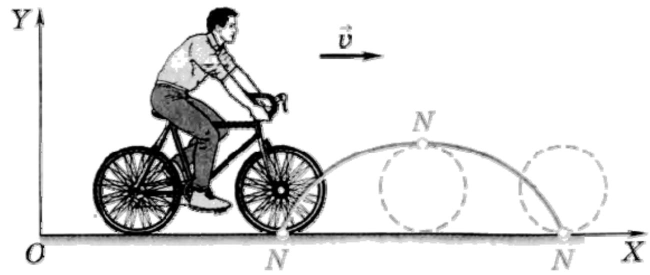
Линия, по которой движется тело, называется *траекторией*.

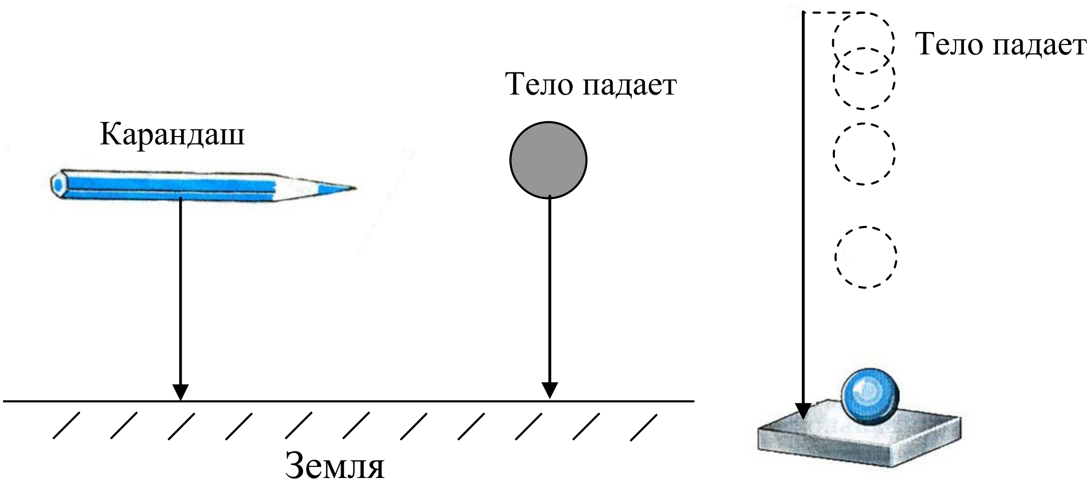
Если ***траектория*** – ***прямая линия***, то движение называется ***прямолинейным***; если **траектория** ***кривая линия***, то движение называется ***криволинейным***. Кинематика изучает, как движется тело. Кинематика изучает прямолинейное и криволинейное движение.

Рассмотрите внимательно рисунки. Как движется тело?

		
Тело движется по горизонтальной поверхности вдоль прямой	Тело падает вертикально вниз	Тело движется по наклонной плоскости вверх по прямой линии
Траектория движения – прямая линия. Это **прямолинейное движение**		

	
Тело движется по выпуклой поверхности	Тело движется по окружности

	
Тело движется по кривой линии	Велосипедист движется по прямой, а точка N на колесе – по сложной кривой линии
Траектория движения – кривая линия. Это **криволинейное движение**	



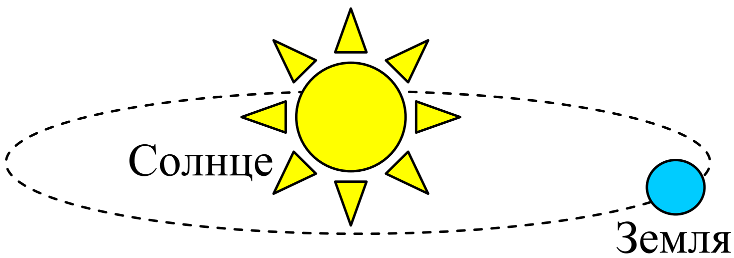
Тело находится на высоте. Тело находится в покое.

Тело движется. Оно **падает вниз к Земле.**

Тело упало на Землю. Тело находится в покое на Земле.

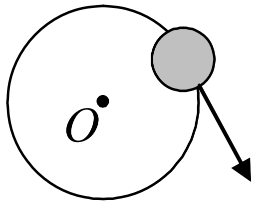
Падение – это прямолинейное движение.

Как движется тело? Тело движется прямолинейно. Тело изменяет свое положение относительно Земли. Оно движется вниз к Земле.



Земля движется вокруг Солнца. **Траектория Земли замкнутая кривая линия (эллипс).** Земля вращается вокруг Солнца. Вращение – это криволинейное движение.

Движение Земли повторяется через определенный промежуток времени, такое движение называется периодическим.



Тело движется по окружности. **Окружность – это замкнутая кривая линия.** Тело движется криволинейно. Оно вращается вокруг точки О. **Это периодическое движение.**

ЗАПОМНИТЕ!

Прямая линия
кривая линия
Прямолинейное движение
криволинейное движение
Тело движется прямолинейно
тело движется криволинейно
Падение – это прямолинейное движение.
Вращение – это криволинейное движение

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Какое движение?	Как движется тело?
прямолинейное	прямолинейно
криволинейное	криволинейно

<u>УПРАЖНЕНИЯ</u>

<u>Упражнение 1.</u> *Закончите предложения.*

Механика изучает………………
Виды движения изучает………………
Почему движется тело, изучает ………………….
Почему тело не движется, изучает…………………

Упражнение 2. *Слушайте, читайте, повторяйте.*

Виды движения: поступательное движение, вращательное движение, колебательное движение.

Прямолинейное движение: тело движется по прямой линии, прямолинейно.

Криволинейное движение: тело движется по кривой линии, криволинейно, тело движется по окружности, тело вращается.

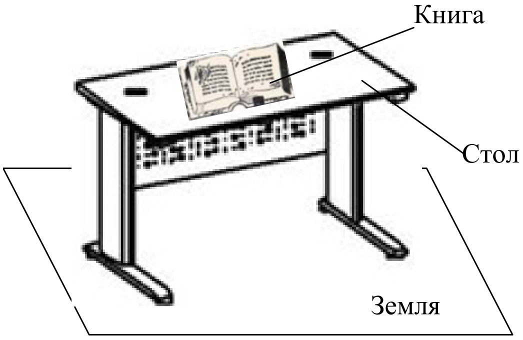
Периодическое движение: тело движется по окружности, тело вращается, тело совершает колебания, тело колеблется.

Машина движется по горизонтальной плоскости, тело движется по вертикальной плоскости, тележка движется по наклонной плоскости, Земля движется в космическом пространстве относительно Солнца, спутник движется вокруг Земли, спутник движется относительно Солнца.

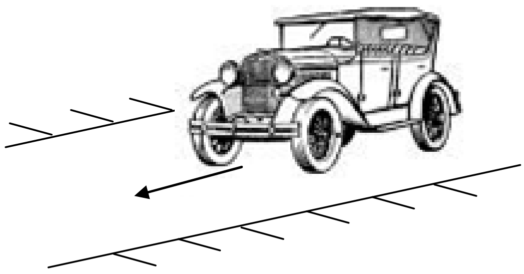
Упражнение 3. *Рассмотрите рисунки. Ответьте на вопросы.*

1. Как тела движутся?
2. Относительно каких тел отсчета движутся тела?

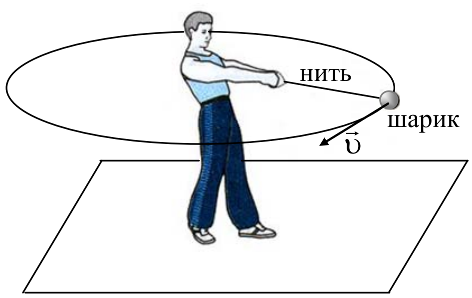
1.



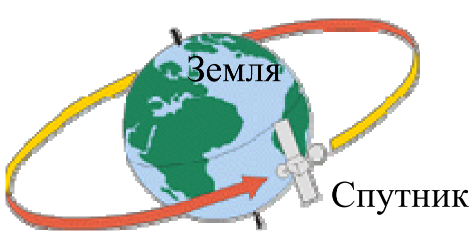
2.



3.

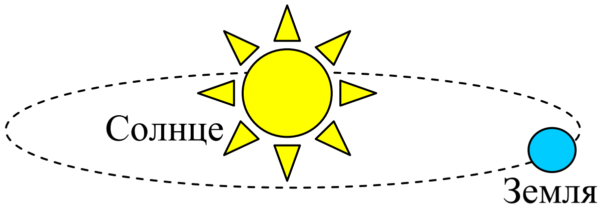


4.

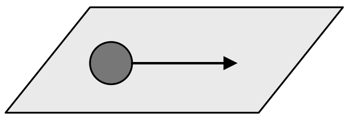


5.

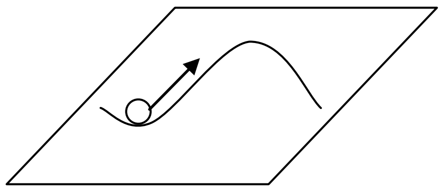
6.



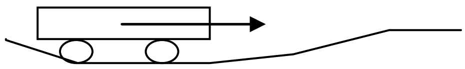
7.



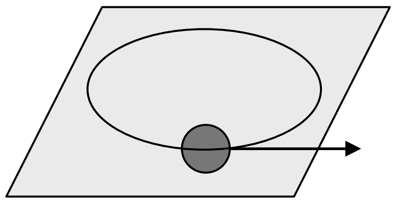
8.



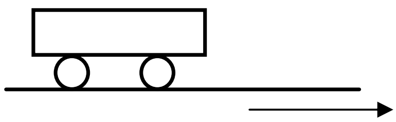
9.



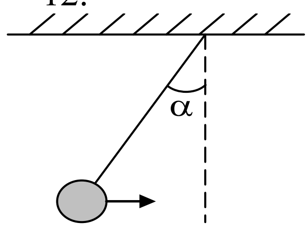
10.



11.



12.



Упражнение 4. *Прочитайте текст. Назовите тела отсчета.*

ТЕКСТ

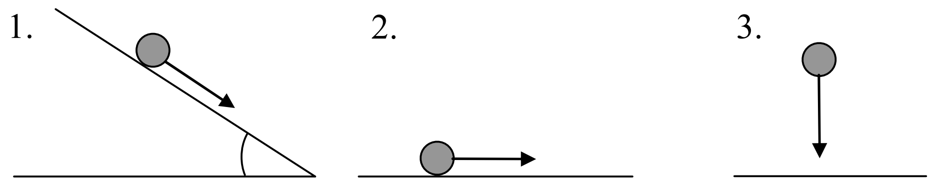
Машина движется по улице. Ее положение изменяется относительно дороги, домов. В машине сидит человек. Его положение относительно машины не изменяется. Относительно машины человек находится в покое. Но человек вместе с машиной движется относительно домов. Положение человека относительно домов изменяется. Значит, человек находится в покое относительно машины и движется относительно домов вместе с машиной. Движение и покой относительны.

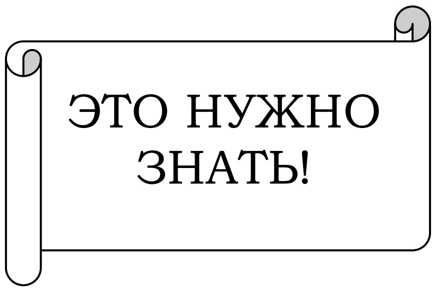
<u>Упражнение 5.</u> *Ответьте на вопрос: тело движется или находится в покое? Назовите тела отсчета, относительно которых тела движутся или находятся в покое.*

Лодка плывет по реке. Машина стоит на улице. Машина едет по улице. Тело лежит на Земле. Земля движется вокруг Солнца. Луна движется вокруг Земли.

<u>Упражнение 6.</u> *Найдите подписи к рисункам.*

а) тело движется по горизонтальной плоскости;
б) тело находится в покое в вертикальной плоскости;
в) тело движется в вертикальной плоскости;
г) тело движется по наклонной плоскости.





Физические термины

1. **<u>Кинематика изучает виды механического движения:</u>** прямолинейное, криволинейное, колебательное, вращательное и отвечает на вопрос «как движется тело?».
2. Определить положение тела в пространстве можно только относительно других тел.
3. **<u>Движение и покой всегда относительны.</u>**
4. Тело, относительно которого можно определить положение другого тела, называется **<u>телом отсчета</u>.**
5. Тело отсчета <u>выбираем произвольно</u>. Телом отсчета может быть любое тело.

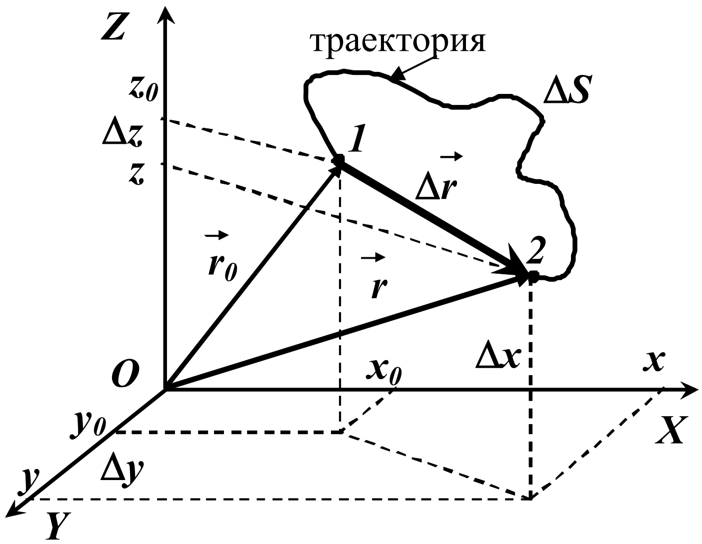
6. Линия, по которой движется тело, называется ***траекторией***.
7. По траектории различают виды механического движения: прямолинейное, криволинейное.
8. Если ***траектория*** – ***прямая линия***, то движение называется ***прямолинейным***; если **траектория** – ***кривая линия***, то движение называется ***криволинейным***.

2.2. Вектор перемещения. Путь

Новые слова и словосочетания

начальное положение	конечное положение
соединять точки	вектор перемещения
траектория	промежуток времени
перемещение	путь
с течением времени	
пренебрегать (не учитывать)	пренебречь

Рассмотрим движение материальной точки по траектории из точки 1 (начальное положение, положение точки в момент времени t_0) в точку 2 (конечное положение, положение точки в момент времени $t = t_0+\Delta t$). Интервал Δt – время движения материальной точки.



Положение точки в момент времени t_0 определяется радиус-вектором $\vec{r}_0$, а момент времени $t_0+\Delta t$ положение точки определяется радиус-вектором $\vec{r}$.

При движении материальной точки ее радиус-вектор $\vec{r}$ и координаты изменяются со временем. Радиус-вектор $\vec{r}$ зависит от времени. Математически это записывается так:

$$\vec{r} = \vec{r}(t); \quad \text{или} \quad \begin{cases} x = x\ (t), \\ y = y\ (t), \\ z = z\ (t). \end{cases}$$

Уравнения, определяющие изменение положения материальной точки со временем, называются ***кинематическими уравнениями движения***.

> ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!
>
> Радиус-вектор $\vec{r}$ зависит от времени, $\vec{r} = \vec{r}(t)$
> Координаты x и y зависят от времени.
> Координаты x и y являются функциями времени: $x = x(t)$, $y = y(t)$.

Вектор $\Delta\vec{r}$, соединяющий начальное и конечное положение тела и направленный к конечному положению, называется ***перемещением*** (вектором перемещения). **Вектор $\Delta\vec{r}$ соединяет начальное положение точки и конечное.**

Вектор перемещения равен изменению (приращению) радиус-вектора материальной точки за время Δt ее движения $\Delta\vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_0$. Вектор $\Delta\vec{r}$ показывает, как изменилось положение тела за время движения.

Из рисунка видно, что $\vec{r} = \vec{r}_0 + \Delta\vec{r}$. Вектор перемещения зависит от времени движения, поэтому уравнение $\Delta\vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_0$ **– это уравнение движения в векторной форме.**

Запишем уравнения движения в скалярной (координатной) форме.

Спроектируем вектор перемещения $\Delta\vec{r}$ на координатные оси OX, OY, OZ. (Найдем проекции перемещения на оси координат). При движении тела координаты изменились от x_0, y_0, z_0 до x, y, z. За время Δt координата x изменилась на величину $\Delta x = x - x_0$, координата y – на величину $\Delta y = y - y_0$, координата z – на величину $\Delta z = z - z_0$. Изменение величины обозначают знаком Δ (греческая буква «дельта»).

Уравнения

$$\begin{cases} x = x_0 + \Delta x \\ y = y_0 + \Delta y \\ z = z_0 + \Delta z \end{cases}$$

– это уравнения движения в координатной форме.

Так как Δx, Δy, Δz – это проекции вектора перемещения $\Delta\vec{r}$ на оси OX, OY, OZ, то модуль вектора перемещения

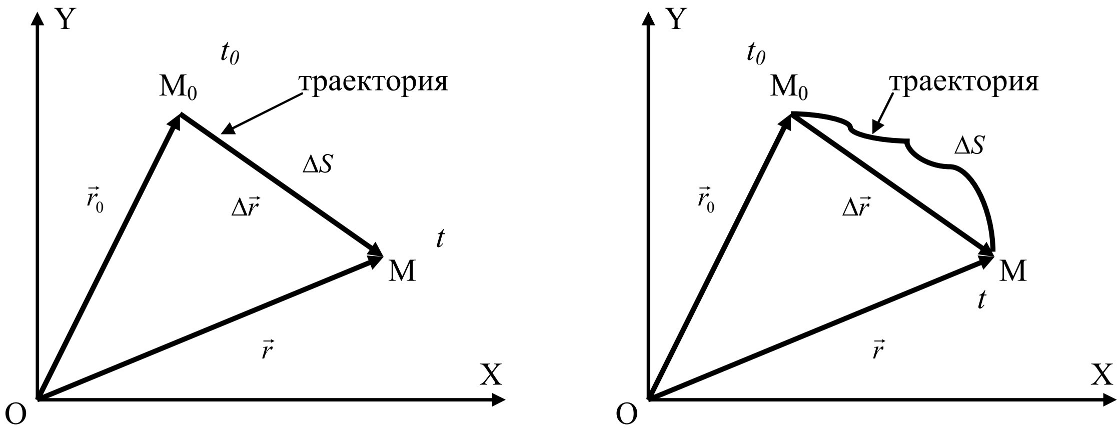
$$\Delta r = \left|\Delta\vec{r}\right| = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \text{ или}$$

$$\Delta r = \left|\Delta\vec{r}\right| = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}\,.$$

Если материальная точка переместилась по траектории из точки 1 (начальное положение) в точку 2 (конечное положение), то **длина траектории от точки 1 до точки 2 – это путь, пройденный материальной точкой по траектории за время движения.**

Тело может двигаться прямолинейно или криволинейно, поэтому траектория – это прямая или кривая линия. Вектор перемещения – это вектор, который соединяет начальное и конечное положение тела. Путь может быть равен или не равен модулю вектора перемещения.

<u>Путь</u> ΔS – **<u>это длина траектории от начального положения материальной точки до конечного.</u>** ***Путь – скалярная положительная величина*** $\Delta S \geq 0$.



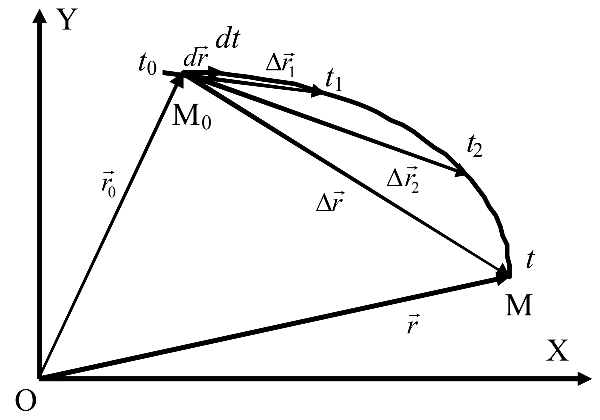
прямолинейное движение криволинейное движение

Если траектория движения – **прямая линия, то путь и модуль вектора перемещения равны.** В этом случае путь и модуль вектора перемещения – это длина отрезка прямой линии, по которой движется тело.

Значит, если движение материальной точки <u>прямолинейное</u> и направление движения не меняется, то $|\Delta\vec{r}| = \Delta S$.

Если траектория движения – **кривая линия, то путь и модуль вектора перемещения не равны.** В этом случае путь – это длина кривой линии, а модуль вектора перемещения – это длина отрезка прямой линии.

Значит, если движение <u>криволинейное</u>, то $|\Delta\vec{r}| < \Delta S$.



Рассмотрите внимательно рисунок. Тело движется криволинейно, чем меньше время движения, тем меньше перемещение

$t_1 - t_0 = \Delta t_1, \quad t_2 - t_0 = \Delta t_2 , \quad t - t_0 = \Delta t$

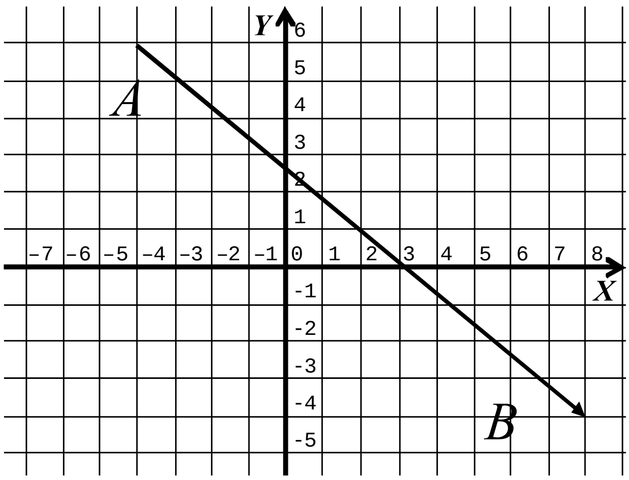
$\Delta t_1 < \Delta t_2 < \Delta t$

$\Delta\vec{r}_1 < \Delta\vec{r}_2 < \Delta\vec{r}$.

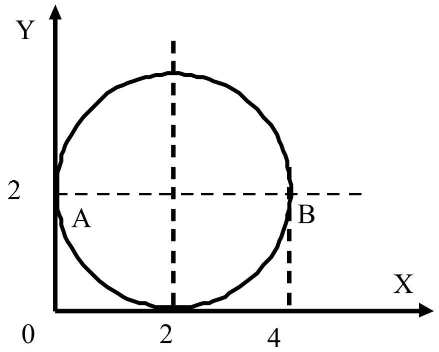
Если время движения мало, то есть $\Delta t \rightarrow 0$ (или $\Delta t = dt$, *время движения – бесконечно малый промежуток времени*), то $\Delta\vec{r} \rightarrow d\vec{r}$, а $|\Delta\vec{r}| = dr = dS$.

<u>УПРАЖНЕНИЯ</u>

<u>Упражнение 1.</u> *Найдите перемещение тела и проекции вектора перемещения на оси координат, если материальная точка движется из А в В.*

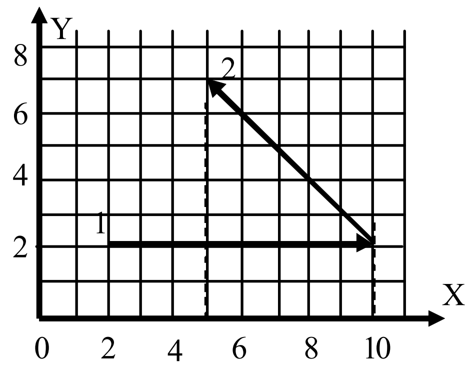


Упражнение 2. *Найдите путь и перемещение тела при его движении:*



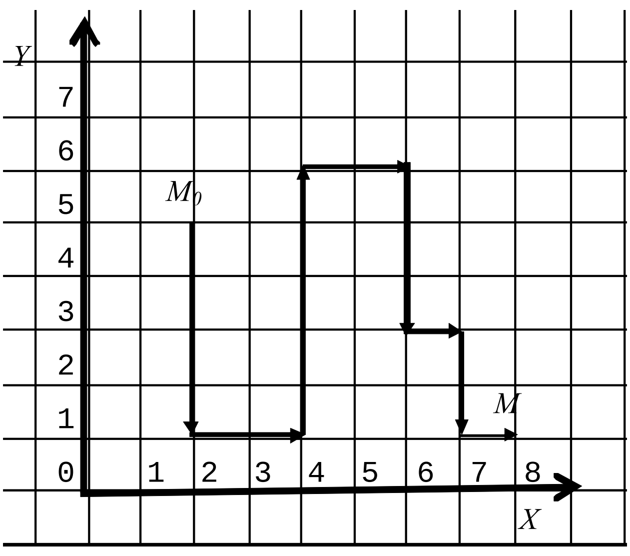
- от точки А до точки В;
- от точки А до точки А.

Упражнение 3. *Найдите перемещение, путь, проекции перемещения на оси координат, если тело переместилось из точки 1 в точку 2.*



Упражнение 4. Тело перемещается из точки А (0; 2) в точку В (4; –5). *Сделайте рисунок. Найдите перемещение, путь, проекции перемещения на оси координат.*

Упражнение 5. *Найдите путь и перемещение тела при его движении из точки M_0 в точку M.*



ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. Вектор перемещения равен приращению (изменению) радиус-вектора материальной точки за время Δt ее движения $\Delta\vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_0$. Вектор $\Delta\vec{r}$ показывает, как изменилось положение тела за время движения. Вектор $\Delta\vec{r}$ соединяет начальное положение точки и конечное.
2. ***Путь*** ΔS – это длина траектории от начального положения материальной точки до конечного. *Путь – скалярная положительная величина* $\Delta S \geq 0$.

2.3. **Скорость**

Новые слова и словосочетания

быстро	быстрота
отношение	предел отношения
стремление	стремиться
стремится	мгновенная скорость
скорость в данный момент времени	
производная	средний, средняя
единицы измерения	
путь, путевая скорость	

Важнейшей кинематической характеристикой движения тела является скорость.

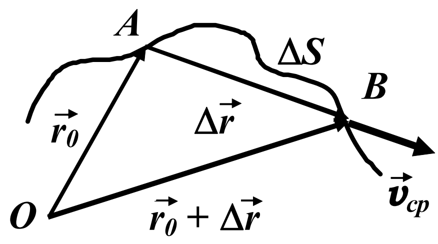
Скорость – это физическая величина, которая определяет направление и быстроту перемещения тела в пространстве (как быстро движется тело).

Скорость – это векторная величина.

В механике пользуются понятиями средней скорости перемещения, мгновенной скорости и средней скорости пути.

Средняя скорость перемещения

Средняя скорость перемещения (средний вектор скорости перемещения $\vec{\upsilon}_{ср}$) движущейся точки в интервале времени от t_0 до $t_0 + \Delta t$, называется вектор, равный отношению перемещения $\Delta\vec{r}$ к промежутку времени Δt, за который это перемещение произошло (ко времени движения)



$$\vec{\upsilon}_{ср} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}.$$

Вектор средней скорости перемещения направлен так же, как $\Delta\vec{r}$.

$$\vec{\upsilon}_{ср} \uparrow\uparrow \Delta\vec{r}.$$

Модуль вектора перемещения равен $|\Delta\vec{r}| = |\vec{\upsilon}_{ср}| \cdot \Delta t$.

В момент времени t_0 положение тела (материальной точки) характеризуется радиус-вектором $\vec{r}_0$, а в момент времени $t_0+\Delta t$ положение тела характеризуется радиус-вектором $\vec{r} = \vec{r}_0 + \Delta\vec{r}$, то $\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{\upsilon}_{ср}\Delta t$.

Уравнение $\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{\upsilon}_{ср}\Delta t$ – это кинематическое уравнение движения в векторной форме.

Средняя скорость пути

Средняя скорость пути (средняя путевая скорость) за время Δt – это скалярная физическая величина, равная отношению пути ΔS к промежутку времени Δt.

$$\upsilon_{ср} = \frac{\Delta S}{\Delta t}.$$

Средняя путевая скорость – это скаляр.

Если движение прямолинейное, то путь, пройденный телом за время Δt можно найти по формуле: $\Delta S = \upsilon_{ср} \cdot \Delta t$.

При движении **по прямой линии в одном направлении** модуль средней скорости перемещения равен средней скорости пути $|\vec{\upsilon}_{ср}| = \upsilon_{ср}$.

Мгновенная скорость

Мгновенная скорость $\vec{\upsilon}$ – это скорость в данный момент времени в данной точке пространства.

Мгновенная скорость равна отношению перемещения точки $\Delta\vec{r}$, взятого за очень маленький промежуток времени, в течение которого движение можно считать прямолинейным, (за промежуток времени $\Delta t \to 0$) к промежутку времени Δt.

Пусть в некоторый момент времени t_0 радиус-вектор, соединяющий движущееся тело с началом отсчета системы отсчета, равен $\vec{r}_0$, а через промежуток времени Δt он стал равен $\vec{r}_0 + \Delta\vec{r}$, где $\Delta\vec{r}$ – перемещение тела за время Δt. Если $\Delta t \to 0$, то мгновенная скорость равна пределу отношения $\frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$, или пределу к которому стремится средний вектор скорости при $\Delta t \to 0$.

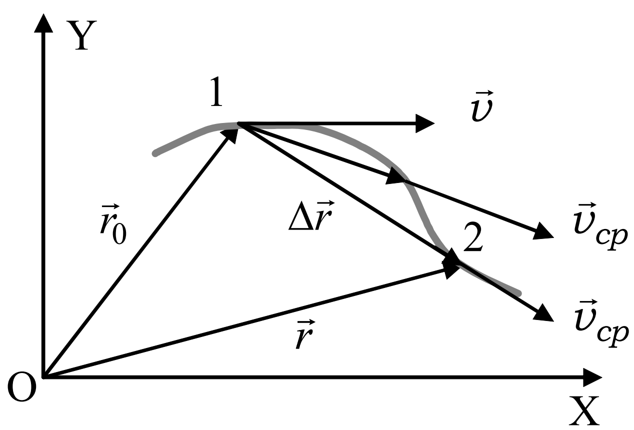
$$\vec{\upsilon} = \lim_{\Delta t \to 0} \vec{\upsilon}_{cp} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}$$

Предел $(\lim)$ отношения $\frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$ при стремлении промежутка времени Δt к нулю является первой производной радиус-вектора $\vec{r}$ по времени и обозначается $\frac{d\vec{r}}{dt}$ или $\vec{r}\,'$. Математически это можно записать так:

$$\vec{\upsilon} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{r}\,'.$$

<u>Мгновенная скорость</u> – это скорость тела в данный момент времени в данной точке траектории. **Мгновенная скорость – это вектор.** ***Мгновенная скорость – это первая производная от перемещения по времени.***

Мгновенная скорость $\vec{\upsilon} = \frac{d\vec{r}}{dt}$ равна отношению бесконечно малого перемещения $d\vec{r}$ к интервалу времени dt, за который это перемещение произошло. (*dt – бесконечно малый промежуток времени, $d\vec{r}$ – бесконечно малое перемещение*).



Мгновенная скорость – это вектор.

Вектор $\vec{\upsilon}$ мгновенной скорости точки направлен по касательной к траектории в данной точке в сторону движения.

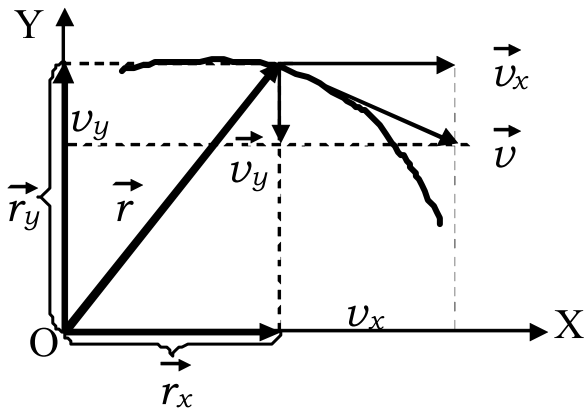
Путь dS, который проходит точка за время dt, равен модулю вектора перемещения $dS = \left|d\vec{r}\right|$. Поэтому **модуль вектора мгновенной скорости точки равен первой производной от пути по времени**

$$\upsilon = \left|\vec{\upsilon}\right| = \left|\frac{d\vec{r}}{dt}\right| = \frac{\left|d\vec{r}\right|}{dt} = \frac{dS}{dt}.$$

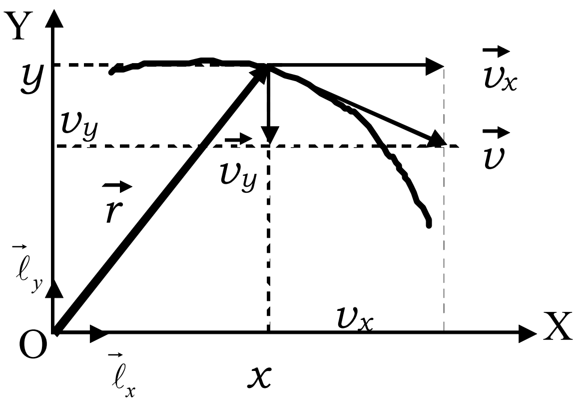
Мгновенная скорость – это вектор. Запишем вектор мгновенной скорости через его проекции на оси координат.

На рисунке материальная точка движется по плоскости XOY.

Радиус-вектор $\vec{r}$ можно разложить на составляющие по осям координат, тогда $\vec{r} = \vec{r}_x + \vec{r}_y$.



Мгновенная скорость – это производная радиус-вектора по времени: $\vec{\upsilon} = \dfrac{d\vec{r}}{dt} = \dfrac{d\vec{r}_x}{dt} + \dfrac{d\vec{r}_y}{dt}$. Тогда $\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_x + \vec{\upsilon}_y$, где $\vec{\upsilon}_x = \dfrac{d\vec{r}_x}{dt}$, $\vec{\upsilon}_y = \dfrac{d\vec{r}_y}{dt}$. Модуль мгновенной скорости равен $\upsilon = \left|\vec{\upsilon}\right| = \sqrt{\upsilon_x^2 + \upsilon_y^2}$.



Если радиус-вектор $\vec{r}$ выразить через его проекции на оси координат, то $\vec{r} = x\vec{\ell}_x + y\vec{\ell}_y$,

мгновенная скорость тогда равна $\vec{\upsilon} = \dfrac{d\vec{r}}{dt} = \dfrac{dx}{dt}\vec{\ell}_x + \dfrac{dy}{dt}\vec{\ell}_y$,

а модуль вектора мгновенной скорости равен

$$\upsilon = \left|\vec{\upsilon}\right| = \sqrt{\upsilon_x^2 + \upsilon_y^2}, \text{ где } \vec{\upsilon}_x = \frac{dx}{dt}\vec{\ell}_x, \text{ а } \vec{\upsilon}_y = \frac{dy}{dt}\vec{\ell}_y.$$

Проекции вектора мгновенной скорости на оси координат равны $\upsilon_x = \dfrac{dx}{dt}$, а $\upsilon_y = \dfrac{dy}{dt}$.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Единица измерения скорости – метр в секунду, *м/с.*
Скорость измеряется в метрах в секунду.
Скорость можно измерить в километрах в час.

Рассмотрим примеры расчета мгновенной скорости для прямолинейного движения.

Пример 1. Дано: путь зависит от времени как функция $S(t) = 8t$ (м). Найти модуль мгновенной скорости тела.

Чтобы найти модуль мгновенной скорости, нужно найти первую производную от пути по времени: $\upsilon = \dfrac{dS}{dt} = 8$ (м/с). Модуль скорости равен 8 м/с. Мгновенная скорость не зависит от времени.

Пример 2. Дано: путь зависит от времени как функция $S(t) = 8t^2 + 2t$ (м). Найти модуль мгновенной скорости тела в момент времени 2с. Чему равна начальная скорость тела? Какой путь тело пройдет за время 2с?

Чтобы найти модуль мгновенной скорости, нужно найти первую производную от пути по времени: $\upsilon = \dfrac{dS}{dt} = 16t + 2$ (м/с). В этом случае модуль скорости изменяется во времени. Модуль скорости – это функция времени. В момент времени 2с мгновенная скорость равна 34 м/с.

В момент времени t = 0 мгновенная скорость равна 2 м/с. Модуль начальной скорости равен 2 м/с.

За время 2 с тело пройдет путь, равный S = 36 м.

Пример 3. Дано: путь зависит от времени как функция $S(t) = -8t^2 + 2t$ (м). Найти модуль мгновенной скорости. В какой момент времени тело остановится? Какой путь тело пройдет до остановки?

Чтобы найти модуль мгновенной скорости, нужно найти первую производную от пути по времени: $\upsilon = \dfrac{dS}{dt} = -16t + 2$ (м/с). В этом случае модуль скорости изменяется во времени. Модуль скорости – это функция времени. Скорость во времени уменьшается. Когда мгновенная скорость равна нулю тело остановится. Найдем время остановки. Решим уравнение $0 = -16t + 2$, отсюда $t = \frac{1}{8}$ с.

До остановки тело пройдет путь, равный

$$S(t) = -8t^2 + 2t = -8\frac{1}{64} + 2\frac{1}{8} = \frac{1}{8} \text{ (м).}$$

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Читаем, слушаем, повторяем.*

ТЕКСТ

Вектор, вектор скорости, вектор скорости равен отношению вектора перемещения ко времени движения. Вектор скорости изменяется, вектор скорости не изменяется. Уравнение движения в векторной форме, уравнение движения в координатной форме, уравнение движения в скалярном виде, уравнение движения в векторном виде. Вектор скорости показывает, вектор скорости характеризует, перемещение в единицу времени, перемещение за единицу времени, изменение координаты за единицу времени, единица скорости.

Упражнение 2. *Напишите условие задачи в тетради, сделайте рисунок и решите задачу.*

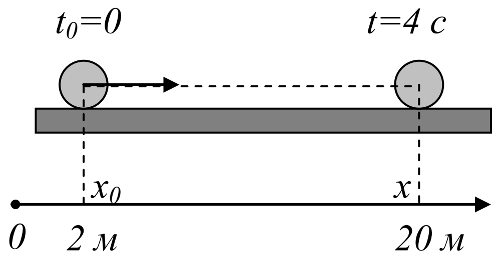
Тело движется в положительном направлении оси ОХ. В начальный момент времени 2 *с* тело находилось в точке с координатой 8 *м*. В конечный момент времени 6 *с* тело находится в точке с координатой 20 *м*. Найти модуль и проекцию средней скорости перемещения тела. Какое направление имеет вектор средней скорости перемещения?

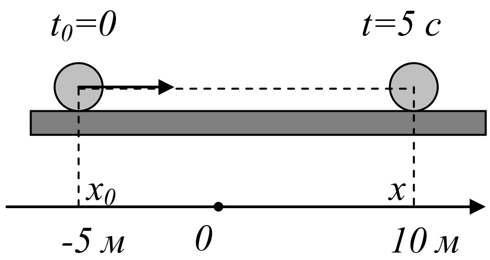
Упражнение 3. *Напишите условие задачи в тетради, сделайте рисунок и решите задачу.*

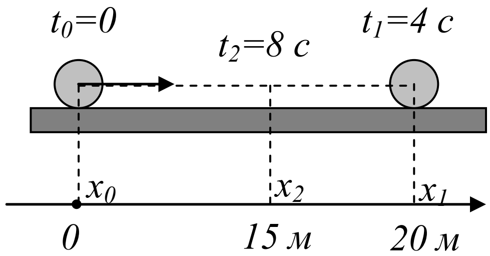
Тело движется в отрицательном направлении оси ОХ. В начальный момент времени 0 *с* тело находилось в точке с координатой 28 *м*. В конечный момент времени 2 *с* тело находится в точке с координатой 8 *м*. Найти модуль и проекцию средней скорости перемещения тела. Какое направление имеет вектор средней скорости перемещения?

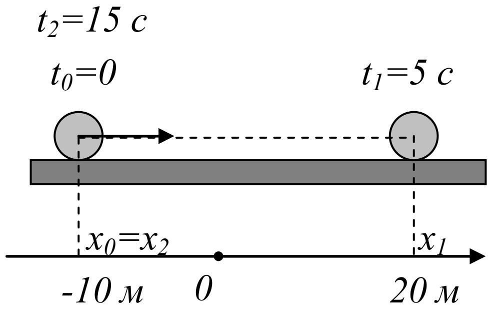
<u>***Упражнение 4.***</u> *Ответьте на вопросы.*

Чему равно время движения? Чему равен модуль перемещения тел, изображенных на рисунках? Чему равен путь? Чему равна средняя скорость перемещения? Чему равна средняя скорость пути?

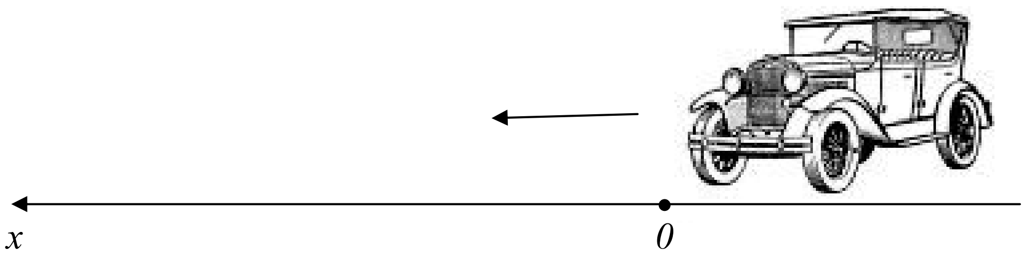






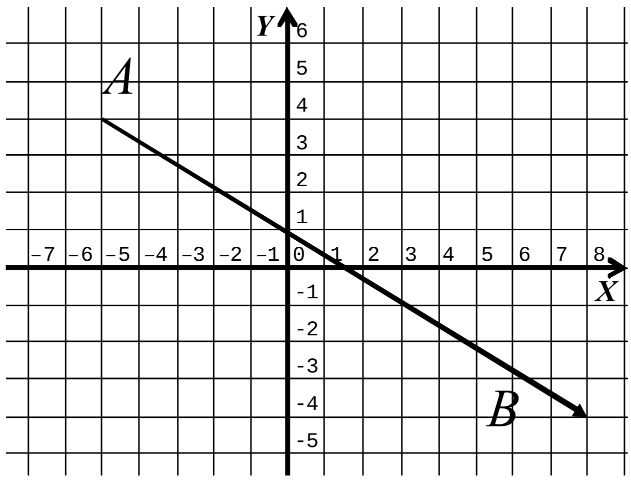


<u>***Упражнение 5.***</u> *Составьте и решите задачу в тетради. Найти время движения, направление и модуль средней скорости, модуль вектора перемещения, среднюю скорость пути.*

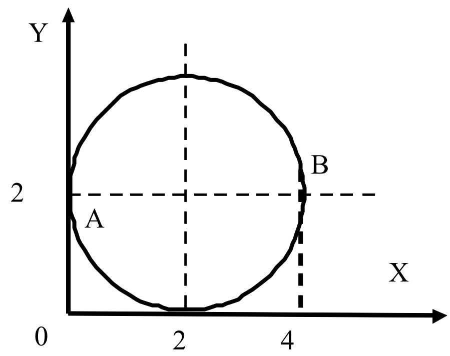


<u>**Упражнение 6.**</u> *Решите задачу.*

Найдите перемещение тела и модуль вектора перемещения , если материальная точка движется из *A* в *B*. Время движения 20 с. Найдите среднюю скорость перемещения.



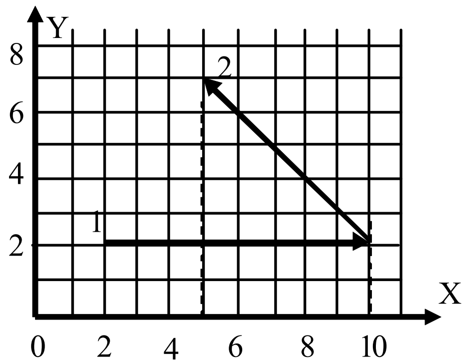
Упражнение 7. *Решите задачу.*



Найдите путь и перемещение тела при его движении:

- от точки А до точки В;
- от точки А до точки А.

Найдите скорость перемещения и скорость пути, если время движения от точки А до точки В равно 6 с, а от точки В до точки А 3 с.



Упражнение 8. *Решите задачу.*

Найдите перемещение и путь, пройденный телом за 20 с, если тело переместилось из точки 1 в точку 2. Найдите модуль вектора скорости перемещения и среднюю путевую скорость.

Упражнение 9. *Решите задачу.*

Человек прошел по улице расстояние 200 м за 10 мин, затем повернул направо и прошел расстояние 800 м за 15 мин. После этого он стоял 20 мин, а затем прошел ещё 200 м за 10 мин. Определить модуль вектора скорости перемещения и среднюю путевую скорость человека.

Упражнение 10. *Решите задачу.*

Велосипедист проехал первую половину пути со скоростью 12 км/час, а вторую – со скоростью 20 км/час. Найти среднюю скорость движения велосипедиста на всём пути.

<u>**Упражнение 11.**</u> *Решите задачу.*

Найдите мгновенную скорость в начальный момент времени, если зависимость пути от времени при прямолинейном движении задана уравнением: $S = 10t - t^2$ (м). Найдите время остановки. Какой путь пройдет тело до остановки?

<u>**Упражнение 12.**</u> *Решите задачу.*

Пройденный путь зависит от времени по закону: $S = 2t^2 + 20t$ (м). Найдите мгновенную скорость как функцию времени. Чему равна начальная скорость? В какой момент времени мгновенная скорость в 2 раза больше начальной скорости? Какой путь тело пройдет за это время?

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. **Скорость –** это физическая величина, которая определяет направление и быстроту перемещения тела в пространстве (как быстро движется тело).
2. <u>***Скорость***</u> – это векторная величина.
3. <u>***Средняя скорость перемещения (средний вектор скорости***</u> $\vec{\upsilon}_{cp}$) движущейся точки в интервале времени от t_0 до $t_0 + \Delta t$, называется вектор, равный отношению перемещения $\Delta\vec{r}$ к промежутку времени Δt, за который это перемещение произошло (ко времени движения)

$$\vec{\upsilon}_{cp} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}.$$

Вектор средней скорости направлен так же, как $\Delta\vec{r}$.

$$\vec{\upsilon}_{cp} \uparrow\uparrow \Delta\vec{r}.$$

4. Уравнение $\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{\upsilon}_{cp}\Delta t$ – это **кинематическое уравнение движения в векторной форме.**

5. ***<u>Средняя скорость пути (средняя путевая скорость)</u> за время*** Δt – это скалярная физическая величина, равная отношению пути ΔS к промежутку времени Δt.

$$\upsilon_{cp} = \frac{\Delta S}{\Delta t}.$$

6. ***Средняя путевая скорость*** – это скаляр.

7. <u>Мгновенная скорость</u> $\vec{\upsilon}$ – это скорость в данный момент времени в данной точке пространства. Математически это можно записать так:

$$\vec{\upsilon} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{r}\,'.$$

8. Вектор $\vec{\upsilon}$ мгновенной скорость точки направлен по касательной к траектории в данной точке в сторону движения.

9. Модуль вектора мгновенной скорости точки равен первой производной от пути по времени $\upsilon = |\vec{\upsilon}| = \left|\frac{d\vec{r}}{dt}\right| = \frac{|d\vec{r}|}{dt} = \frac{dS}{dt}$.

10. Мгновенная скорость – это производная радиус-вектора по времени: $\vec{\upsilon} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d\vec{r}_x}{dt} + \frac{d\vec{r}_y}{dt}$. Тогда $\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_x + \vec{\upsilon}_y$, где $\vec{\upsilon}_x = \frac{d\vec{r}_x}{dt}$, $\vec{\upsilon}_y = \frac{d\vec{r}_y}{dt}$. Модуль мгновенной скорости равен $\upsilon = |\vec{\upsilon}| = \sqrt{\upsilon_x^2 + \upsilon_y^2}$.

11. Если радиус-вектор $\vec{r}$ выразить через его проекции на оси координат, то $\vec{r} = x\vec{\ell}_x + y\vec{\ell}_y$, мгновенная скорость тогда равна $\vec{\upsilon} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\vec{\ell}_x + \frac{dy}{dt}\vec{\ell}_y$, а модуль вектора мгновенной скорости равен $\upsilon = |\vec{\upsilon}| = \sqrt{\upsilon_x^2 + \upsilon_y^2}$, где $\vec{\upsilon}_x = \frac{dx}{dt}\vec{\ell}_x$, а $\vec{\upsilon}_y = \frac{dy}{dt}\vec{\ell}_y$.

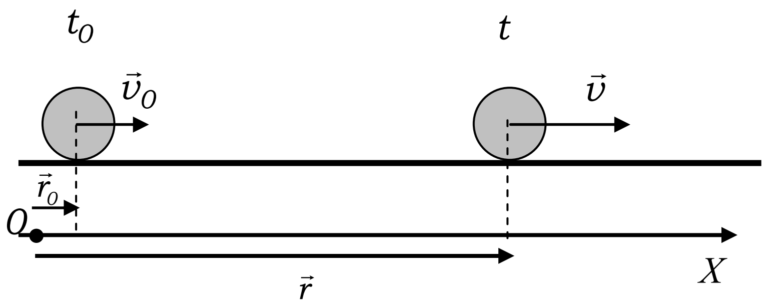
    Проекции вектора мгновенной скорости на оси координат равны $\upsilon_x = \frac{dx}{dt}$, а $\upsilon_y = \frac{dy}{dt}$.

2.4. **<u>Ускорение</u>**

Новые слова и словосочетания	
ускорение	среднее
изменение скорости	мгновенное
отношение	стремится
предел отношения	стремится к нулю
быстрота изменения	непостоянный
переменный	

Переменное движение – это движение с непостоянной скоростью. Мгновенная скорость тела изменяется $\vec{v} \neq const$.

Рассмотрим рисунок. Тело движется по оси OX,



Кинематическое уравнение движения $\vec{r} = \vec{r}_0 + \Delta\vec{r}$.

Если момент времени t_0 скорость тела равна $\vec{v}_0$, а момент времени t скорость тела равна $\vec{v}$, то за время $t - t_0 = \Delta t$ скорость тела изменилась на $\Delta\vec{v}$: $\Delta\vec{v} = \vec{v} - \vec{v}_0$. Это переменное движение.

<u>Ускорение – это физическая векторная величина, которая показывает, как быстро изменяется скорость за единицу времени.</u>

Ускорение – это ***<u>характеристика быстроты изменения скорости по модулю и по направлению</u>***.

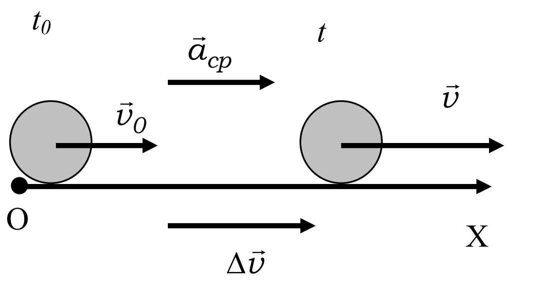
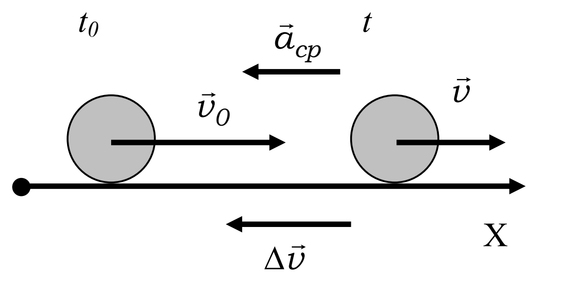
<u>Среднее ускорение</u>

Если за промежуток времени $\Delta t = t - t_0$ скорость тела изменилась на $\Delta\vec{v}$, то **средним ускорением тела $\vec{a}_{cp}$ называется отношение вектора изменения скорости ко времени, за которое это изменение произошло.**

$$\vec{a}_{cp} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}.$$

Направление вектора среднего ускорения совпадает с направлением вектора изменения скорости $\Delta\vec{v}$. Чтобы найти направление вектора $\vec{a}_{cp}$, **нужно найти направление вектора изменения скорости** $\Delta\vec{v}$.

Скорость тела может в процессе движения увеличиваться (такое движение называется ускоренным) или уменьшаться (такое движение называется замедленным).

Ускоренное движение	**Замедленное движение**
	
Скорость тела увеличивается: $\lvert\vec{v}\rvert > \lvert\vec{v}_0\rvert$, $\vec{a}_{cp} \uparrow\uparrow \Delta\vec{v}$ Направление вектора $\Delta\vec{v}$ и направления векторов $\vec{v}_0$ и $\vec{v}$ совпадают. Направление вектора $\vec{a}_{cp}$ и $\Delta\vec{v}$ всегда совпадают ($\vec{a}_{cp} \uparrow\uparrow \Delta\vec{v}$), поэтому направления векторов $\vec{a}_{cp}$ и $\vec{v}_0$, $\vec{v}$ тоже совпадают: $\vec{a}_{cp} \uparrow\uparrow \vec{v}$. **Вектор среднего ускорения $\vec{a}_{cp}$ и вектор скорости $\vec{v}$ направлены одинаково (в положительном направлении оси OX).**	Скорость тела уменьшается: $\lvert\vec{v}\rvert < \lvert\vec{v}_0\rvert$, $\vec{a}_{cp} \uparrow\uparrow \Delta\vec{v}$. Направление вектора $\Delta\vec{v}$ и направления векторов $\vec{v}_0$ и $\vec{v}$ противоположны. Так как направление векторов $\vec{a}_{cp}$ и $\Delta\vec{v}$ всегда совпадают ($\vec{a}_{cp} \uparrow\uparrow \Delta\vec{v}$), то направления векторов $\vec{a}_{cp}$ и $\vec{v}_0$, $\vec{v}$ противоположны: $\vec{a}_{cp} \uparrow\downarrow \vec{v}$. **Вектор среднего ускорения $\vec{a}_{cp}$ и вектор скорости $\vec{v}$ направлены противоположно (скорость направлена по оси OX, а ускорение против оси OX**).
Вывод: ***Вектор*** $\vec{v}$ показывает направление движения, а вектор $\vec{a}_{cp}$ **показывает, как (ускоренно) движется тело.**	**Вывод:** ***Вектор*** $\vec{v}$ показывает направление движения, а вектор $\vec{a}_{cp}$ **показывает, как (замедленно) движется тело.**

ЗАДАНИЕ. *Сделайте в тетради рисунки и рассмотрите случаи ускоренного и замедленного движения в направлении противоположном оси ОХ. Укажите на рисунках, как направлены вектор скорости тела* $\vec{\upsilon}$ *и вектор среднего ускорения* $\vec{a}_{cp}$.

Теперь сделаем вывод, если тело движется так, что скорость его изменяется, то кинематические уравнения движения можно записать в виде:

так как $\vec{a}_{cp} = \dfrac{\Delta\vec{\upsilon}}{\Delta t}$, а $\Delta\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon} - \vec{\upsilon}_0$, то уравнение скорости $\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_0 + \Delta\vec{\upsilon}$

или $\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_0 + \vec{a}_{cp}\Delta t$

Уравнение $\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_0 + \vec{a}_{cp}\Delta t$ **– векторное кинематическое уравнение скорости движения тела.**

Таким образом, кинематические уравнения движения в векторной форме:

$$\left.\begin{aligned} \vec{r} &= \vec{r}_0 + \Delta\vec{r} \\ \vec{\upsilon} &= \vec{\upsilon}_0 + \vec{a}_{cp}\Delta t \end{aligned}\right\}$$

Модуль среднего ускорения $\vec{a}_{cp}$ можно найти по формуле:

$$\left|\vec{a}_{cp}\right| = a_{cp} = \frac{\left|\Delta\vec{\upsilon}\right|}{\Delta t}$$

ЗАПОМНИТЕ!

$\Delta\vec{\upsilon}$ – вектор изменения скорости,

$\vec{a}_{cp} \uparrow\uparrow \Delta\vec{\upsilon}$ – направление вектора среднего ускорения и вектора изменения скорости всегда совпадают,

$\vec{a}_{cp} \uparrow\uparrow \vec{\upsilon}$ – направление вектора среднего ускорения и вектора скорости совпадают при ускоренном движении,

$\vec{a}_{cp} \uparrow\downarrow \vec{\upsilon}$ – направления вектора среднего ускорения и вектора скорости противоположны при замедленном движении.

Мгновенное ускорение (ускорение)

Мгновенное ускорение – это среднее ускорение тела за очень маленький интервал времени. Оно характеризует движение тела в данной точке траектории в данный момент времени.

Ускорение точки в момент времени t **равно пределу среднего ускорения** $\vec{a}_{cp}$ **при неограниченном уменьшении промежутка времени** Δt **к нулю** (при $\Delta t \to 0$).

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{v}'.$$

Мгновенное ускорение – это первая производная скорости по времени. Ускорение (мгновенное ускорение) – ***векторная величина***. Вектор ускорения $\vec{a}$ направлен по вектору изменения скорости $d\vec{v}$ или $\vec{a} \uparrow\uparrow d\vec{v}$

Мгновенное ускорение – это среднее ускорение за очень маленький промежуток времени, поэтому для **ускоренного** движения направление мгновенного ускорения и мгновенной скорости совпадают $\vec{a} \uparrow\uparrow \vec{v}$.

Для **замедленного** движения направление мгновенного ускорения и мгновенной скорости противоположны $\vec{a} \uparrow\downarrow \vec{v}$.

Мгновенное ускорение – это первая производная скорости по времени.

$$\vec{v} = v_x \vec{\ell}_x + v_y \vec{\ell}_y + v_z \vec{\ell}_z$$

Проекции вектора ускорения $\vec{a}$ на оси координат равны первым производным по времени от соответствующих проекций скорости

$$a_x = \frac{dv_x}{dt},\ a_y = \frac{dv_y}{dt},\ a_z = \frac{dv_z}{dt}.$$

Модуль вектора ускорения $\vec{a}$ равен $a = |\vec{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$.

Примеры решения задач

Пример 1. *Тело движется прямолинейно. Зависимость пути от времени определяется уравнением* $S(t) = 8t$ $(м)$. *Найдите модуль мгновенной скорости и модуль мгновенного ускорения. Какое это движение?*

Решение задачи

Если путь зависит от времени по закону $S(t) = 8t \quad (м)$, то модуль мгновенной скорости равен $\upsilon = \dfrac{dS}{dt} = 8\left(\dfrac{м}{с}\right)$. Мгновенная скорость не изменяется. Это движение с постоянной скоростью.

Модуль мгновенного ускорения $a = \dfrac{d\upsilon}{dt} = 0\left(\dfrac{м}{с^2}\right)$. Мгновенное ускорение равно нулю. Когда тело движется с постоянной скоростью, его ускорение равно нулю.

Пример 2. *Тело движется прямолинейно. Зависимость пути от времени определяется уравнением* $S(t) = 2t^2 + 14t\ (м)$. *Найдите модуль мгновенной скорости и модуль мгновенного ускорения. Какое это движение?*

Решение задачи

Если путь зависит от времени как функция $S(t) = 2t^2 + 14t\ (м)$, модуль мгновенной скорости тела равен $\upsilon = \dfrac{dS}{dt} = 4t + 14\ \left(\dfrac{м}{с}\right)$. Модуль скорости изменяется, он зависит от времени. Это движение с переменной скоростью.

Мгновенная скорость $\upsilon = f(t)$ – это функция времени. Начальная скорость тела (при $t_0 = 0$) равна $\upsilon_0 = 4 \cdot 0 + 14 = 14\left(\dfrac{м}{с}\right)$. В момент времени t = 1 с скорость тела равна $\upsilon(1) = 4 \cdot 1 + 14 = 18\left(\dfrac{м}{с}\right)$. Модуль скорости увеличивается. Это ускоренное движение.

Модуль мгновенного ускорения тела равен $a = \dfrac{d\upsilon}{dt} = 4\left(\dfrac{м}{с^2}\right)$.

Пример 3. *Тело движется прямолинейно. Зависимость пути от времени определяется уравнением* $S(t) = -5t^2 + 60t\ (м)$. *Найдите модуль мгновенной скорости и модуль мгновенного ускорения. Какое это движение?*

Решение задачи

Если $S(t) = -5t^2 + 60t\ (м)$, то модуль скорости $\upsilon = \dfrac{dS}{dt} = -10t + 60\ \left(\dfrac{м}{с}\right)$. Модуль скорости зависит от времени. Это движение с переменной скоростью.

Начальная скорость тела равна $\upsilon_0 = -10 \cdot 0 + 60 = 60\left(\dfrac{м}{с}\right)$. В момент времени t = 2 с скорость тела равна $\upsilon(2) = -10 \cdot 2 + 60 = 40\left(\dfrac{м}{с}\right)$. Модуль скорости уменьшается. Это замедленное движение. Тело останавливается в момент времени t = 6 с, когда мгновенная скорость тела равна нулю $\upsilon(6) = 0\left(\dfrac{м}{с}\right)$. Модуль мгновенного ускорения равен $a = \dfrac{d\upsilon}{dt} = |-10| = 10\left(\dfrac{м}{с^2}\right)$.

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Слушайте и повторяйте слова и словосочетания.*

Изменение скорости, быстрота изменения скорости, ускорение, среднее ускорение, мгновенное ускорение, векторы направлены одинаково, векторы ускорения и скорости направлены одинаково (сонаправлены), векторы направлены противоположно, предел отношения, предел отношения вектора изменения скорости к промежутку времени.

Вектор, вектор скорости, вектор скорости равномерного движения, вектор скорости равен, вектор перемещения, вектор скорости равен отношению вектора перемещения ко времени. Вектор скорости изменяется, вектор скорости не изменяется.

Упражнение 2. *Слушайте вопрос. Дайте ответ.*

1. Что такое среднее ускорение?
2. Среднее ускорение – это скалярная или векторная величина?
3. Что показывает среднее ускорение?
4. Как можно найти модуль среднего ускорения?
5. Что можно сказать о направлениях вектора среднего ускорения и вектора изменения скорости?

6. Какое движение называется ускоренным?
7. Какое движение называется замедленным?
8. Как движется тело, если векторы скорости и ускорения имеют одинаковое направление?
9. Как движется тело, если векторы скорости и ускорения направлены противоположно?
10. Что такое мгновенное ускорение?

<u>Упражнение 3.</u> *Закончите предложение.*

1. При ускоренном прямолинейном движении направление вектора изменения скорости $\Delta\vec{v}$ направлено ……….
2. При замедленном прямолинейном движении направление вектора изменения скорости $\Delta\vec{v}$ направлено ………
3. Направления вектора ускорения $\vec{a}_{cp}$ и вектора изменения скорости $\Delta\vec{v}$ всегда ……..
4. При ускоренном движении направления векторов $\vec{a}_{cp}$ и $\vec{v}_0$, $\vec{v}$ ……..
5. При замедленном движении направления векторов $\vec{a}_{cp}$ и $\vec{v}_0$, $\vec{v}$ …….
6. Вектор $\vec{v}$ показывает направление движения, а вектор ускорения $\vec{a}_{cp}$ показывает ………
7. Мгновенное ускорение $\vec{a}$ – это среднее ускорение за …………

<u>Упражнение 4.</u> *Решите задачи.*

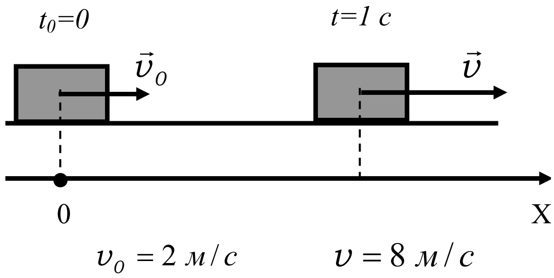
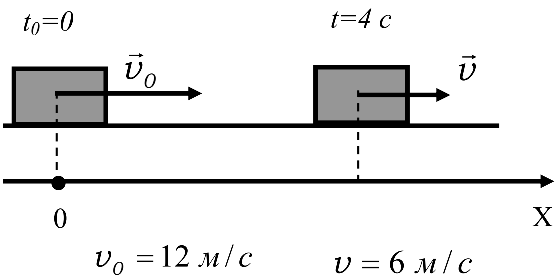
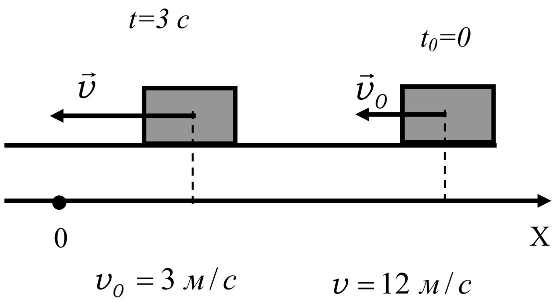
1. Найдите, как мгновенная скорость и мгновенное ускорение прямолинейного движения зависят от времени, если путь зависит от времени как функция:
   - $S(t) = 9t \quad (м)$;
   - $S(t) = 3t^2 + 7t \quad (м)$;
   - $S(t) = 10t + 4t^2 \quad (м)$;
   - $S(t) = -6t^2 + 2t \quad (м)$;
   - $S(t) = -2t^2 + 10t \quad (м)$.

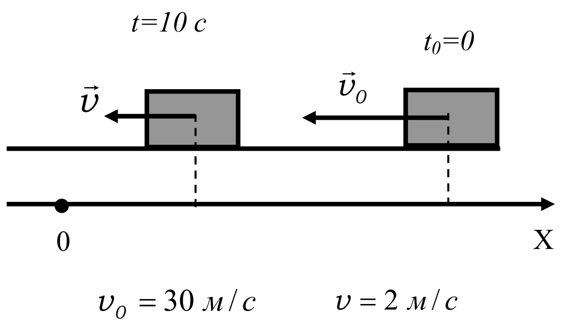
2. Пройденный путь зависит от времени по закону $S(t) = 8t - 4t^2 \quad (м)$. Найдите закон изменения мгновенной

скорости тела. Найдите модуль мгновенного ускорения тела. В какой момент тело остановится? Какой путь пройдет до остановки?

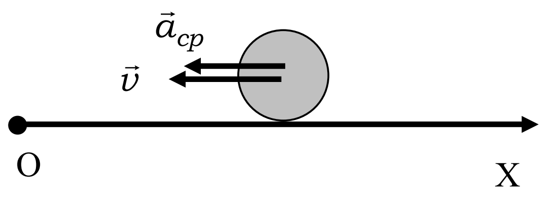
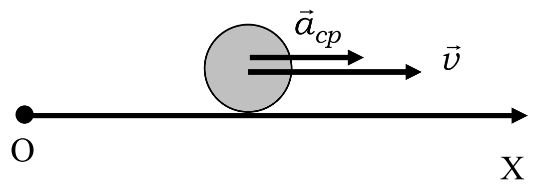
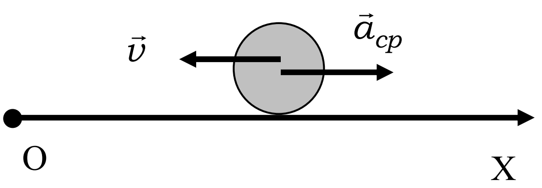
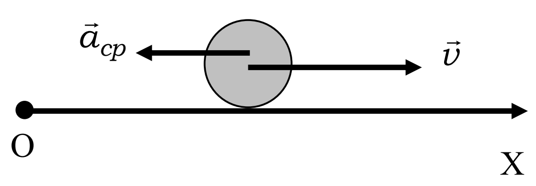
3. За 5 секунд скорость тела изменилась от 72 *км/час* до 36 *км/час*. Найти среднее ускорение тела. Как двигалось тело?

Упражнение 5. *Посмотрите на рисунки. Определите среднее ускорение тел, изображенных на рисунках. Покажите на рисунках направление вектора среднего ускорения. Сделайте надписи к рисункам.*

	В каком направлении движутся тела? Какое это движение?
	
	
	

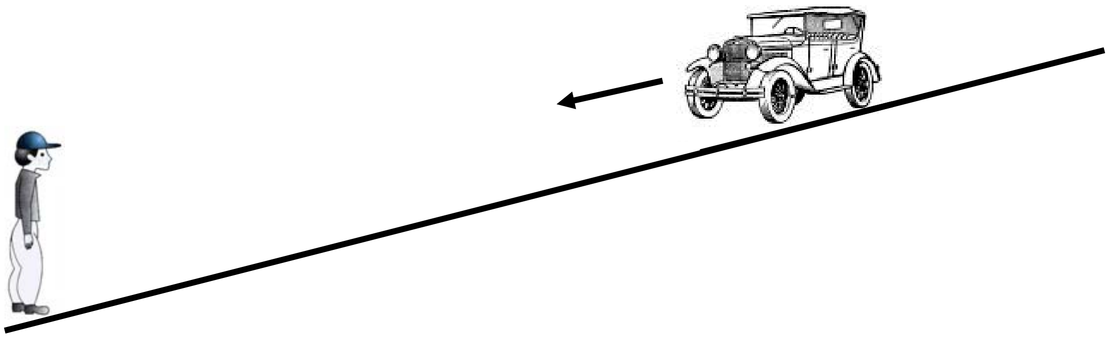
<table>
<tr>
<td>
</td>
<td></td>
</tr>
</table>

<u>Упражнение 6.</u> *Сделайте надписи к рисункам.*

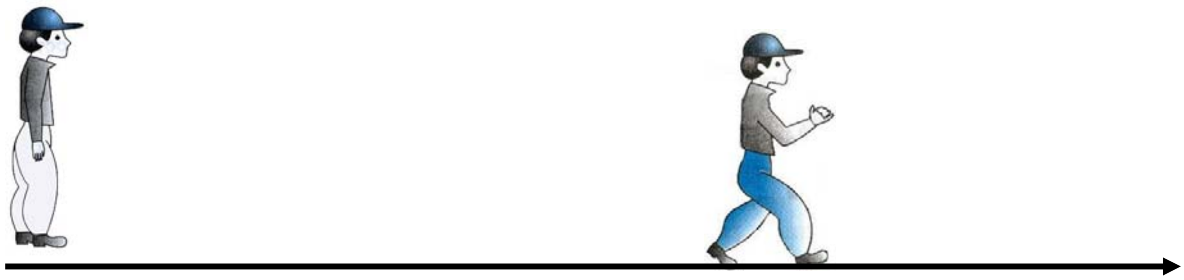
<table>
<tr>
<td></td>
<td>В каком направлении движется тело? Как движется тело? Как изменяется скорость тела?</td>
</tr>
<tr>
<td>
</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>
</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>
</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>
</td>
<td></td>
</tr>
</table>

<u>Упражнение 7.</u> *Придумайте, запишите условие и решите задачу.*

а) Найти ускорение автомобиля, если он движется замедленно в направлении, указанном на рисунке.



б) Найти ускорение человека, если он движется ускоренно в направлении, указанном на рисунке.



ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. **Ускорение –** это физическая векторная величина, которая показывает, как быстро изменяется скорость за единицу времени.
2. Ускорение – это ***<u>характеристика быстроты изменения скорости по модулю и по направлению</u>***.
3. **Средним ускорением тела** $\vec{a}_{cp}$ называется отношение изменения скорости ко времени, за которое это изменение произошло.

$$\vec{a}_{cp} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}.$$

4. Направление вектора среднего ускорения совпадает с направлением вектора изменения скорости $\Delta\vec{v}$.

5. Если тело движется ускоренно в положительном направлении оси ОХ, то вектор среднего ускорения $\vec{a}_{cp}$ и вектор скорости $\vec{v}$ направлены одинаково (в положительном направлении оси ОХ). ***Вектор*** $\vec{v}$ показывает направление движения, а вектор $\vec{a}_{cp}$ показывает, как (ускоренно) движется тело.
6. Если тело движется замедленно в положительном направлении оси ОХ, то вектор среднего ускорения $\vec{a}_{cp}$ и вектор скорости $\vec{v}$ направлены противоположно (скорость направлена по оси ОХ, а ускорение против оси ОХ). ***Вектор*** $\vec{v}$ показывает направление движения, а вектор $\vec{a}_{cp}$ показывает, как (замедленно) движется тело.
7. **Мгновенное ускорение –** это среднее ускорение тела за очень маленький интервал времени.
8. Ускорение точки в момент времени t равно пределу среднего ускорения $\vec{a}_{cp}$ при неограниченном уменьшении промежутка времени Δt к нулю (при $\Delta t \to 0$).

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{v}'.$$

9. **Мгновенное ускорение** – это первая производная скорости по времени.
10. Ускорение (мгновенное ускорение) – ***<u>векторная величина</u>***. Вектор ускорения $\vec{a}$ направлен по вектору изменения скорости $d\vec{v}$ или $\vec{a} \uparrow\uparrow d\vec{v}$
11. Мгновенное ускорение – это первая производная скорости по времени.

$$\vec{v} = v_x \vec{\ell}_x + v_y \vec{\ell}_y + v_z \vec{\ell}_z$$

Проекции вектора ускорения $\vec{a}$ на оси координат равны первым производным по времени от соответствующих проекций скорости

$$a_x = \frac{dv_x}{dt},\ a_y = \frac{dv_y}{dt},\ a_z = \frac{dv_z}{dt}.$$

Модуль вектора ускорения $\vec{a}$ равен $a = |\vec{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$.

12. Для **ускоренного** движения направление мгновенного ускорения и мгновенной скорости совпадают $\vec{a} \uparrow\uparrow \vec{v}$.

Для **замедленного** движения направление мгновенного ускорения и мгновенной скорости противоположны $\vec{a}\ \uparrow\downarrow \vec{v}$.

13. Кинематические уравнения движения в векторной форме:

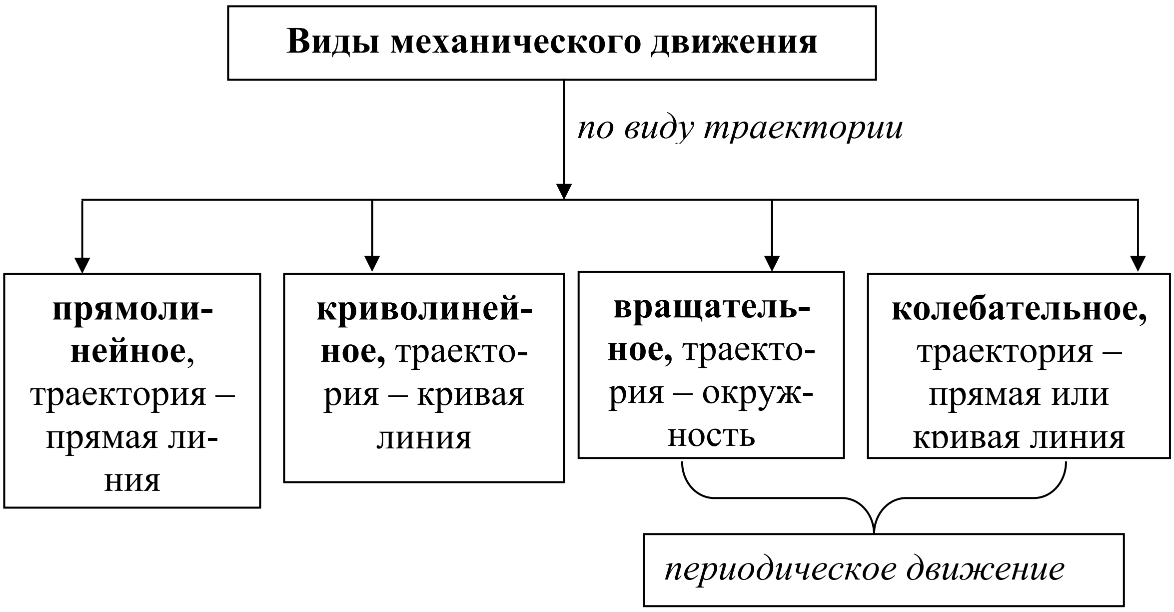
$$\left.\begin{aligned} \vec{r} &= \vec{r}_0 + \Delta\vec{r} \\ \vec{v} &= \vec{v}_0 + \vec{a}_{cp}\Delta t \end{aligned}\right\}$$

ТЕМА 3. **ВИДЫ МЕХАНИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ**

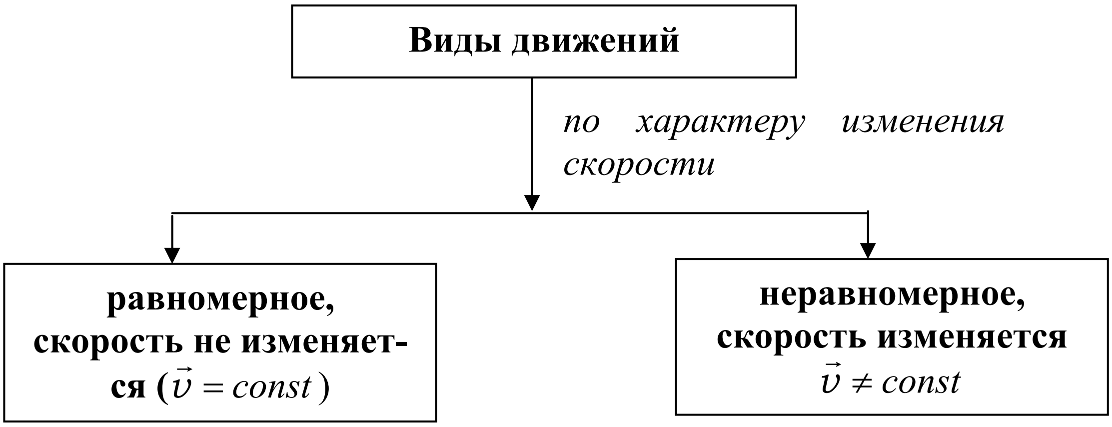
Новые слова и словосочетания

форма	вид
по форме	по виду
по характеру	по характеру изменения
равномерный	неравномерный
классифицировать	классификация
вращение	вращательное
колебания	колебательное

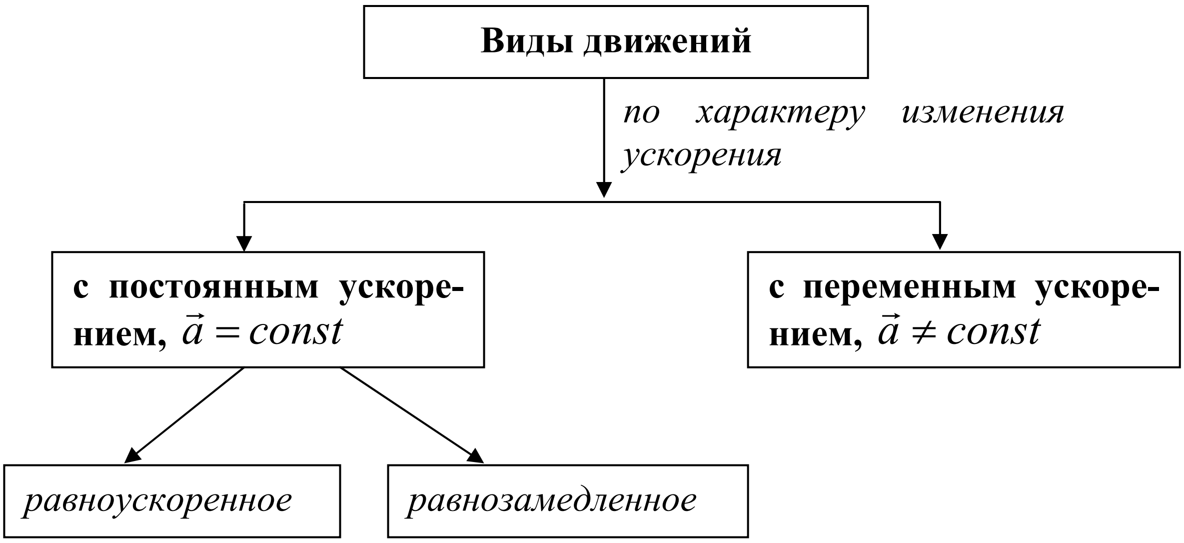
По форме (виду) траектории различают **прямолинейное и криволинейное движение**. Если траектория – ***прямая линия***, то движение ***прямолинейное***. Если траектория – ***кривая линия***, то движение ***криволинейное***.



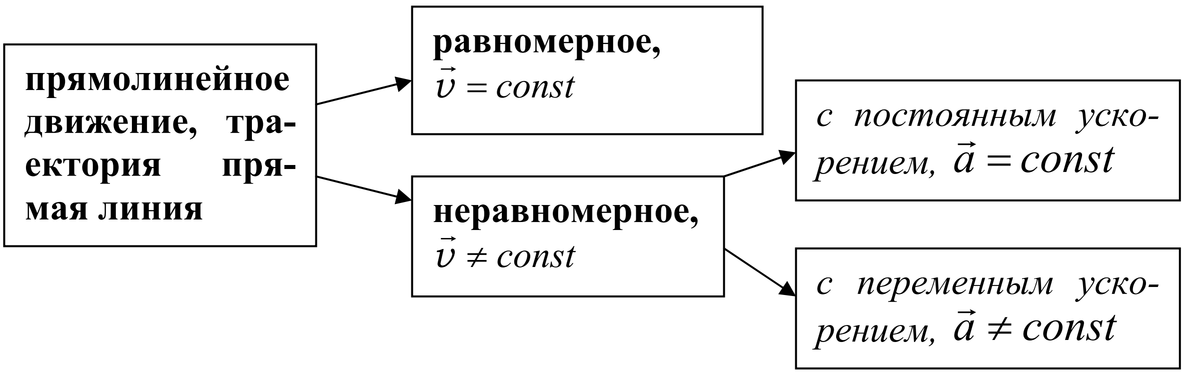
Когда тело движется, величина его скорости изменяется ($\vec{v} \neq const$) или не изменяется ($\vec{v} = const$). **По характеру изменения скорости** движение может быть **равномерным** ($\vec{v} = const$) **и неравномерным** ($\vec{v} \neq const$) **(переменным).**



По характеру изменения ускорения движение может быть: движение с постоянным ускорением (ускоренное или замедленное движение) и движение с переменным ускорением.



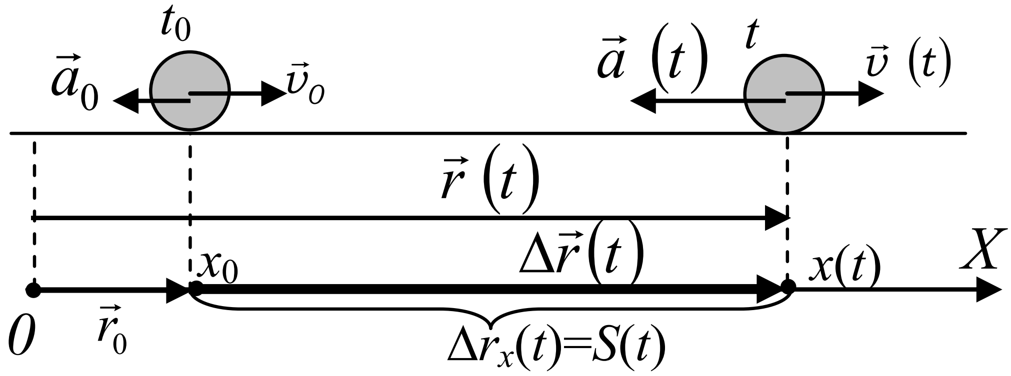
<u>Пример:</u> прямолинейное движение автомобиля по дороге.



Положение тела в любой момент времени t определяется радиус-вектором $\vec{r}$, координатой x. Движение тела характеризуется физическими величинами: перемещением $\Delta\vec{r}$, скоростью $\vec{v}$, ускорением $\vec{a}$, изменением координаты.

При движении тела изменяются все величины, которые характеризуют движение тела – перемещение, путь, скорость, ускорение и так далее. Все эти характеристики зависят от времени: $\vec{r}(t), \Delta\vec{r}(t)$, $\vec{v}(t)$, $\vec{a}(t)$,

Пример.



На рисунке тело движется прямолинейно в положительном направлении оси OX. В момент времени $t_0 = 0$ положение тела определяется радиус-вектором $\vec{r}_0$, координатой x_0, скоростью $\vec{v}_0$ и ускорением $\vec{a}_0$. Тело движется, в результате радиус-вектор, координата, скорость, ускорение, путь изменяются со временем. Они зависят от времени. Можно сказать, что радиус-вектор, перемещение, координата, скорость, ускорение, путь – это функции времени.

Говорят, что

$\Delta\vec{r}(t)$ – вектор перемещения тела зависит от времени или вектор перемещения – это функция времени;

$\vec{v}(t)$ – вектор скорости тела зависит от времени или вектор скорости тела – это функция времени;

$\vec{a}(t)$ – вектор ускорения тела зависит от времени или вектор ускорения – это функция времени;

$x(t)$ – координата тела зависит от времени или координата – это функция времени;

$S(t)$ – путь зависит от времени или путь – это функция времени.

ЗАПОМНИТЕ!

Формулы, которые определяют как перемещение, скорость, ускорение и другие величины зависят от времени, называются уравнениями движения

Наглядно показать, как величина зависит от времени можно на графике движения.

Графики движения – это линии, которые показывают, как координата, скорость, ускорение и другие величины зависят от времени.

ТЕМА 4. **РАВНОМЕРНОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ**

4.1. **Прямолинейное движение**

Новые слова и словосочетания

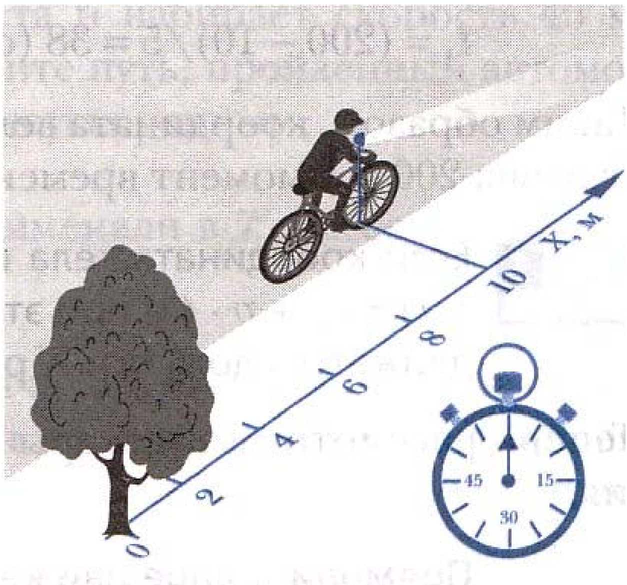
равномерное	прямолинейное
неравномерное	константа
переменное	зависимость линейная
анализ	анализировать

Равномерное движение – это такое движение, при котором модуль и направление скорости не изменяется $\vec{v} = const$. Если скорость во всех точках траектории одинаковая или скорость во всех точках траектории постоянная (скорость во всех точках $\vec{v} = const$), то это движение равномерное. Равномерное движение – это движение без ускорения, значит $\vec{a} = 0$.

Неравномерное (переменное) движение – это такое движение, при котором модуль и направление скорости изменяется во времени, $\vec{v} \neq const$. Скорость тела во всех точках траектории разная или скорость во всех точках траектории не постоянная (скорость в любой момент времени разная), то это движение с переменной скоростью или движение с ускорением.

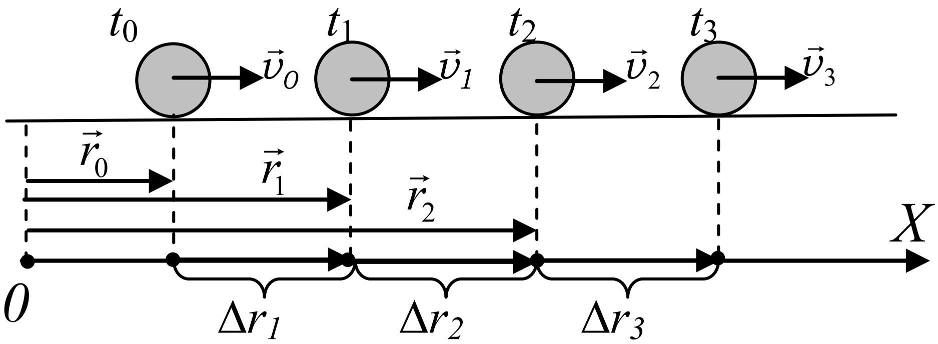
Равномерное движение – это такое движение, при котором	**Неравномерное (переменное) движение – это такое движение, при котором**
1. скорость тела в любой момент времени постоянная величина $v = const$,	1. скорость тела в любой момент времени не постоянная величина, $v \neq const$, тело движется с ускорением
2. скорость тела во всех точках траектории постоянная величина $v = const$,	2. скорость тела в разных точках траектории различна, $v \neq const$, тело движется с ускорением

Равномерное движение – это такое движение, при котором	**Неравномерное (переменное) движение – это такое движение, при котором**
3. направление вектора скорости за время движения не изменяется, мгновенная скорость равна средней скорости перемещения $\vec{v} = \vec{v}_{cp} = const$,	3. направление вектора скорости за время движения изменяется, мгновенная скорость не равна средней скорости перемещения $\vec{v} \neq \vec{v}_{cp} \neq const$,
4. за равные промежутки времени тело имеет равные перемещения.	4. за равные промежутки времени тело имеет разные перемещения.



Равномерное <u>прямолинейное</u> движение – это движение <u>по прямой линии</u> с постоянной скоростью

Рассмотрим прямолинейное равномерное движение тела в одномерной системе отсчета. Пусть тело движется прямолинейно по оси *OX*.



В момент времени t_0 положение тела определяется радиус-вектором $\vec{r}_0$, в этой точке траектории мгновенная скорость тела равна $\vec{\upsilon}_0$.

В момент времени t_1 – радиус-вектором $\vec{r}_1$, в этой точке траектории мгновенная скорость тела равна $\vec{\upsilon}_1$.

В момент времени t_2 – радиус-вектором $\vec{r}_2$, в этой точке траектории мгновенная скорость тела равна $\vec{\upsilon}_2$ и так далее.

Положение тела в любой (произвольный) момент времени t определяется радиус-вектором $\vec{r}$, в этот момент времени мгновенная скорость тела равна $\vec{\upsilon}$.

Тогда за промежуток времени $\Delta t_1 = t_1 - t_0$ радиус-вектор изменился на величину $\Delta\vec{r}_1 = \vec{r}_1 - \vec{r}_0$. За промежуток времени $\Delta t_2 = t_2 - t_1$ радиус-вектор изменился на величину $\Delta\vec{r}_2 = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$, и так далее. За промежуток времени Δt радиус-вектор изменился на $\Delta\vec{r}$.

Если за одинаковые промежутки времени $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3 = ... = \Delta t$, тело имеет одинаковые перемещения $\Delta\vec{r}_1 = \Delta\vec{r}_2 = \Delta\vec{r}_3 = ... = \Delta\vec{r}$, то тело движется с постоянной средней скоростью. Тело движется равномерно.

$$\vec{\upsilon}_{cp} = \frac{\Delta\vec{r}_1}{\Delta t_1} = \frac{\Delta\vec{r}_2}{\Delta t_2} = \frac{\Delta\vec{r}_3}{\Delta t_3} = ... = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}, \textbf{ или } \vec{\upsilon}_{cp} = const\textbf{.}$$

Если тело движется равномерно, то средняя скорость во всех точках траектории в любой момент времени постоянна. **Значит средняя скорость за бесконечно малый промежуток времени (мгновенная скорость) равна средней скорости тела** $\vec{\upsilon} = \lim\limits_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \lim\limits_{\Delta t \to 0} \vec{\upsilon}_{cp}$**.**

$\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_{cp} = const$ **(средняя и мгновенная скорости равны).**

При равномерном движении скорость тела в каждой точке постоянная величина: $\vec{\upsilon}_0 = \vec{\upsilon}_1 = \vec{\upsilon}_2 = \vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_{cp}$ – скорости равны (скорость тела не изменилась, скорость тела постоянна или $\vec{\upsilon} = const$, скорость равна константе). Ускорение тела $\vec{a} = 0$.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

При равномерном движении направление скорости совпадает с направлением перемещения.

Равномерное прямолинейное движение это когда:

1. $\vec{\upsilon} = const$ – мгновенная скорость во всех точках траектории одинаковая.

2. $\left.\begin{array}{l} \Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3 = \Delta t \\ \Delta \vec{r}_1 = \Delta \vec{r}_2 = \Delta \vec{r}_3 = \Delta \vec{r} \end{array}\right\}$ – за равные промежутки времени тело совершает равные перемещения.

3. $\vec{a} = 0$ – ускорение тела равно нулю в любой момент времени, в любой точке траектории.

4.2. <u>Уравнение вектора перемещения</u>

<u>Средняя скорость перемещения (средний вектор скорости</u> $\vec{\upsilon}_{cp}$) это есть отношение перемещения $\Delta\vec{r}$ к промежутку времени Δt, за который это перемещение произошло: $\vec{\upsilon}_{cp} = \dfrac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$. Тогда вектор перемещения равен $\Delta\vec{r} = \vec{\upsilon}_{cp}\Delta t = \vec{\upsilon}\Delta t$. Так как $\Delta\vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_0$, то $\vec{r} - \vec{r}_0 = \vec{\upsilon}\Delta t$, или $\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{\upsilon}\Delta t$ **– это уравнение радиус-вектора.**

Кинематические уравнения равномерного движения в векторном виде:

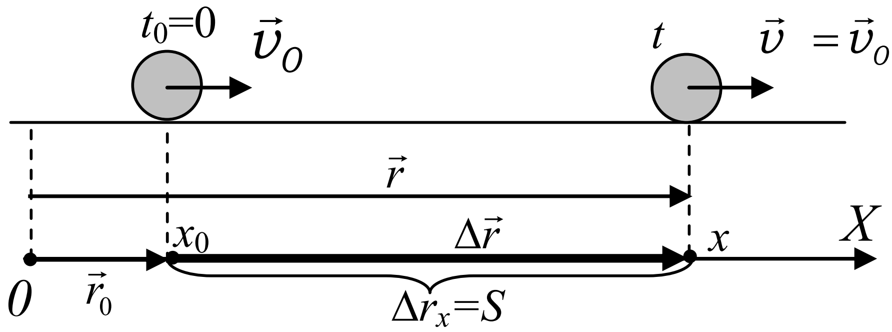
$\vec{\upsilon} = const$ **– уравнение скорости;**
$\vec{a} = 0$ **– уравнение ускорения;**
$\Delta\vec{r} = \vec{\upsilon}_{cp}\Delta t = \vec{\upsilon}\Delta t$ **– уравнение вектора перемещения;**
$\vec{r} = \vec{r}_0 + \Delta\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{\upsilon}\Delta t$ **– уравнение радиус-вектора.**

ЗАПОМНИТЕ!

Уравнения движения – это формулы, которые показывают, как перемещение, скорость и другие величины зависят от времени.

4.3. Уравнение проекции вектора перемещения на направление движения

Рассмотрим прямолинейное равномерное движение тела в одномерной системе отсчета. Пусть тело движется прямолинейно в положительном направлении оси OX (по оси OX).



Кинематические уравнения равномерного движения в векторном виде:

$\vec{\upsilon} = const$ – **уравнение скорости;**

$\vec{a} = 0$ – **уравнение ускорения;**

$\Delta\vec{r} = \vec{\upsilon}_{cp}\Delta t = \vec{\upsilon}\Delta t$ – **уравнение вектора перемещения;**

$\vec{r} = \vec{r}_0 + \Delta\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{\upsilon}\Delta t$ – **уравнение радиус-вектора.**

Запишем кинематические уравнения движения в проекции на ось *OX:*

$\upsilon_x = const$ – **уравнение проекции скорости на ось *OX,***

$a_x = 0$ – **уравнение проекции ускорения на ось *OX***,

$\Delta r_x = \upsilon_x \Delta t$ – **уравнение проекции вектора перемещения на ось *OX,***

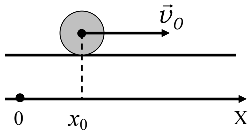
$r_x = r_{0x} + \Delta r_x = r_{0x} + \upsilon_x \Delta t$ – **уравнение проекции радиус-вектора на ось *OX.***

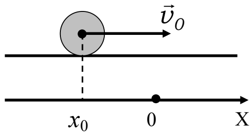
На рисунке тело движется в положительном направлении оси *OX*. В момент времени t_0 проекция радиус-вектора $\vec{r}_0$ на ось *OX* равна $r_{0x} = x_0$. А момент времени t проекция радиус-вектора $\vec{r}$ на ось OX равна $r_x = x$.

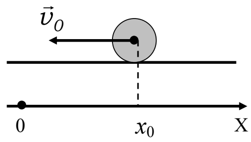
Тогда за промежуток времени $\Delta t = t - t_0$ координата тела изменилась на величину $\Delta x = x - x_0$ и уравнение проекции радиус-вектора и уравнение проекции вектора перемещения на ось *OX* можно записать в виде:

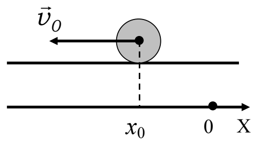
$$\begin{aligned} x &= x_0 + \upsilon_x \Delta t \\ \Delta r_x &= x - x_0 = \upsilon_x \Delta t \end{aligned}$$ – **кинематические уравнения координаты.**

Рассмотрим возможные случаи равномерного прямолинейного движения тела и запишем уравнение проекции скорости и координаты от времени движения.

<table>
<tr><td colspan="2">Равномерное прямолинейное движение в положительном направлении оси ОХ:
$\vec{\upsilon} = const = \vec{\upsilon}_0$.</td><td colspan="2">Равномерное прямолинейное движение в отрицательном направлении оси ОХ:
$\vec{\upsilon} = const = \vec{\upsilon}_0$.</td></tr>
<tr><td>

Уравнение скорости в проекции на ось OX:
$\upsilon_x = const = \upsilon_0$</td><td>

Уравнение скорости в проекции на ось OX:
$\upsilon_x = const = \upsilon_0$</td><td>

Уравнение скорости в проекции на ось OX:
$\upsilon_x = const = -\upsilon_0$</td><td>

Уравнение скорости в проекции на ось OX:
$\upsilon_x = const = -\upsilon_0$</td></tr>
<tr><td colspan="4">Уравнение радиус-вектора в векторном виде: $\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{\upsilon}\Delta t$</td></tr>
<tr><td colspan="4">Уравнение вектора перемещения в векторном виде: $\Delta\vec{r} = \vec{\upsilon}\Delta t$</td></tr>
<tr><td>Уравнение проекции перемещения тела на ось OX:
$\Delta r_x = \upsilon_x \Delta t$
$r_x = r_{0x} + \upsilon_x \Delta t$

Уравнение координаты:
$x = x_0 + \upsilon_x \Delta t$

$\upsilon_x = \upsilon_0$
$x_0 > 0$
$x = x_0 + \upsilon_0 \cdot \Delta t$</td><td>Уравнение проекции перемещения тела на ось OX:
$\Delta r_x = \upsilon_x \Delta t$
$r_x = r_{0x} + \upsilon_x \Delta t$

Уравнение координаты:
$x = x_0 + \upsilon_x \Delta t$

$\upsilon_x = \upsilon_0$
$x_0 < 0$
$x = -x_0 + \upsilon_0 \cdot \Delta t$</td><td>Уравнение проекции перемещения тела на ось OX:
$\Delta r_x = \upsilon_x \Delta t$
$r_x = r_{0x} + \upsilon_x \Delta t$

Уравнение координаты:
$x = x_0 + \upsilon_x \Delta t$

$\upsilon_x = -\upsilon_0$
$x_0 > 0$
$x = x_0 - \upsilon_0 \cdot \Delta t$</td><td>Уравнение проекции перемещения тела на ось OX:
$\Delta r_x = \upsilon_x \Delta t$
$r_x = r_{0x} + \upsilon_x \Delta t$

Уравнение координаты:
$x = x_0 + \upsilon_x \Delta t$

$\upsilon_x = -\upsilon_0$
$x_0 < 0$
$x = -x_0 - \upsilon_0 \cdot \Delta t$</td></tr>
<tr><td colspan="4">Уравнение координаты, общее для всех рассмотренных случаев движения тел
$$x = \pm x_0 \pm \upsilon_0 \Delta t$$</td></tr>
</table>

При прямолинейном движении **путь, пройденный телом за время движения равен модулю проекции вектора перемещения** $|\Delta\vec{r}_x| = |\upsilon_x \cdot \Delta t|$ или $S = |\pm \upsilon_0 \cdot \Delta t|$

<u>УПРАЖНЕНИЯ</u>

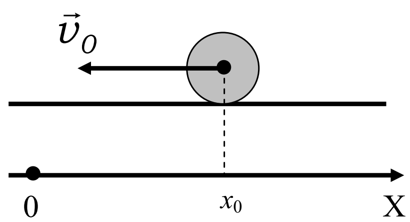
<u>Упражнение 1.</u> *Слушайте и повторяйте слова и словосочетания.*

Движение, прямолинейное движение, прямолинейное равномерное движение, совершать, совершить, постоянный, переменный, определить, сравнить, сравнение, выражать, выразить, совпадать.

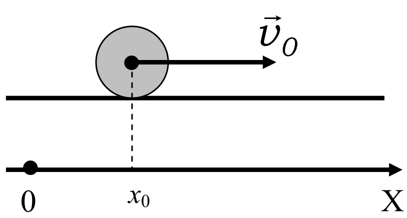
Движение, равномерное прямолинейное движение вдоль оси, движение по плоскости, движение в пространстве. Уравнение движения, уравнение движения в векторной форме, уравнение движения в векторном виде, уравнение движения в скалярной форме, уравнение проекции скорости, уравнение координаты.

<u>Упражнение 2.</u> *Сделайте надписи к рисункам. Запишите уравнения проекции скорости, координаты и пути от времени движения тел, изображенных на рисунках.*

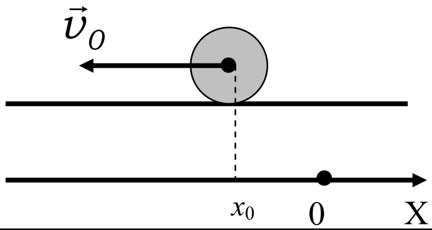
1.



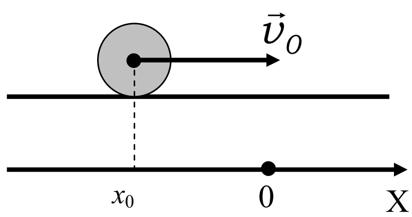
2.



3.



4.



<u>Упражнение 3.</u> *Решите задачу. Сделайте рисунок.*

Тело движется равномерно со скоростью 2 *м/с* в положительном направлении оси *OX*. Начальная координата тела равна нулю. Напишите уравнения проекции скорости, координаты и пути тела от времени движения. Определите координату тела через 10 *с* после начала движения. Определите путь, пройденный телом за 15 *с* движения.

Упражнение 4. *Решите задачу. Сделайте рисунок.*

Тело движется равномерно в отрицательном направлении оси ОХ. Начальная координата тела 20 м, начальная скорость тела 50 м/с. Чему равна координата тела в момент времени 250 с? Какой путь пройдет тело до этого момента времени?

Упражнение 5. *Решите задачу. Сделайте рисунок.*

Два тела начинают двигаться одновременно по оси *OX* навстречу друг другу. Начальная координата первого тела $x = 0$, скорость первого тела $\upsilon_{01} = 10$ *м/с*. Начальная координата второго тела равна $x = 50$ *м*, скорость второго тела $\upsilon_{02} = 5$ *м/с*. Напишите уравнение координат обоих тел. Через сколько времени тела встретятся? Какой путь пройдет каждое тело до встречи? Определите координату места встречи.

Упражнение 6. *Решите задачу. Сделайте рисунок.*

Два тела начинают двигаться одновременно по оси *OX* в положительном направлении. Начальная координата первого тела $x = 0$, скорость первого тела $\upsilon_{01} = 30$ *м/с*. Начальная координата второго тела $x = 10$ *м*, скорость второго тела $\upsilon_{02} = 10$ *м/с*. Напишите уравнение координат обоих тел. Через сколько времени первое тело догонит второе? Найдите координату в этот момент времени. Какой путь проходит каждое тело за это время?

Упражнение 7. *Решите задачу. Сделайте рисунок.*

Уравнение координаты тела имеет вид $x = -10 + 2t\,(м)$. Найдите положение тела в начальный момент времени. С какой скоростью и в каком направлении движется тело? Через сколько времени после начала движения координата тела будет равна 50 *м*?

Упражнение 8. *Решите задачу. Сделайте рисунок.*

Даны уравнения координаты нескольких тел относительно одной системы отсчета:

$x_1 = 5\,t\ (м)$; $x_2 = 10\,t\ (м)$; $x_3 = -10t\ (м)$; $x_4 = 4\ (м)$; $x_5 = -4 + 5\,t\ (м)$.

Определите характер движения тел. Напишите уравнения проекции скорости тел. Определите начальные координаты тел. Какое из тел пройдет больший путь за 20 *с* движения?

4.4. Графики зависимости проекции скорости и координаты от времени движения

Графики движения – это линии, которые показывают как координата, проекция скорости и ускорения зависят от времени движения.

Если момент времени $t_0 = 0$, тогда $\Delta t = t - t_0 = t$ и уравнения движения тела можно записать в виде:

Кинематические уравнения равномерного движения в векторном виде:

$\vec{v}(t) = const = \vec{v}_0$ – уравнение зависимости вектора скорости от времени;

$\Delta\vec{r}(t) = \vec{v}_{cp} t = \vec{v}_0 t$ – уравнение зависимости вектора перемещения от времени;

$\vec{r}(t) = \vec{r}_0 + \Delta\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 t$ – уравнение зависимости радиус-вектора от времени;

$\vec{a}(t) = 0$ – уравнение зависимости вектора ускорения от времени.

Кинематические уравнения движения в проекции на ось *OX:*

$v_x(t) = const = v_{0x}$ – уравнение зависимости проекции скорости на ось *OX* от времени,

$\Delta r_x(t) = v_{0x} t$ – уравнение зависимости проекции вектора перемещения на ось *OX* от времени,

$r_x(t) = r_{0x} + \Delta r_x = r_{0x} + v_{0x} t$ – уравнение зависимости проекции радиус-вектора на ось *OX* от времени,

$a_x(t) = 0$ – уравнение зависимости проекции вектора ускорения на ось *OX* от времени,

$x(t) = x_0 + v_{0x} t$

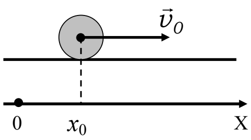
$\Delta r_x(t) = x - x_0 = v_{0x} t$ – уравнение зависимости координаты от времени,

$S(t) = |\pm v_0 t|$ – уравнение пути.

Проанализируем зависимости от времени физических величин, характеризующих равномерное прямолинейное движения.

При равномерном прямолинейном движении скорость тела не изменяется со временем $\vec{v}(t) = const = \vec{v}_0$, в любой момент времени скорость тела равна $\vec{v}_0$. Проекция скорости на ось OX тоже не изменяется со временем $v_x(t) = const = v_{0x}$. **График зависимости проекции скорости от времени движения – это прямая линия, параллельная оси времени.**

Проекция скорости v_x может быть положительной ($v_x > 0$) или отрицательной ($v_x < 0$) в зависимости от направления движения.

<table>
<tr><th colspan="2">Равномерное прямолинейное движение в положительном направлении оси ОХ:
$\vec{v}(t) = const = \vec{v}_0$.</th><th colspan="2">Равномерное прямолинейное движение в отрицательном направлении оси ОХ:
$\vec{v}(t) = const = \vec{v}_0$.</th></tr>
<tr>
<td>
Уравнение проекции скорости на ось OX:
$v_x(t) = const = v_{0x}$
$v_{0x} = v_0$

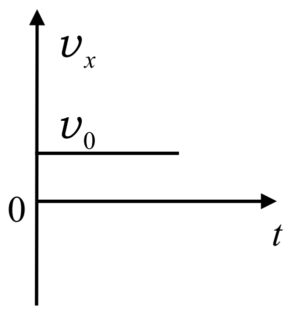
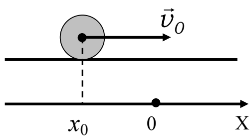



График зависимости проекции скорости от времени – это прямая линия, параллельная оси времени.</td>
<td>
Уравнение проекции скорости на ось OX:
$v_x(t) = const = v_{0x}$
$v_{0x} = v_0$

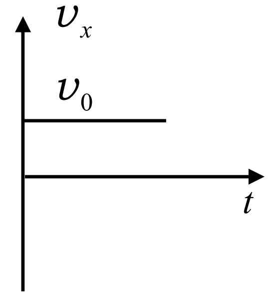
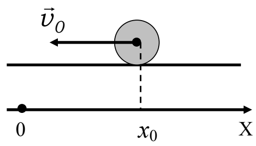



График зависимости проекции скорости от времени – это прямая линия, параллельная оси времени.</td>
<td>
Уравнение проекции скорости на ось OX:
$v_x(t) = const = v_{0x}$
$v_{0x} = -v_0$

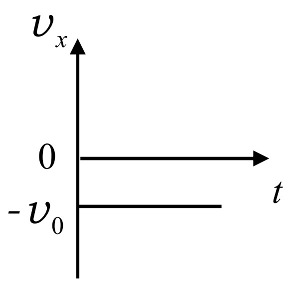
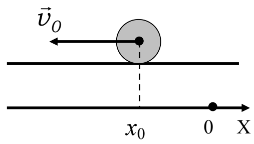



График зависимости проекции скорости от времени – это прямая линия, параллельная оси времени.</td>
<td>
Уравнение проекции скорости на ось OX:
$v_x(t) = const = v_{0x}$
$v_{0x} = -v_0$

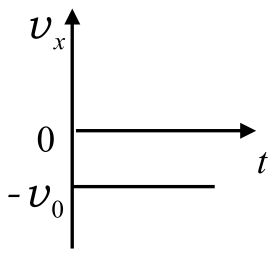
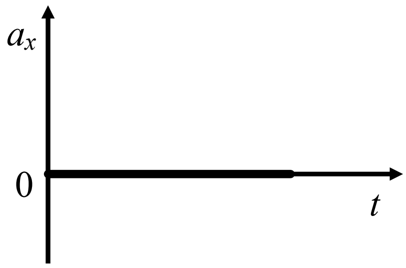



График зависимости проекции скорости от времени – это прямая линия, параллельная оси времени.</td>
</tr>
</table>

При равномерном прямолинейном движении ускорение тела не изменяется со временем $\vec{a}(t)=0$, проекция ускорения на ось OX тоже не изменяется $a_x(t)=0$. *Проекция ускорения равна нулю в любой момент времени.* График зависимости проекции ускорения от времени движения – это **прямая линия, которая совпадает с осью времени.**



Когда движение прямолинейное, уравнения зависимости проекции вектора перемещения от времени движения $\Delta r_x(t)=\upsilon_{0x}t$. Проекция вектора перемещения зависит от времени линейно (прямо пропорционально). **График зависимости проекции вектора перемещения от времени – это прямая линия, наклонная к оси времени и проходящая через начало координат. Наклон линии к оси времени зависит от направления и величины скорости движения тела.**

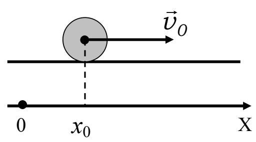
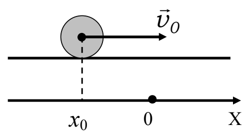
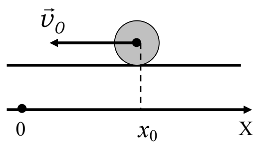
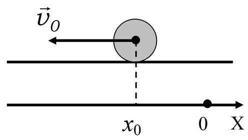
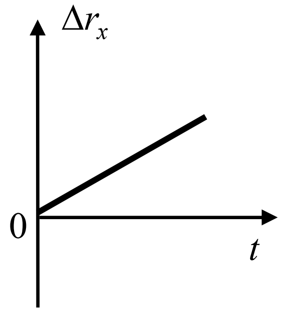
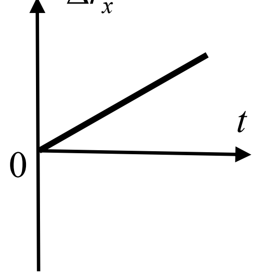
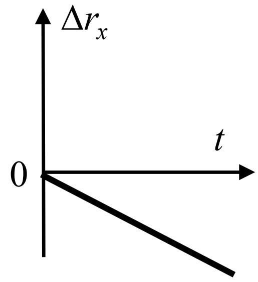
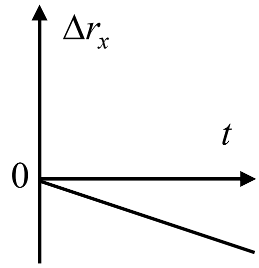
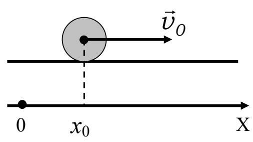
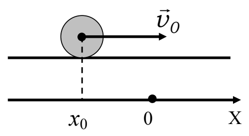
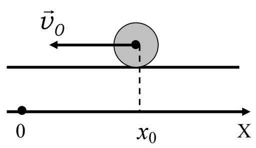
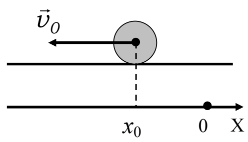
<table>
<tr><td colspan="2">Равномерное прямолинейное движение в положительном направлении оси OX: $\vec{\upsilon}(t)=const=\vec{\upsilon}_0$.</td><td colspan="2">Равномерное прямолинейное движение в отрицательном направлении оси OX: $\vec{\upsilon}(t)=const=\vec{\upsilon}_0$.</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="4">Уравнение вектора перемещения в векторном виде: $\Delta\vec{r}=\vec{\upsilon}t$</td></tr>
<tr><td>Уравнение проекции вектора перемещения тела на ось OX:
$\Delta r_x=\upsilon_{0x}t$
$\upsilon_{0x}=\upsilon_0$
</td><td>Уравнение проекции вектора перемещения тела на ось OX:
$\Delta r_x=\upsilon_{0x}t$
$\upsilon_{0x}=\upsilon_0$
</td><td>Уравнение проекции вектора перемещения тела на ось OX:
$\Delta r_x=\upsilon_{0x}t$
$\upsilon_{0x}=-\upsilon_0$
</td><td>Уравнение проекции вектора перемещения тела на ось OX:
$\Delta r_x=\upsilon_{0x}t$
$\upsilon_{0x}=-\upsilon_0$
</td></tr>
</table>

График проекции вектора перемещения – прямая наклонная линия, проходящая через начало координат.	График проекции вектора перемещения – прямая наклонная линия, проходящая через начало координат.	График проекции вектора перемещения – прямая наклонная линия, проходящая через начало координат.	График проекции вектора перемещения – прямая наклонная линия, проходящая через начало координат.

Уравнение зависимости проекции радиус-вектора и координаты от времени движения имеют одинаковый вид (одинаковую функциональную зависимость от времени): $r_x(t) = r_{0x} + \upsilon_{0x}t$ и $x(t) = x_0 + \upsilon_{0x}t$. Это тоже линейная зависимость. **График зависимости проекции радиус-вектора и координаты от времени движения – это прямая линия, наклонная к оси времени, не проходящая через начало координат. Наклон линии зависит от направления движения тела и от величины скорости.**

Равномерное прямолинейное движение в *положительном* направлении оси OX: $\vec{\upsilon}(t) = const = \vec{\upsilon}_0$.		**Равномерное прямолинейное** движение в *отрицательном* направлении оси OX: $\vec{\upsilon}(t) = const = \vec{\upsilon}_0$.	
			
Уравнение радиус-вектора в векторном виде: $\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{\upsilon}t$			
Уравнение проекции радиус-вектора на ось *OX:* $r_x(t) = r_{0x} + \upsilon_{0x}t$ Уравнение координаты: $x = x_0 + \upsilon_{0x}t$ $\upsilon_x = \upsilon_0$ $x_0 > 0$ $x = x_0 + \upsilon_0 \cdot t$	Уравнение проекции радиус-вектора на ось *OX:* $r_x(t) = r_{0x} + \upsilon_{0x}t$ Уравнение координаты: $x = x_0 + \upsilon_{0x}t$ $\upsilon_x = \upsilon_0$ $x_0 < 0$ $x = -x_0 + \upsilon_0 \cdot t$	Уравнение проекции радиус-вектора на ось *OX:* $r_x(t) = r_{0x} + \upsilon_{0x}t$ Уравнение координаты: $x = x_0 + \upsilon_{0x}t$ $\upsilon_x = -\upsilon_0$ $x_0 > 0$ $x = x_0 - \upsilon_0 \cdot t$	Уравнение проекции радиус-вектора на ось *OX:* $r_x(t) = r_{0x} + \upsilon_{0x}t$ Уравнение координаты: $x = x_0 + \upsilon_{0x}t$ $\upsilon_x = -\upsilon_0$ $x_0 < 0$ $x = -x_0 - \upsilon_0 \cdot t$

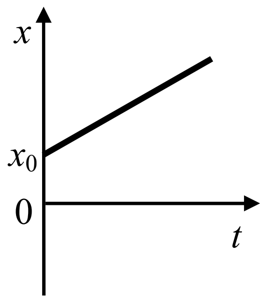
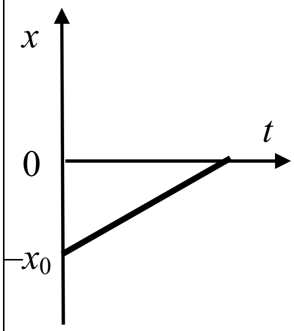
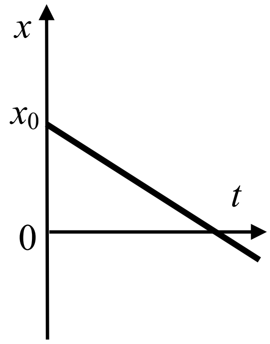
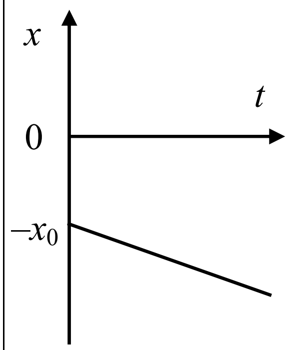
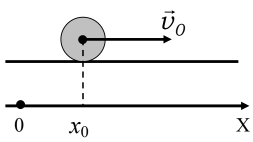
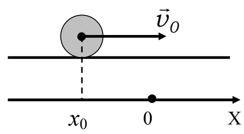
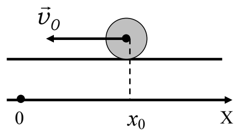
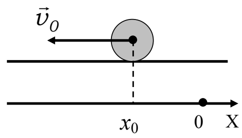
			

График координаты – прямая наклонная линия, не проходящая через начало координат.	График координаты – прямая наклонная линия, не проходящая через начало координат.	График координаты – прямая наклонная линия, не проходящая через начало координат.	График координаты – прямая наклонная линия, не проходящая через начало координат.

Уравнение зависимости пути от времени движения имеет вид $S = |\Delta \vec{r}_x| = |\upsilon_{0x} \cdot t|$. Это тоже линейная зависимость. **График зависимости пути от времени движения – это прямая линия, наклонная к оси времени, проходящая через начало координат. Наклон линии зависит от величины скорости.**

Равномерное прямолинейное движение в *положительном* направлении оси OX: $\vec{\upsilon} = const = \vec{\upsilon}_0$.		**Равномерное прямолинейное** движение в *отрицательном* направлении оси OX: $\vec{\upsilon} = const = \vec{\upsilon}_0$.	
			
Уравнение пути: $S = |\Delta \vec{r}_x| = |\upsilon_{0x} \cdot t|$			
Уравнение зависимости пути от времени: $S(t) = |\Delta \vec{r}_x| = |\upsilon_{0x} \cdot t|$ $\upsilon_{0x} = \upsilon_0$	Уравнение зависимости пути от времени: $S(t) = |\Delta \vec{r}_x| = |\upsilon_{0x} \cdot t|$ $\upsilon_{0x} = \upsilon_0$	Уравнение зависимости пути от времени: $S(t) = |\Delta \vec{r}_x| = |\upsilon_{0x} \cdot t|$ $\upsilon_{0x} = -\upsilon_0$	Уравнение зависимости пути от времени: $S(t) = |\Delta \vec{r}_x| = |\upsilon_{0x} \cdot t|$ $\upsilon_{0x} = -\upsilon_0$

$S(t) = \lvert \upsilon_0 t \rvert$	$S(t) = \lvert \upsilon_0 t \rvert$	$S(t) = \lvert -\upsilon_0 t \rvert$	$S(t) = \lvert -\upsilon_0 t \rvert$

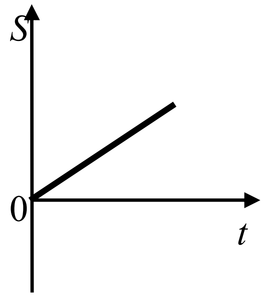
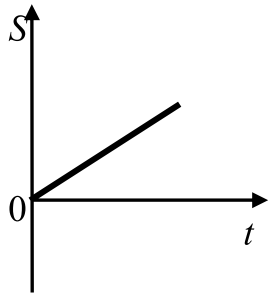
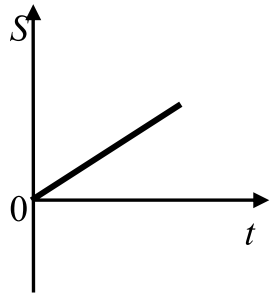
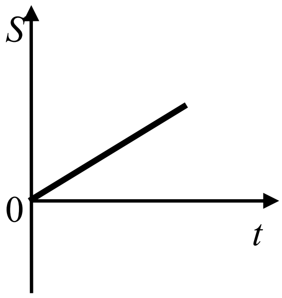

			

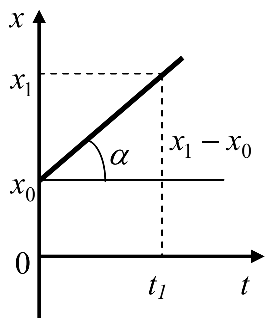
График пути – прямая наклонная линия, проходящая через начало координат.	График пути – прямая наклонная линия, проходящая через начало координат.	График пути – прямая наклонная линия, проходящая через начало координат.	График пути – прямая наклонная линия, проходящая через начало координат.

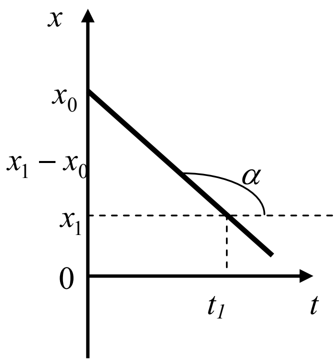
ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

1. График зависимости координаты от времени – это прямая линия, наклонная к оси времени.

По графику зависимости координаты от времени $\Delta r_x = x - x_0 = \pm\upsilon_0 t$ можно найти проекцию скорости. Проекция скорости численно равна тангенсу угла наклона прямой к оси времени $tg\alpha = \frac{\Delta r_x}{\Delta t} = \frac{\Delta r_x}{t} = \frac{x - x_0}{t} = \pm\upsilon_0$.

Можно определить как движется тело (в каком направлении – по оси OX или против оси OX).

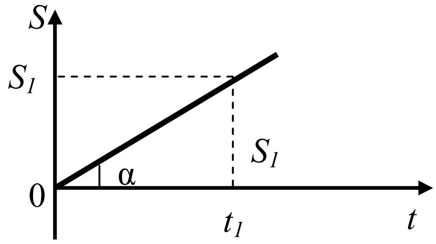




$tg\alpha = \frac{x_1 - x_0}{t_1 - t_0} = +\upsilon_0$ $\qquad$ $tg\alpha = \frac{x_1 - x_0}{t_1 - t_0} = -\upsilon_0$

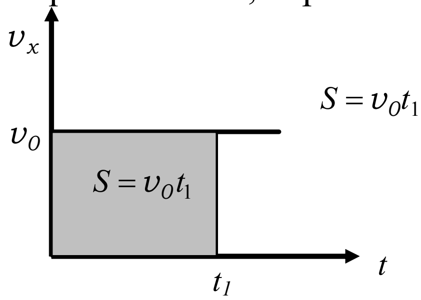
2. График зависимости пути от времени одинаковый для движения тела в положительном и отрицательном направлении оси *OX*.

По графику зависимости пути от времени $S(t) = \left|\pm \upsilon_0\right| t$ можно найти модуль проекции скорости движения тела. Модуль проекции скорости численно равен тангенсу угла наклона прямой к оси времени $tg\alpha = \dfrac{S}{t} = \left|\pm \upsilon_0\right|$



$$tg\alpha = \frac{S_1}{t_1} = \left|\pm \upsilon_0\right|$$

3. График зависимости проекции скорости от времени – это прямая линия, параллельная оси времени.



По графику зависимости проекции скорости от времени можно найти путь, пройденный телом за время движения. **Путь численно равен площади прямоугольника.**

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Если скорость тела $\vec{\upsilon} = const$, то такое движение **равномерное**.

Для равномерного движения средняя скорость = мгновенной скорости = const.

При равномерном движении направление скорости совпадает с направлением перемещения.

ЗАПОМНИТЕ!

Векторные кинематические уравнения прямолинейного равномерного движения:

$\vec{v} = const$ – уравнение скорости

$\Delta\vec{r} = \vec{v} \cdot t$ – уравнение вектора перемещения

$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v} \cdot t$ – уравнение радиус-вектора

Скалярные кинематические уравнения прямолинейного равнопеременного движения:

$v_x = const$ – уравнение проекции скорости на ось ОХ

$\Delta r_x = v_x \cdot t$ – уравнение проекции вектора перемещения на ось ОХ

$x = \pm x_0 \pm v_x \cdot t$ – уравнение координаты

$S = v_x \cdot t$ – уравнение пути.

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Слушайте и повторяйте слова и словосочетания.*

График, график зависимости, строить, построить, строить график, построить график, зависеть, зависимость. противоположный, параллельный, вычислять, вычислить, вычисление, считать, составлять, составить. откладывать, отложить, выбирать, выбрать масштаб, угол, горизонтальная ось, ось абсцисс, вертикальная ось, ось ординат.

График зависимости пути от времени, график зависимости координаты от времени, график зависимости проекции скорости от времени, построить график зависимости. Зависеть, зависимость пути от времени, зависимость координаты от времени, линейная зависимость, пропорциональная зависимость, обратно пропорциональная зависимость.

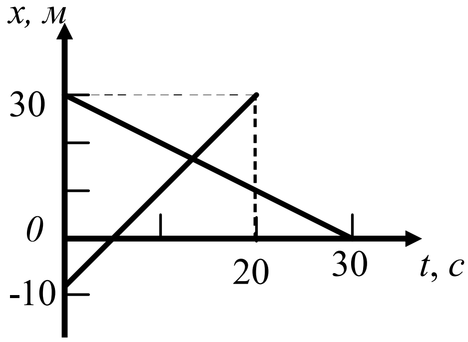
Упражнение 2. *Решите задачу.*

Два тела движутся навстречу друг другу. Первое тело имеет скорость v_0 = 3 м/с, второе тело имеет скорость v_0 = 2 м/с. В начальный момент времени расстояние между телами 150 м. Найти координату встречи, время встречи и путь каждого тела до встречи. Построить графики пути и координаты тел от времени. Определить по графику координату встречи и время встречи.

<u>Упражнение 3.</u> *Решите задачу.*

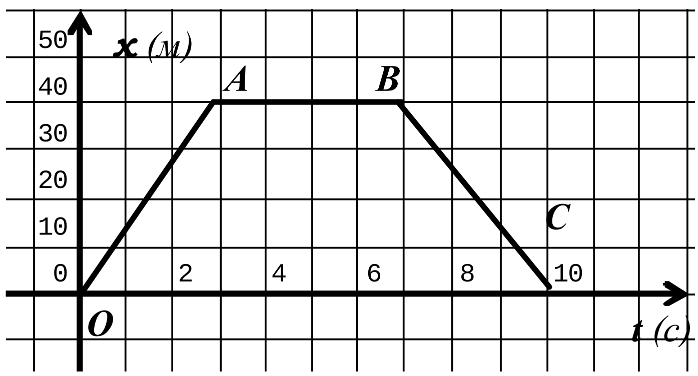
Даны уравнения движения нескольких тел относительно одной системы отсчета. $x_1 = 8t$; $x_2 = 15 - 4t$; $x_3 = -2 + 4t$; $x_4 = -1 - 5t$. Постройте графики зависимости координат и проекции скорости тел от времени движения.

<u>Упражнение 4.</u> *Решите задачу.*



Даны графики зависимости координаты от времени двух тел. Найдите начальную координату каждого тела, проекцию скорости. Постройте график проекции скорости от времени и определите путь, пройденный каждым телом до встречи.

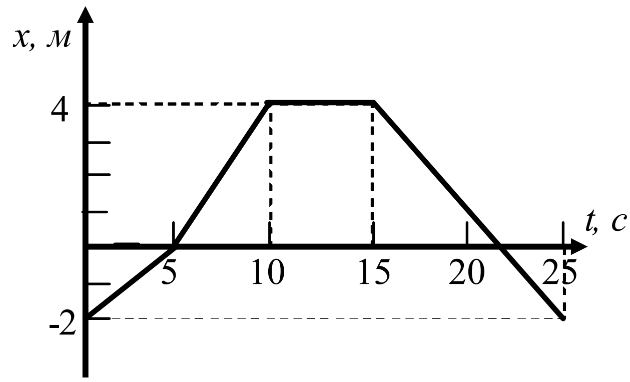
<u>Упражнение 5.</u> *Решите задачу.*



Дан график зависимости координаты от времени. Постройте графики проекции скорости и пути от времени. Найдите перемещение и путь за 3 с, 7 с, 10 с.

<u>Упражнение 6.</u> *Решите задачу.*

Дан график зависимости координаты от времени движения тела. Построить график зависимости проекции скорости и пути от времени. Найти перемещение и путь за 25 *с*.



<u>Упражнение 7.</u> *Решите задачи с использованием графиков.*

1. Тело движется равномерно в отрицательном направлении оси *OX*. Начальная координата тела 2 *м*, начальная скорость тела 5 *м/с*. Чему равна координата тела в этот момент времени 25 *с*? Какой путь пройдет тело до этого момента времени? Постройте графики пути, проекции скорости и координаты тела от времени. По графику скорости определить путь, пройденный телом за 10 *с*.

2. Два тела начинают двигаться одновременно по оси *OX* навстречу друг другу. Начальная координата первого тела $x = 0$, скорость первого тела $\upsilon_0 = 2$ *м/с*. Начальная координата второго тела равна $x = 5$ м, скорость второго тела $\upsilon_0 = 5$ *м/с*. Напишите уравнение координат обоих тел. Постройте графики пути, координаты и проекции скорости каждого тела. Через сколько времени тела встретятся? Какой путь пройдет каждое тело до встречи? Определите координату места встречи, используя графики.

3. Два тела начинают двигаться одновременно по оси *OX* в положительном направлении. Начальная координата первого тела $x = 0$, скорость первого тела $\upsilon_0 = 3$ *м/с*. Начальная координата второго тела $x = 10$ *м*, скорость второго тела $\upsilon_0 = 1$ *м/с*. Напишите уравнение координат обоих тел. Постройте графики пути, координаты и скорости каждого тела. Через сколько времени первое тело догонит второе? Найдите координату в этот момент времени. Какой путь проходит каждое тело за это время?

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. **Равномерное движение** – это такое движение, при котором модуль и направление скорости не изменяется $\vec{\upsilon} = const$.
2. **Неравномерное (переменное) движение** – это такое движение, при котором модуль и направление скорости изменяется во времени, $\vec{\upsilon} \neq const$.
3. Если за одинаковые промежутки времени $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3 = ... = \Delta t$, тело имеет одинаковые перемещения $\Delta \vec{r}_1 = \Delta \vec{r}_2 = \Delta \vec{r}_3 = ... = \Delta \vec{r}$, то тело движется с постоянной средней скоростью. Тело движется равномерно**.**
4. Кинематические уравнения равномерного движения в векторном виде:
   $\vec{\upsilon} = const$ – уравнение скорости;
   $\vec{a} = 0$ – уравнение ускорения;
   $\Delta \vec{r} = \vec{\upsilon}_{cp} \Delta t = \vec{\upsilon} \Delta t$ – уравнение вектора перемещения;
   $\vec{r} = \vec{r}_0 + \Delta \vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{\upsilon} \Delta t$ – уравнение радиус-вектора.
5. **Уравнения движения –** это формулы, которые показывают, как перемещение, скорость и другие величины зависят от времени.
6. Кинематические уравнения движения в проекции на ось *OX:*
   $\upsilon_x = const$ – уравнение проекции скорости на ось *OX,*
   $a_x = 0$ – уравнение проекции ускорения на ось *OX*,
   $\Delta r_x = \upsilon_x \Delta t$ – уравнение проекции вектора перемещения на ось *OX,*
   $r_x = r_{0x} + \Delta r_x = r_{0x} + \upsilon_x \Delta t$ – уравнение проекции радиус-вектора на ось *OX.*
   $$\begin{matrix} x = x_0 + \upsilon_x \Delta t \\ \Delta r_x = x - x_0 = \upsilon_x \Delta t \end{matrix}$$ – уравнение координаты.
7. $\upsilon_x(t) = const$ – уравнение зависимости проекции скорости на ось *OX* от времени,

$\Delta r_x(t) = \upsilon_x t$ – уравнение зависимости проекции вектора перемещения на ось *OX* от времени,

$r_x(t) = r_{0x} + \Delta r_x = r_{0x} + \upsilon_x t$ – уравнение зависимости проекции радиус-вектора на ось *OX* от времени,

$a_x(t) = 0$ – уравнение зависимости проекции вектора ускорения на ось *OX* от времени,

$$x(t) = x_0 + \upsilon_x t$$
$$\Delta r_x(t) = x - x_0 = \upsilon_x t$$
– уравнение зависимости координаты от времени.

ТЕМА 5. **РАВНОПЕРЕМЕННОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ**

Новые слова и словосочетания

равнопеременный	равнопеременно
равноускоренный	равноускоренно
равнозамедленный	равнозамедленно
неравномерный	неравномерно
переменный	

5.1. **Неравномерное движение**

Неравномерное (переменное) движение – это такое движение, когда скорость изменяется $\vec{\upsilon} \neq \text{const}$ (она переменная величина); ускорение не равно нулю $\vec{a} \neq 0$ (движение с ускорением).

За равные промежутки времени $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3 = \ldots = \Delta t_n$ тело совершает разные перемещения $\Delta\vec{r}_1 \neq \Delta\vec{r}_2 \neq \Delta\vec{r}_3 \neq \ldots \neq \Delta\vec{r}_n$.

Равнопеременным движением называется движение, при котором за любые ***равные промежутки времени скорость*** тела ***изменяется на одинаковую величину***. Равнопеременное движение – это переменное движение с постоянным ускорением $\vec{a} = const$. Равнопеременное движение – это движение с непостоянной скоростью, но с постоянным ускорением.

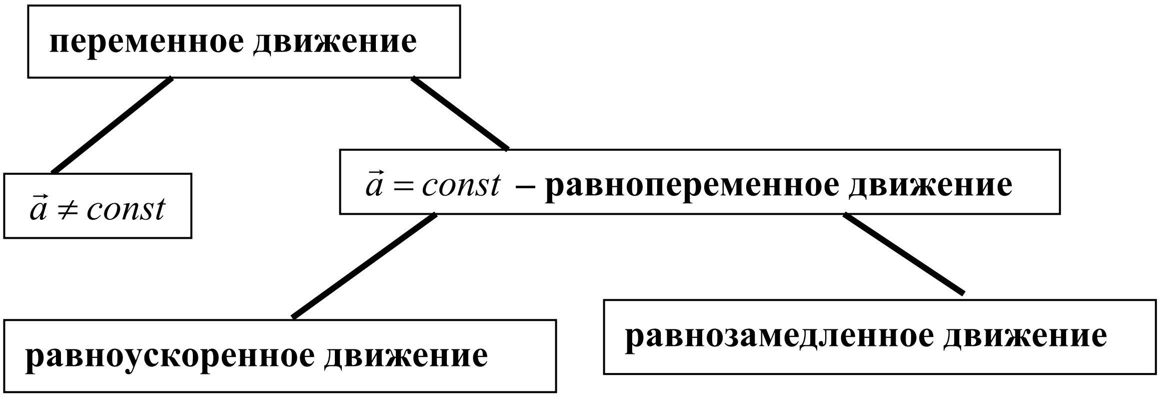
Поэтому равнопеременное движение можно характеризовать следующим образом: за равные промежутки времени $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3 = \ldots = \Delta t_n$ скорость изменяется на одинаковую величину $\Delta\vec{\upsilon}_1 = \Delta\vec{\upsilon}_2 = \Delta\vec{\upsilon}_3 = \ldots = \Delta\vec{\upsilon}_n$, ускорение – постоянная величина $\vec{a} = const$ (движение с постоянным ускорением). **Уравнение ускорения** $\vec{a}(t) = const = \vec{a}_0$ – **кинематическое уравнение равнопеременного движения.**

Если тело движется **равнопеременно**, то за любой промежуток времени Δt (и за $\Delta t \to 0$) изменение скорости одинаковое (одно и то же). Значит **мгновенное ускорение тела во всех точках траектории в любой момент времени постоянное и равно среднему ускорению тела,** $\vec{a} = \vec{a}_{cp} = const$**.**

Так как среднее ускорение – это физическая величина, равная отношению вектора изменения скорости к промежутку времени, за который это изменение произошло, то $\vec{a} = \vec{a}_{cp} = \dfrac{\Delta\vec{\upsilon}}{\Delta t}$. Отсюда $\vec{a} = \dfrac{\Delta\vec{\upsilon}}{\Delta t} = \dfrac{\vec{\upsilon} - \vec{\upsilon}_0}{\Delta t}$ или $\vec{\upsilon} - \vec{\upsilon}_0 = \vec{a}\cdot\Delta t$; $\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_0 + \vec{a}\Delta t$

$\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_0 + \vec{a}\Delta t$ – **это уравнение – кинематическое уравнение скорости равнопеременного движения.**

Когда скорость изменяется, она может увеличиваться или уменьшаться. Если скорость тела увеличивается, а ускорение – постоянная величина, такое движение ***равноускоренное***. Если скорость тела уменьшается, а его ускорение – постоянная величина, то такое движение ***равнозамедленное***.

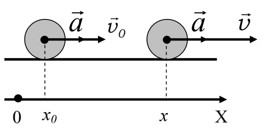
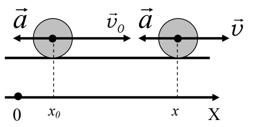
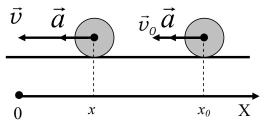
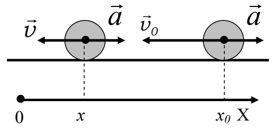


Прямолинейное равнопеременное движение

Траектория движения прямая линия.

Рассмотрим прямолинейное равнопеременное движение тела. Траектория движения – прямая линия. Рассмотрим движение тела в одномерной системе координат. Тело может двигаться в положительном и отрицательном направлении оси OX, равноускоренно или равнозамедленно. При этом ускорение тела остается постоянным в течение всего времени движения.

Пусть в момент времени t_0 скорость тела $\vec{\upsilon}_0$, тело находится в точке с координатой x_0. В момент времени t тело находится в точке с координатой x и имеет скорость $\vec{\upsilon}$. За промежуток времени Δt изменение скорости $\vec{\upsilon} - \vec{\upsilon}_0 = \Delta\vec{\upsilon}$. Тело движется с постоянным ускорением $\vec{a} = const$.

Ускоренное движение в *положительном* направлении оси ОХ	**Замедленное** движение в *положительном* направлении оси ОХ	**Ускоренное** движение в *отрицательном* направлении оси ОХ	**Замедленное** движение в *отрицательном* направлении оси ОХ
			
Уравнение движения тела в векторной форме: $\vec{\upsilon}=\vec{\upsilon}_0+\vec{a}\Delta t$	Уравнение движения тела в векторной форме: $\vec{\upsilon}=\vec{\upsilon}_0+\vec{a}\Delta t$	Уравнение движения тела в векторной форме: $\vec{\upsilon}=\vec{\upsilon}_0+\vec{a}\Delta t$	Уравнение движения тела в векторной форме: $\vec{\upsilon}=\vec{\upsilon}_0+\vec{a}\Delta t$
Запишем уравнение движения тела в проекции на ось ОХ: $\upsilon_x=\upsilon_{0x}+a_x\Delta t$ $\upsilon_{0x}=\upsilon_0$ $a_x=a$ $\upsilon_x=\upsilon_0+a\cdot\Delta t$	Запишем уравнение движения тела в проекции на ось ОХ: $\upsilon_x=\upsilon_{0x}+a_x\Delta t$ $\upsilon_{0x}=\upsilon_0$ $a_x=-a$ $\upsilon_x=\upsilon_0-a\cdot\Delta t$	Запишем уравнение движения тела в проекции на ось ОХ: $\upsilon_x=\upsilon_{0x}+a_x\Delta t$ $\upsilon_{0x}=-\upsilon_0$ $a_x=-a$ $\upsilon_x=-\upsilon_0-a\cdot\Delta t$	Запишем уравнение движения тела в проекции на ось ОХ: $\upsilon_x=\upsilon_{0x}+a_x\Delta t$ $\upsilon_{0x}=-\upsilon_0$ $a_x=a$ $\upsilon_x=-\upsilon_0+a\cdot\Delta t$
Запишем уравнение движения, общее для всех рассмотренных случаев движения тел $\upsilon_x=\pm\upsilon_0\pm a\Delta t$			

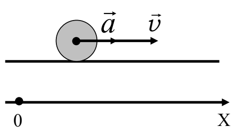
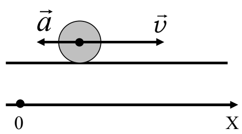
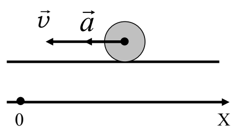
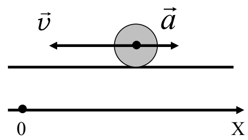
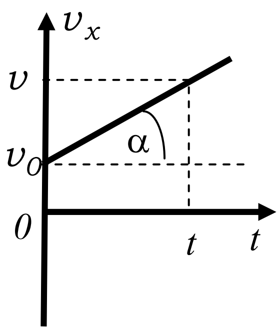
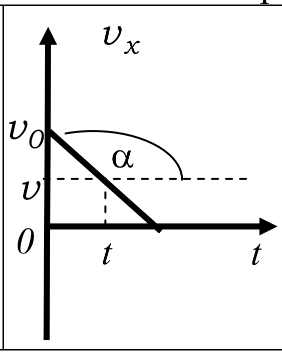
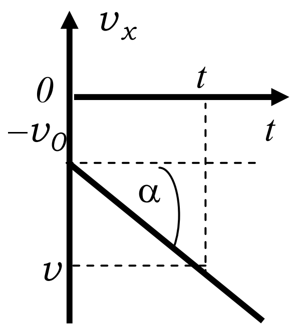
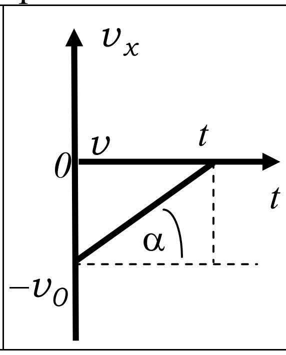
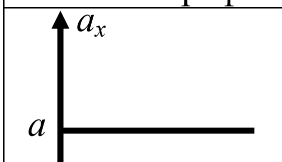
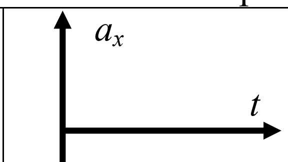
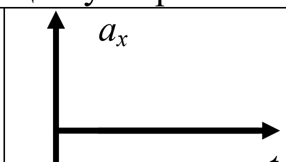
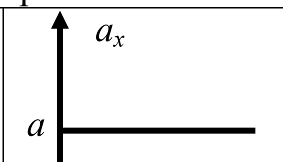
Таким образом, <u>уравнение проекции скорости на ось ОХ</u>: $\upsilon_x=\pm\upsilon_0\pm a\Delta t$.

Если начальный момент времени $t_0=0$, то промежуток времени $\Delta t=t-t_0=t$ (время движения).

Тогда уравнение проекции скорости можно записать $\upsilon_x=\pm\upsilon_0\pm at$**.**

Проанализируем это уравнение. Проекция скорости на ось ОХ зависит от времени **<u>линейно.</u>** Знак плюс (+) или минус (–) в этом уравнении зависит от направления движения (от знака проекции скорости) и от того, какое это движение (ускоренное или замедленное).

Построим графики зависимости проекции скорости и ускорения от времени для тел, изображенных на рисунках.

Ускоренное движение в *положительном* направлении оси ОX	**Замедленное** движение в *положительном* направлении оси ОX	**Ускоренное** движение в *отрицательном* направлении оси ОX	**Замедленное** движение в *отрицательном* направлении оси ОX
			
$\vec{a}\uparrow\uparrow\vec{v}$	$\vec{a}\uparrow\downarrow\vec{v}$	$\vec{a}\uparrow\uparrow\vec{v}$	$\vec{a}\uparrow\downarrow\vec{v}$
Уравнения зависимости проекции скорости от времени:			
$v_x = v_0 + a\cdot t$	$v_x = v_0 - a\cdot t$	$v_x = -v_0 - a\cdot t$	$v_x = -v_0 + a\cdot t$
Графики зависимости проекции скорости от времени			
			
α – угол наклона гафика скорости к оси времени, $tg\alpha = \dfrac{v - v_0}{t} = a_x = \pm a$.			
Уравнения зависимости проекции ускорения от времени:			
$a_x = a$	$a_x = -a$	$a_x = -a$	$a_x = a$
Графики зависимости проекции ускорения от времени:			
			

<u>Вывод</u>: уравнение равнопеременного движения

$$\vec{a} = const\,,\ \vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}\Delta t\,.$$

Уравнение проекции скорости и ускорения на ось ОХ:

$$v_x = v_{0x} + a_x \cdot \Delta t\,;\quad \boldsymbol{a_x = const.}$$

График зависимости проекции скорости от времени – это прямая линия, наклонная к оси времени. Тангенс угла наклона графика равен проекции ускорения на ось ОХ.

График зависимости проекции ускорения от времени – это прямая линия, параллельная оси времени.

5.2. Уравнение вектора перемещения

Рассмотрим движение тела в положительном направлении оси OX с постоянным ускорением $\vec{a} = const$**.** Скорость равнопеременного движения равна: $\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_0 + \vec{a}\Delta t$. **Это уравнение скорости в векторной форме.**

Запишем уравнение проекции скорости равнопеременного движения на ось OX.

$$\upsilon_x = \upsilon_{0x} + a_x \cdot \Delta t,$$

где a_x – проекция вектора $\vec{a}$ на ось OX.

Так как $\vec{\upsilon}_{cp} = \dfrac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$, то вектор перемещения равен $\Delta\vec{r} = \vec{\upsilon}_{cp} \cdot \Delta t$.

Найдем средний вектор скорости (среднюю скорость перемещения) за интервал времени Δt: средний вектор скорости равен

$$\vec{\upsilon}_{cp} = \frac{\vec{\upsilon}_0 + \vec{\upsilon}}{2} \text{ или } \vec{\upsilon}_{cp} = \frac{\vec{\upsilon}_0 + \vec{\upsilon}}{2} = \frac{\vec{\upsilon}_0 + (\vec{\upsilon}_0 + \vec{a}\Delta t)}{2} = \vec{\upsilon}_0 + \frac{\vec{a}\Delta t}{2}.$$

Вектор перемещения равен

$$\Delta\vec{r} = \vec{\upsilon}_{cp} \cdot \Delta t = \left(\vec{\upsilon}_0 + \frac{\vec{a}\Delta t}{2}\right) \cdot \Delta t = \vec{\upsilon}_0 \Delta t + \frac{\vec{a}\Delta t^2}{2}$$

Таким образом, **кинематическое уравнение для вектора перемещения при равнопеременном движении**

$$\Delta\vec{r} = \vec{\upsilon}_0 \Delta t + \frac{\vec{a}\Delta t^2}{2}$$

Вектор перемещения зависит от времени движения. Если начальный момент времени $t_0 = 0$, то формулу вектора перемещения можно записать так:

$$\Delta\vec{r} = \vec{\upsilon}_0 \cdot t + \frac{\vec{a} \cdot t^2}{2}$$

Вектор перемещения зависит от времени во второй степени или зависит от квадрата времени (t^2). Это квадратичная зависимость.

Уравнение проекции вектора перемещения на ось *OX*:

$$\Delta r_x = \upsilon_{0x} \cdot t + \frac{a_x \cdot t^2}{2}$$

Мы знаем, что $\Delta\vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_0$, где $\vec{r}$ и $\vec{r}_0$ – радиус-векторы, определяющие положение тела в моменты времени t и $t_0 = 0$.

Уравнение радиус-вектора

$$\vec{r} - \vec{r}_0 = \vec{\upsilon}_0 \cdot t + \frac{\vec{a} \cdot t^2}{2} \quad \textbf{или} \quad \vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{\upsilon}_0 \cdot t + \frac{\vec{a} \cdot t^2}{2}$$

Запишем **уравнение проекции радиус-вектора на ось OX:**

$$r_x = r_{0x} + \upsilon_{0x} \cdot t + \frac{a_x \cdot t^2}{2}.$$

5.3. <u>**Уравнение координаты**</u>

Тело движется прямолинейно по оси *OX* с постоянным ускорением $\vec{a} = const$.

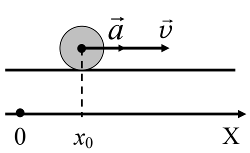
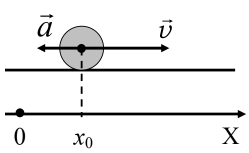
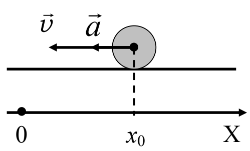
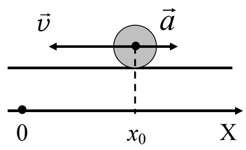
В момент времени $t_0 = 0$ скорость тела равна $\vec{\upsilon}_0$ и тело находится в точке с координатой x_0, а момент времени t тело находится в точке с координатой x и имеет скорость $\vec{\upsilon}$. Проекция вектора перемещения на ось OX равна изменению координаты тела за время движения t: $\Delta r_x = r_x - r_{0x} = x - x_0$. Так как

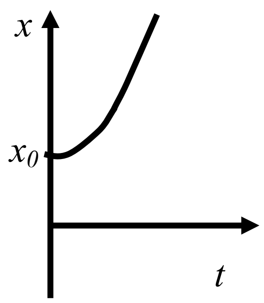
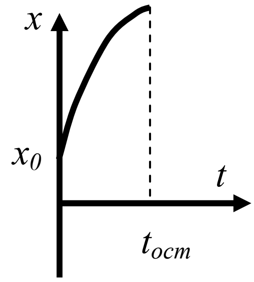
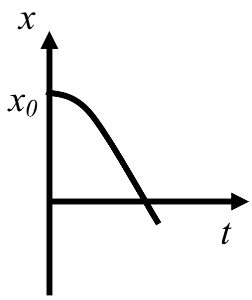
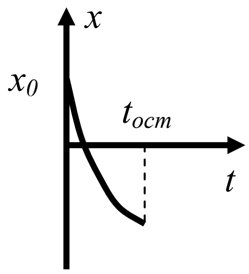
$$\Delta r_x = \upsilon_{0x} \cdot t + \frac{a_x \cdot t^2}{2}, \text{ то } x - x_0 = \upsilon_{0x} \cdot t + \frac{a_x \cdot t^2}{2}.$$

Тогда $x = x_0 + \upsilon_{0x} \cdot t + \dfrac{a_x \cdot t^2}{2}$ – **это уравнение координаты**.

Координата x для равнопеременного движения зависит от квадрата времени. Из математики известно, что график квадратичной зависимости $y = ax^2 + bx + c$ – это парабола. Вид параболы зависит от коэффициентов *a,b,c*. Уравнение $x = x_0 + \upsilon_{0x} \cdot t + \dfrac{a_x \cdot t^2}{2}$ – это уравнение параболы, и график координаты от времени – кривая линия – парабола.

Рассмотрим возможные случаи равнопеременного движения тела и построим графики зависимости координаты от времени.

Ускоренное движение в *положительном* направлении оси OX	**Замедленное** движение в *положительном* направлении оси OX	**Ускоренное** движение в *отрицательном* направлении оси OX	**Замедленное** движение в *отрицательном* направлении оси OX
			

<table>
<tr>
<td>$\vec{a}\uparrow\uparrow\vec{\upsilon}$
$\upsilon_{0x}=\upsilon_0$
$a_x=a$</td>
<td>$\vec{a}\uparrow\downarrow\vec{\upsilon}$
$\upsilon_{0x}=\upsilon_0$
$a_x=-a$</td>
<td>$\vec{a}\uparrow\uparrow\vec{\upsilon}$
$\upsilon_{0x}=-\upsilon_0$
$a_x=-a$</td>
<td>$\vec{a}\uparrow\downarrow\vec{\upsilon}$
$\upsilon_{0x}=-\upsilon_0$
$a_x=a$</td>
</tr>
<tr><td colspan="4">Уравнение координаты для каждого тела:</td></tr>
<tr>
<td>$x=x_0+\upsilon_0\cdot t+\frac{a\,t^2}{2}$</td>
<td>$x=x_0+\upsilon_0\cdot t-\frac{a\,t^2}{2}$</td>
<td>$x=x_0-\upsilon_0\cdot t-\frac{a\,t^2}{2}$</td>
<td>$x=x_0-\upsilon_0\cdot t+\frac{a\,t^2}{2}$</td>
</tr>
<tr><td colspan="4">График зависимости координаты от времени:</td></tr>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr><td colspan="4">Запишем уравнение координаты, общее для всех рассмотренных случаев движения тел
$$x=x_0\pm\upsilon_0\cdot t\pm\frac{a\,t^2}{2}$$
Знак (±) в формуле зависит от направления движения</td></tr>
</table>

5.4. <u>**Уравнение и график пути**</u>

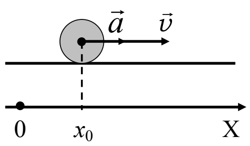
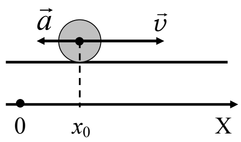
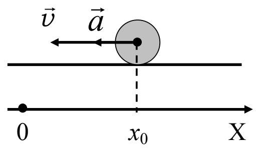
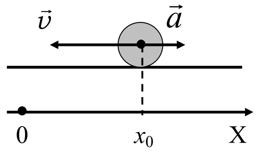
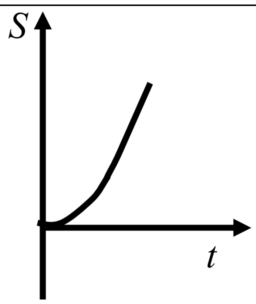
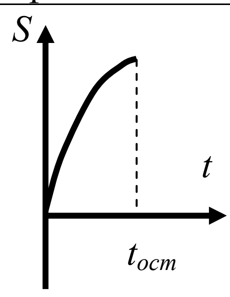
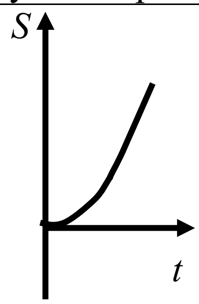
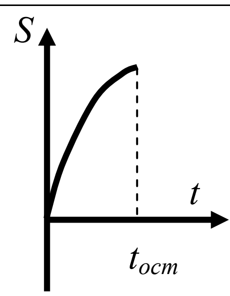
Найдем уравнение пути и построим график зависимости пути от времени.

При прямолинейном движении путь равен модулю проекции вектора перемещения. Проекция вектора перемещения на ось OX равна $\Delta r_x=\upsilon_{0x}\cdot t+\frac{a_x\cdot t^2}{2}$, поэтому можем записать

$$|\Delta r_x|=\left|\upsilon_{0x}\cdot t+\frac{a_x\cdot t^2}{2}\right|=\Delta S=S \text{ или } S=|x-x_0|=\left|\upsilon_{0x}\cdot t+\frac{a_x\cdot t^2}{2}\right|$$

– **это уравнение пути для равнопеременного движения.** Это квадратичная зависимость. Путь для равнопеременного движения зависит от квадрата времени. График квадратичной зависимости – парабола. График пути – это парабола, которая всегда начинается в начале координат. При $t_0=0$ путь всегда равен нулю. Путь – это физическая величина, которая всегда больше нуля.

Рассмотрим возможные случаи равнопеременного движения по оси *OX* и построим графики пути от времени движения.

Ускоренное движение в *положительном* направлении оси *OX*	**Замедленное** движение в *положительном* направлении оси *OX*	**Ускоренное** движение в *отрицательном* направлении оси *OX*	**Замедленное** движение в *отрицательном* направлении оси *OX*
 $\vec{a}\uparrow\uparrow\vec{v}$ $\upsilon_{0x}=\upsilon_0$ $a_x=a$	 $\vec{a}\uparrow\downarrow\vec{v}$ $\upsilon_{0x}=\upsilon_0$ $a_x=-a$	 $\vec{a}\uparrow\uparrow\vec{v}$ $\upsilon_{0x}=-\upsilon_0$ $a_x=-a$	 $\vec{a}\uparrow\downarrow\vec{v}$ $\upsilon_{0x}=-\upsilon_0$ $a_x=a$
Уравнение пути для каждого тела:			
$S=\left\| x-x_0 \right\|=$ $=\left\| \upsilon_0\cdot t+\frac{a\ t^2}{2} \right\|=$ $=\upsilon_0 t+\frac{at^2}{2}$	$S=\left\| x-x_0 \right\|=$ $=\left\| \upsilon_0\cdot t-\frac{a\ t^2}{2} \right\|=$ $=\upsilon_0 t-\frac{at^2}{2}$	$S=\left\| x-x_0 \right\|=$ $=\left\| -\upsilon_0\cdot t-\frac{a\ t^2}{2} \right\|=$ $=\upsilon_0 t+\frac{at^2}{2}$	$S=\left\| x-x_0 \right\|=$ $=\left\| -\upsilon_0\cdot t+\frac{a\ t^2}{2} \right\|=$ $=\upsilon_0 t-\frac{at^2}{2}$
График зависимости пути от времени:			
			
Запишем уравнение пути, общее для всех рассмотренных случаев движения тел $$S=\upsilon_0\cdot t\pm\frac{a\ t^2}{2}$$ Знак $(\pm)$ в формуле зависит от направления движения тела и от того, равноускоренно или равнозамедленно оно движется			

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Если скорость тела $\vec{v} = const$, то такое движение **равномерное**.

Если скорость тела непостоянная $\vec{v} \neq const$, но ускорение постоянное $\vec{a} = const$, то это движение **равнопеременное.**

Для равнопеременного движения среднее ускорение = мгновенное ускорение = ускорение $\vec{a}$.

Направления векторов ускорения и скорости совпадают при равноускоренном движении $(\vec{a} \uparrow\uparrow \vec{v})$.

Направления векторов ускорения и скорости противоположны при равнозамедленном движении $(\vec{a} \uparrow\downarrow \vec{v})$.

ЗАПОМНИТЕ!

Векторные кинематические уравнения прямолинейного равнопеременного движения:

$\vec{a} = const$ – уравнение ускорения

$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$ – уравнение скорости

$\Delta\vec{r} = \vec{v}_0 \cdot t + \dfrac{\vec{a} \cdot t^2}{2}$ – уравнение вектора перемещения

$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 \cdot t + \dfrac{\vec{a} \cdot t^2}{2}$ – уравнение радиус-вектора

Скалярные кинематические уравнения прямолинейного равнопеременного движения:

$a_x = \pm a$ – уравнение проекции ускорения на ось OX

$v_x = \pm v_0 \pm at$ – уравнение проекции скорости на ось OX

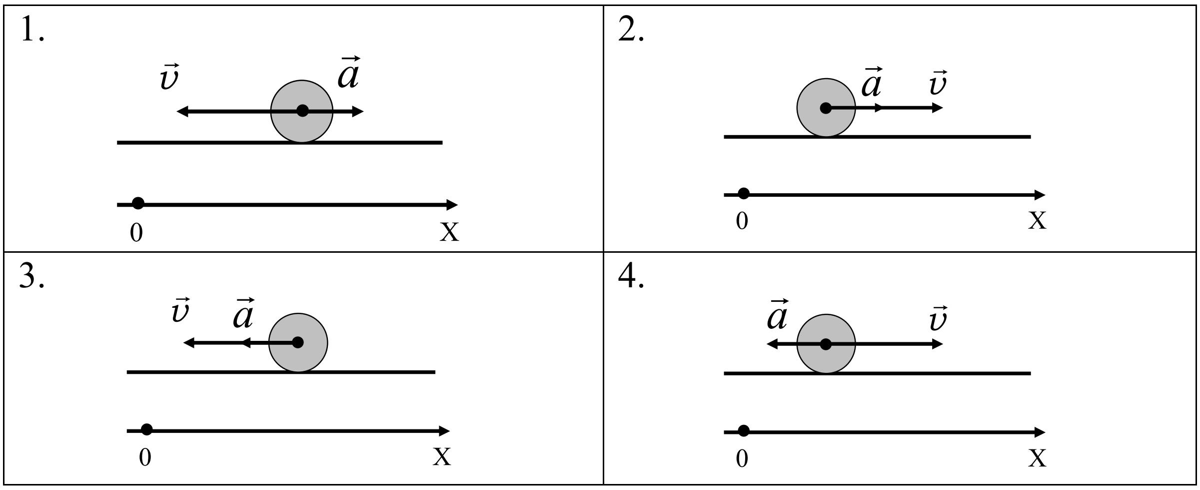
$\Delta r_x = v_{0x} \cdot t + \dfrac{a_x \cdot t^2}{2}$ – уравнение проекции вектора перемещения на ось OX

$x = x_0 \pm v_0 \cdot t \pm \dfrac{a\ t^2}{2}$ – уравнение координаты

$S = v_0 \cdot t \pm \dfrac{a\ t^2}{2}$ – уравнение пути.

<u>УПРАЖНЕНИЯ</u>

<u>Упражнение 1.</u> *Сделайте надписи к рисункам. Запишите кинематические уравнения движения.*



<u>Упражнение 2.</u> *Слушайте и повторяйте слова и словосочетания.*

Движение, прямолинейное движение, прямолинейное равномерное движение, совершать, совершить, отношение, постоянный, переменный, определять, определить, сравнение, сравнить, выражать, выразить, совпадать, совпасть, единица измерения.

Движение, прямолинейное движение, прямолинейное равномерное движение, прямолинейное равномерное движение по оси, прямолинейное равномерное движение в положительном направлении оси, прямолинейное равномерное движение в плоскости, прямолинейное равномерное движение в пространстве.

Вектор, вектор скорости, вектор скорости равномерного движения, вектор скорости равен, вектор скорости равен отношению, вектор скорости равен отношению вектора перемещения ко времени. Вектор скорости изменяется, вектор скорости не изменяется.

Уравнение движения, уравнение движения имеет вид.

<u>Упражнение 3.</u> *Решите задачи и ответьте на вопросы.*

1. Тело движется равноускоренно с ускорением 2 *м/с*^{2} в отрицательном направлении оси *OX*. Начальная скорость тела равна 5 *м/с*. Начальная координата тела равна нулю. Напишите уравнения проекции скорости, проекции ускорения на ось *OX*. Напишите уравнения коорди-

наты и пути тела от времени движения. Постройте графики этих зависимостей.

2. Тело движется равнозамедленно из начала координат в положительном направлении оси *OX*. Начальная скорость тела 30 *м/с*. Ускорение тела 6 $м/с^2$. Напишите уравнения проекции ускорения, проекции скорости, координаты и пути тела от времени. Постройте графики проекции ускорения, скорости, координаты и пути от времени движения.

3. Тело движется равноускоренно без начальной скорости из точки с координатой 2 *м* в положительном направлении оси *OX*. Ускорение тела равно 4 $м/с^2$. Напишите уравнения движения для проекций ускорения и скорости, координаты и пути. Постройте графики пути, проекции скорости и ускорения от времени движения.

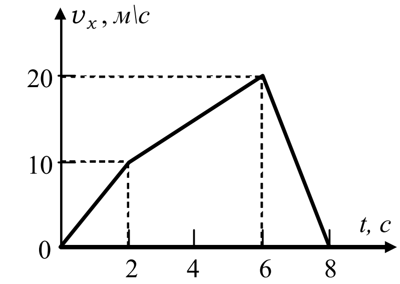
4. Тело движется равнозамедленно в отрицательном направлении оси *OX*. Начальная координата тела 20 *м*, начальная скорость тела 50 *м/с*, ускорение равно 5 $м/с^2$. Через сколько времени тело остановится? Чему равна координата тела в этот момент времени? Какой путь пройдет тело до остановки? Постройте графики пути, проекции скорости, ускорения и координаты тела от времени.

5. Два тела движутся навстречу друг другу. Первое тело начинает двигаться равноускоренно из начала координат без начальной скорости с ускорением 5 $м/с^2$. Второе тело движется равнозамедленно из точки с координатой 10 *м* с начальной скоростью 10 *м/с* и ускорением 5 $м/с^2$. В какой момент тела встретятся? Чему равна координата встречи? Чему равна скорость каждого тела в момент встречи? Какой путь пройдет каждое тело до встречи?

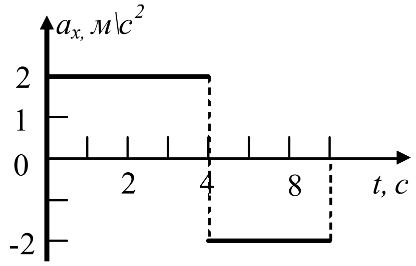
6. Два тела движутся в положительном направлении оси *OX*. Первое тело начинает двигаться равноускоренно из начала координат со скоростью 10 *м/с* и ускорением 2 $м/с^2$. Второе тело начинает двигаться из точки с координатой 20 *м* без начальной скорости с ускорением 2 $м/с^2$. В какой момент времени первое тело догонит второе? Чему равна координата встречи? Какой путь пройдет каждое тело до встречи? Чему равна скорость каждого тела в момент встречи?

<u>Упражнение 4.</u> *Решите задачи, используя графики.*

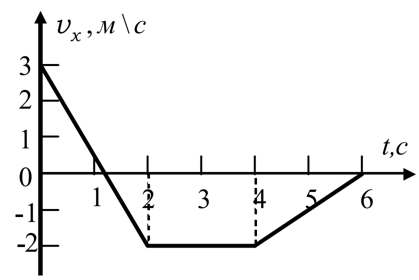
1. Дан график зависимости проекции скорости тела от времени. Построить графики зависимостей координаты, перемещения и пути от времени, если начальная координата тела равна нулю.



2. Дан график зависимости ускорения тела от времени движения. Написать уравнения зависимостей проекции скорости и координаты от времени. Построить графики зависимости проекции скорости, координаты и пути от времени движения, если $x_0 = 0$, $\upsilon_0 = 0$.



3. Дан график зависимости проекции скорости от времени. Построить графики зависимостей пути и координаты от времени, если начальная координата $x_0 = 0$. Определить средние скорости перемещения и пути за 2 *с* и 6 *с*.



ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. ***<u>Неравномерное (переменное) движение</u>*** – это такое движение, когда скорость изменяется $\vec{\upsilon} \neq \text{const}$ (она переменная величина); ускорение не равно нулю $\vec{a} \neq 0$ (движение с ускорением).
2. ***<u>Равнопеременным движением</u>*** называется движение, при котором за любые ***<u>равные промежутки времени скорость</u>*** тела ***<u>изменяется на одинаковую величину</u>***.
3. Уравнение $\vec{a}(t) = const = \vec{a}_0$ – это уравнение равнопеременного движения.

4. Если тело движется **равнопеременно**, то за любой промежуток времени Δt (и за $\Delta t \to 0$) изменение скорости одинаковое (одно и то же). Значит **мгновенное ускорение тела во всех точках траектории в любой момент времени постоянное и равно среднему ускорению тела.** $\vec{a} = \vec{a}_{cp} = const$**.**
5. Уравнение равнопеременного движения $\vec{a} = const$, $\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_0 + \vec{a}\Delta t$**. Уравнение проекции скорости и ускорения на ось ОХ:** $\upsilon_x = \upsilon_{0x} + a_x \cdot \Delta t$**;** $\boldsymbol{a_x = const.}$
6. График зависимости проекции скорости от времени – это прямая линия, наклонная к оси времени. Тангенс угла наклона графика определяется проекцией ускорения на ось ОХ.
7. График зависимости проекции ускорения от времени – это прямая линия, параллельная оси времени.
8. Уравнение $x = x_0 + \upsilon_{0x} \cdot t + \dfrac{a_x \cdot t^2}{2}$ – это уравнение параболы, и график координаты от времени – кривая линия – парабола.
9. Путь для равнопеременного движения зависит от квадрата времени. График квадратичной зависимости – парабола. График пути – это парабола, которая всегда начинается в начале координат. При $t_0 = 0$ путь всегда равен нулю. Путь – это физическая величина, которая всегда больше нуля.
10. Векторные кинематические уравнения прямолинейного равнопеременного движения:
    $\vec{a} = const$ – уравнение ускорения, $\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_0 + \vec{a}t$ – уравнение скорости, $\Delta\vec{r} = \vec{\upsilon}_0 \cdot t + \dfrac{\vec{a} \cdot t^2}{2}$ – уравнение вектора перемещения,
    $\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{\upsilon}_0 \cdot t + \dfrac{\vec{a} \cdot t^2}{2}$ – уравнение радиус-вектора
11. Скалярные кинематические уравнения прямолинейного равнопеременного движения:
    $a_x = \pm a$ – уравнение проекции ускорения на ось ОХ,
    $\upsilon_x = \pm\upsilon_0 \pm at$ – уравнение проекции скорости на ось ОХ,
    $\Delta r_x = \upsilon_{0x} \cdot t + \dfrac{a_x \cdot t^2}{2}$ – уравнение проекции вектора перемещения на ось ОХ, $x = x_0 \pm \upsilon_0 \cdot t \pm \dfrac{a\ t^2}{2}$ – уравнение координаты,
    $S = \upsilon_0 \cdot t \pm \dfrac{a\ t^2}{2}$ – уравнение пути.

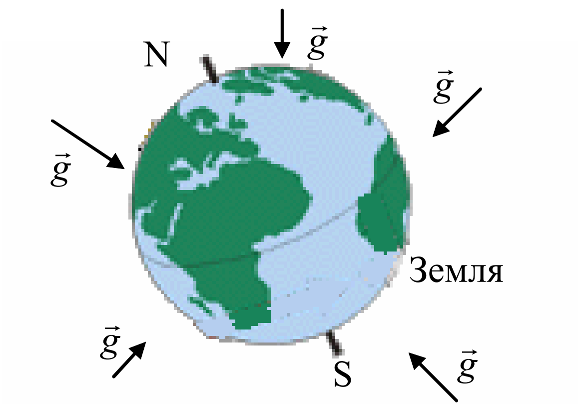
ТЕМА 6. <u>**СВОБОДНОЕ ПАДЕНИЕ. УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ**</u>

Новые слова и словосочетания

падать	безвоздушный
падение	время падения
притягивать	притяжение
вакуум	сила
высота	сила тяжести
полет	точка падения
приземляться	точка приземления
обозначать, обозначить	свободный
полюс	экватор

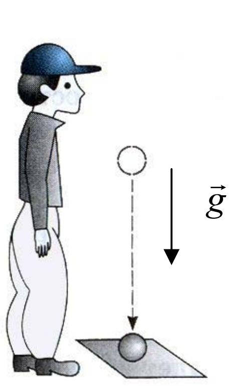
<u>Свободное падение</u> – это движение (падение) тел в вакууме под действием силы тяжести (под действием притяжения Земли или другой планеты). Вакуум – это пространство, где нет воздуха (безвоздушное пространство). **Падение – это движение вниз, к Земле.**

Свободное падение – это равноускоренное прямолинейное движение без начальной скорости $\vec{v}_0 = 0$.



Ускорение этого движения – **ускорение свободного падения (обозначают буквой g).**

Вектор ускорения свободного падения $\vec{g}$ направлен к центру Земли. Модуль ускорения свободного падения в различных точках Земли разный. Ускорение свободного падения изменяется от полюса к экватору. На полюсе $|\vec{g}| = 9{,}83\ ^{м}/_{с^2}$, на экваторе $|\vec{g}| = 9{,}78\ ^{м}/_{с^2}$.



Рассмотрим свободное падение тела без начальной скорости.

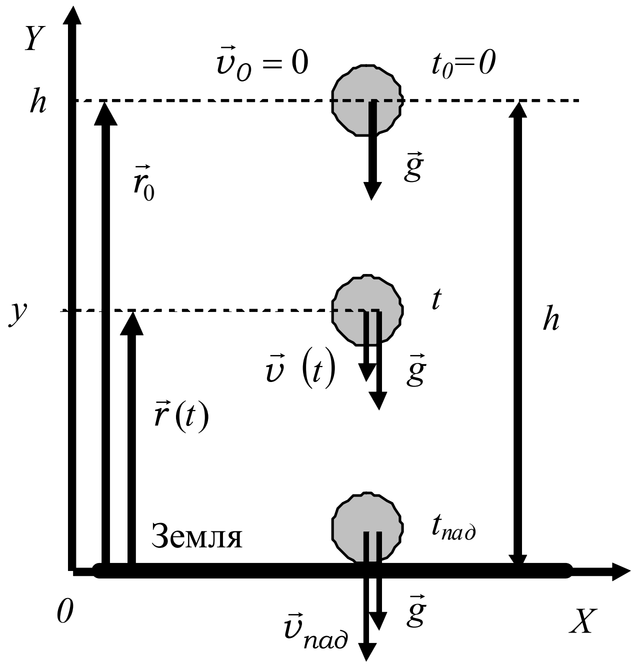
Свободное падение тела – это равнопеременное движение. Поэтому для изучения свободного падения можно использовать уравнения равнопеременного движения.

Падение тела вниз, к Земле – это равноускоренное движение ($\vec{g} \uparrow\uparrow \vec{v}$), и модуль скорости увеличивается. В момент падения на Землю тело будет иметь скорость, не равную нулю. Эта скорость называется **скоростью падения** тела $\vec{v}_{пад}$. Вектор $\vec{v}_{пад}$ направлен вниз, к центру Земли.

Время движения от начального момента времени $t_0 = 0$ до момента падения на Землю называется **временем падения тела** $t_{пад}$.

Рассмотрим свободное падение тела в системе отсчета, связанной с Землей. Тело отсчета – Земля.

Тело в начальный момент времени $t_0 = 0$ находилось в точке на высоте h от поверхности Земли и имело скорость $\vec{v}_0 = 0$.



Сделаем рисунок и свяжем с телом отсчета систему координат XOY. **Ось OY направим вверх, ось OX совпадает с поверхностью Земли.**

h – высота, с которой падает тело – это начальная координата тела по оси OY.

Тело движется в **отрицательном направлении оси OY с ускорением $\vec{g}$.**

Запишем уравнения равнопеременного движения в векторном виде:

$\vec{g} = const$ – уравнение ускорения

$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g}t$ – уравнение скорости

$\Delta\vec{r} = \vec{v}_0 \cdot t + \dfrac{\vec{g} \cdot t^2}{2}$ – уравнение вектора перемещения

$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 \cdot t + \dfrac{\vec{g} \cdot t^2}{2}$ – уравнение радиус-вектора

$S = |\vec{r} - \vec{r}_0| = \left|\vec{v}_0 t + \dfrac{\vec{g}t^2}{2}\right|$ – уравнение пути.

Уравнения движения в проекции на ось OY:		
$g_y = const$ $\upsilon_y = \upsilon_{0y} + g_y t$ $r_y = r_{0y} + \upsilon_{0y} t + \frac{g_y t^2}{2}$ $S = \left\| r_y - r_{0y} \right\| = \left\| \upsilon_{0y} t + \frac{g_y t^2}{2} \right\|$	или	$\upsilon_{0y} = 0$; $g_y = g\cos 180° = -g$; $r_{0y} = y_0 = h$, $r_y = y$. Тогда $g_y = -g$ $\upsilon_y = -g\ t$ $y = h - \frac{g\ t^2}{2}$ $S = \left\| y - h \right\| = \left\| -\frac{gt^2}{2} \right\|$

В момент падения на Землю $t = t_{пад}$ проекция скорости $\upsilon_y = \upsilon_{пад}$, а $y = 0$. Тогда можно записать $\upsilon_{пад} = -gt_{пад}$; $0 = h - \frac{gt_{пад}^2}{2}$, а путь, пройденный телом за время падения $S = h = \frac{gt_{пад}^2}{2}$.

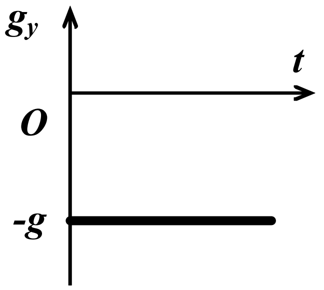
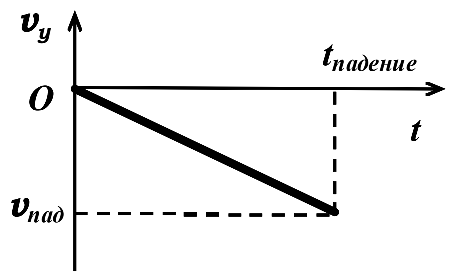
Решим систему уравнений и получим формулы для времени $t_{пад}$ падения и проекции скорости падения $\upsilon_{пад}$:

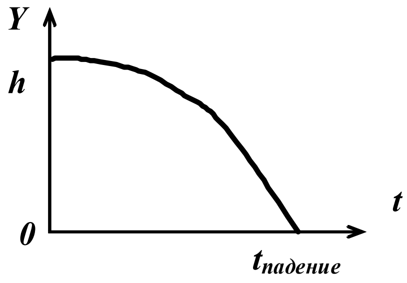
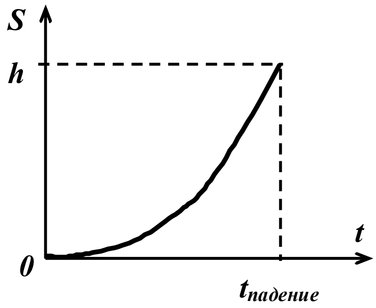
$$t_{пад} = \sqrt{\frac{2h}{g}}; \qquad \upsilon_{пад} = -\sqrt{2gh}.$$

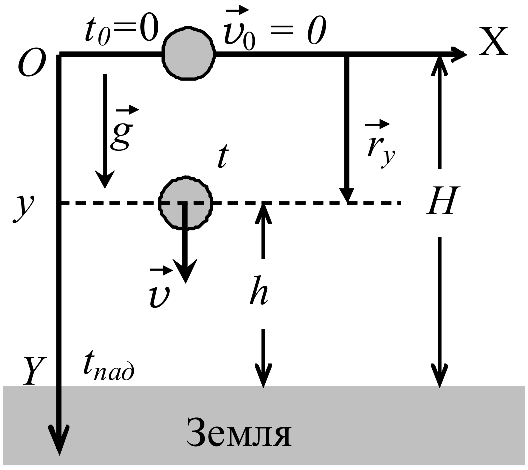
Знак минус в формуле показывает, что проекция скорости падения отрицательна. Скорость падения направлена противоположно оси OY.

Модуль скорости падения равен $\upsilon_{пад} = \sqrt{2gh}$.

Графики проекции уравнений движения на ось *OY* от времени

Уравнение для проекции ускорения: $g_y = -g$	Уравнение для проекции скорости: $\upsilon_y = -gt$
 График проекци ускорения	 График проекции скорости

Уравнение координаты: $y = h - \dfrac{gt^2}{2}$	Уравнение пути: $S = \left\lvert -\dfrac{gt^2}{2} \right\rvert$
 График координаты	 График пути



Рассмотрим свободное падение этого же тела относительно другой системы отсчета.

Сделаем рисунок и выберем систему координат XOY . Ось OY направим вниз, ось OX совпадает с начальным положением тела. В начальный момент времени тело находилось на высоте *H* над Землей.

Тело движется в **положительном направлении оси OY с ускорением $\vec{g}$.**

Запишем уравнения равнопеременного движения в векторном виде:

$\vec{g} = const$ – уравнение ускорения

$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g}t$ – уравнение скорости

$\Delta\vec{r} = \vec{v}_0 \cdot t + \dfrac{\vec{g} \cdot t^2}{2}$ – уравнение вектора перемещения

$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 \cdot t + \dfrac{\vec{g} \cdot t^2}{2}$ – уравнение радиус-вектора

$S = \left|\vec{r} - \vec{r}_0\right| = \left|\vec{v}_0 t + \dfrac{\vec{g}t^2}{2}\right|$ – уравнение пути

<table>
<tr><th colspan="3">Уравнения движения в проекции на ось OY:</th></tr>
<tr>
<td>$g_y = const$
$\upsilon_y = \upsilon_{0y} + g_y t$
$r_y = r_{0y} + \upsilon_{0y} t + \dfrac{g_y t^2}{2}$
$S = \left|r_y - r_{0y}\right| = \left|\upsilon_{0y} t + \dfrac{g_y t^2}{2}\right|$</td>
<td>или</td>
<td>$\upsilon_{0y} = 0$; $g_y = g\cos 0° = g$;
$r_{0y} = y_0 = 0$, $r_y = y$.
Тогда
$g_y = g$
$\upsilon_y = g\ t$
$y = \dfrac{g\ t^2}{2}$
$S = \left|\dfrac{gt^2}{2}\right|$</td>
</tr>
</table>

В любой момент времени t проекция скорости $\upsilon_y = gt$; координата $y = \dfrac{gt^2}{2}$, высота тела над Землей $h = H - y = H - \dfrac{gt^2}{2}$.

В момент падения на Землю ($h = 0$) координата $y = H$, тогда $H = \dfrac{gt_{пад}^2}{2}$. Время падения тела на Землю $t_{пад} = \sqrt{\dfrac{2H}{g}}$. Скорость, с которой тело упадет на Землю $\upsilon_{пад} = gt_{пад} = \sqrt{2gH}$. Путь, пройденный телом, равен $S = H$.

Графики проекции уравнений движения на ось *OY* от времени

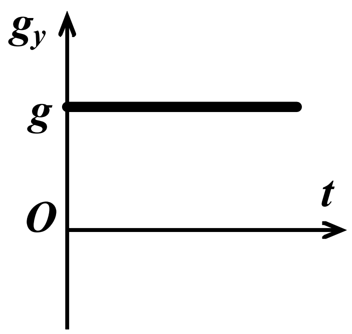
<table>
<tr><th>Уравнение для проекции ускорения: $g_y = g$</th><th>Уравнение для прекции скорости: $\upsilon_y = gt$</th></tr>
<tr>
<td>

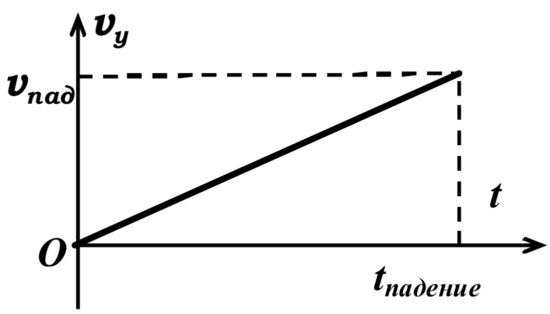
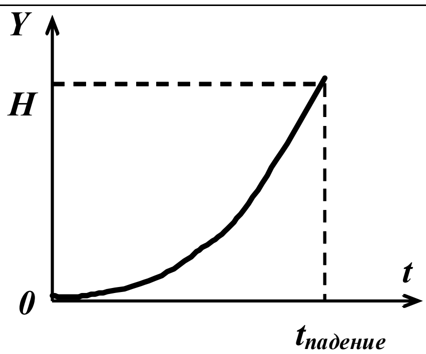
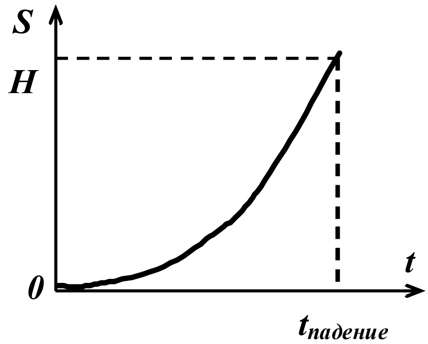
График проекции ускорения</td>
<td>

График проекции скорости</td>
</tr>
</table>

Уравнение для координаты: $y = \dfrac{gt^2}{2}$	Уравнение пути: $S = \dfrac{gt^2}{2}$
 График координаты	 График пути

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Тело свободно падает – значит, его начальная скорость равна нулю.
Если начальная скорость тела не равна нулю – то тело бросили вниз.

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Слушайте и повторяйте слова и словосочетания.*

Падать, тело падает, тело падает вертикально вниз, падение, свободное падение, вакуум; тело падает в вакууме, высота; падать с высоты, тело свободно падает с высоты, бросать, бросить, тело, брошенное вниз, время подъёма; время падения, скорость падения, скорость бросания.

Упражнение 2. *Решите задачи.*

1. Тело свободно падает с высоты 10 м без начальной скорости. Чему равна скорость падения? Сколько времени тело падало? Найдите среднюю скорость движения.

2. Тело свободно падало на Землю 30 с. С какой высоты упало тело? С какой скоростью оно упало на Землю?

3. Тело свободно падает с высоты без начальной скорости. Последние 98 м оно прошло за 2 с. С какой высоты упало тело? Сколько времени тело падало? Чему равна скорость падения?

4. Тело свободно падает с высоты 80 м. Какой путь проходит тело за последнюю секунду падения?

5. Аэростат находится на высоте 320 м. Из аэростата падает тело. Через сколько времени тело упадет на Землю, если: 1) аэростат находится в состоянии покоя; 2) аэростат движется вниз со скоростью 5 м/с; 3) аэростат движется вверх со скоростью 5 м/с.

6. С какой начальной скоростью нужно бросить вертикально вниз тело с высоты 200 м, чтобы оно упало на Землю через 4 с.

7. За какое время тело, которое бросают вертикально вниз со скоростью 20 м/с, проходит путь 160 м? Чему равна скорость тела в этот момент времени?

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. ***Свободное падение*** – это движение (падение) тел в вакууме под действием силы тяжести (под действием притяжения Земли или другой планеты).
2. Вакуум – это пространство, где нет воздуха (безвоздушное пространство).
3. Свободное падение – это равноускоренное прямолинейное движение вниз к Земле без начальной скорости.
4. Ускорение этого движения – **ускорение свободного падения (обозначают буквой g).**
5. В момент падения на Землю тело будет иметь скорость, не равную нулю. Эта скорость называется **скоростью падения** тела $\vec{v}_{пад}$.
6. Кинематические уравнения движения в векторной форме:

$\vec{g} = const$ – уравнение ускорения

$\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_0 + \vec{g}t$ – уравнение скорости

$\Delta\vec{r} = \vec{\upsilon}_0 \cdot t + \dfrac{\vec{g} \cdot t^2}{2}$ – уравнение вектора перемещения

$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{\upsilon}_0 \cdot t + \dfrac{\vec{g} \cdot t^2}{2}$ – уравнение радиус-вектора

$S = \left|\vec{r} - \vec{r}_0\right| = \left|\vec{\upsilon}_0 t + \dfrac{\vec{g}t^2}{2}\right|$ – уравнение пути

7. Кинематические уравнения движения в проекции на ось *OY*:

$$g_y = const$$

$$\upsilon_y = \upsilon_{0y} + g_y t$$

$$y = y_0 + \upsilon_{0y} t + \frac{g_y t^2}{2}$$

$$S = \left|y - y_0\right| = \left|\upsilon_{0y} t + \frac{g_y t^2}{2}\right|$$

ТЕМА 7. **ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ВЕРТИКАЛЬНО ВВЕРХ**

Новые слова и словосочетания

бросать, бросить	поднимать
брошенный	подъём
брошенный вверх	высота подъёма
подниматься	точка приземления
высота	свободный полет
приземляться	

Бросить тело вверх означает сообщить ему начальную скорость ($\vec{v}_0 \neq 0$). Начальная скорость направлена ***вертикально вверх***. Ускорение свободного падения $\vec{g}$ всегда направлено вниз (к центру Земли). Поэтому движение тела равнопеременное, тело движется с ускорением свободного падения $\vec{g}$.

В начальный момент времени тело находится на поверхности Земли. В момент времени $t_0 = 0$ тело бросили вверх с начальной скоростью $\vec{v}_0$.

Запишем уравнения равнопеременного движения в векторном виде:

$\vec{g} = const$ – уравнение ускорения

$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g}t$ – уравнение скорости

$\Delta\vec{r} = \vec{v}_0 \cdot t + \dfrac{\vec{g} \cdot t^2}{2}$ – уравнение вектора перемещения

$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 \cdot t + \dfrac{\vec{g} \cdot t^2}{2}$ – уравнение радиус-вектора

$S = |\vec{r} - \vec{r}_0| = \left|\vec{v}_0 t + \dfrac{\vec{g}t^2}{2}\right|$ – уравнение пути.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

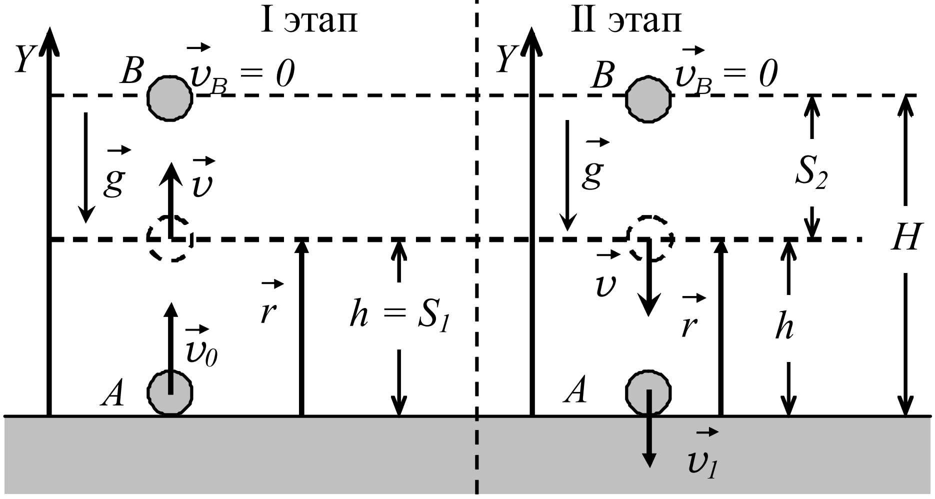
Движение тела, брошенного вертикально вверх – это равнопеременное движение с ускорением свободного падения $\vec{g}$.

Движение тела можно разбить на два этапа:

I этап: тело движется вертикально вверх равнозамедленно **(подъём)** ($\upsilon < \upsilon_0$, $\vec{g} = const$); тело поднимается на максимальную высоту H и останавливается ($\vec{\upsilon} = 0$);

II этап: тело свободно падает вниз **(падение)**. Оно движется равноускоренно.

Рассмотрим движение тела в одномерной системе отсчета.



подъём падение

Запишем уравнения движения.

I этап. **Подъём.** Движение вертикально вверх с начальной скоростью $\vec{\upsilon}_0$ из точки A в точку B.

<table>
<tr><td colspan="3">Уравнение движения тела в проекции на ось OY:</td></tr>
<tr><td>$g_y = const$
$\upsilon_y = \upsilon_{0y} + g_y t$
$r_y = r_{0y} + \upsilon_{0y} t + \dfrac{g_y t^2}{2}$
$S = \left| r_y - r_{0y} \right| = \left| \upsilon_{0y} t + \dfrac{g_y t^2}{2} \right|$</td><td>или</td><td>$g_y = -g$; $\upsilon_{0y} = \upsilon_0$,
тогда $r_{0y} = y_0 = 0$, $r_y = y$,
$g_y = -g$
$\upsilon_y = \upsilon_0 - gt$
$y = \upsilon_0 t - \dfrac{gt^2}{2}$
$S = \left| \upsilon_0 t - \dfrac{gt^2}{2} \right|$</td></tr>
</table>

Высоту подъёма тела над Землей можно найти по формуле $y = h = \upsilon_0 t - \dfrac{gt^2}{2}$, где h – высота подъёма тела за время движения t от Земли (над Землей).

На максимальной высоте $y_{\max} = H$ тело остановится, его скорость равна нулю $\vec{\upsilon}_B = 0$. Тогда время $t_1 = t_{подъема}$ подъёма тела на максимальную высоту можно найти из уравнения скорости $0 = \upsilon_0 - gt_1$, или $t_1 = \dfrac{\upsilon_0}{g}$.

Максимальная высота подъёма тела (путь, пройденный телом за время подъёма $S = \upsilon_0 t_1 - \dfrac{gt_1^2}{2}$) $y_{\max} = H = \upsilon_0 t_1 - \dfrac{gt_1^2}{2} = \dfrac{\upsilon_0^2}{2g}$ или время подъёма $t_1 = \sqrt{\dfrac{2H}{g}}$.

II этап. **Свободное падение.** Тело свободно падает (начальная скорость тела в точке B равна нулю $\vec{\upsilon}_B = 0$, в момент времени $t_0 = 0$ положение тела определяется координатой $y_0 = H$ относительно тела отсчета – Земли).

<table>
<tr><td colspan="3">Уравнение движения тела в проекции на ось OY:</td></tr>
<tr>
<td>$g_y = const$
$\upsilon_y = \upsilon_{0y} + g_y t$
$r_y = r_{0y} + \upsilon_{0y} t + \dfrac{g_y t^2}{2}$
$S = \left|r_y - r_{0y}\right| = \left|\upsilon_{0y} t + \dfrac{g_y t^2}{2}\right|$</td>
<td>или</td>
<td>Теперь тело движется против оси OY, поэтому:
$g_y = -g$; $\upsilon_{0y} = 0$ и $\upsilon_y = -gt$,
$r_{0y} = y_0 = H$
(t – время движения от точки В к Земле) Знак (–) показывает, что проекция скорости движения (падения) направлена против оси OY.
$g_y = -g$
$\upsilon_y = -g\ t$
$y = H - \dfrac{g\ t^2}{2}$
$S = \left|y - H\right| = \left|-\dfrac{gt^2}{2}\right|$</td>
</tr>
</table>

Модуль скорости в любой момент времени $\upsilon = gt$, а путь, пройденный телом от точки B равен $S_2 = (gt^2)/2$. Высота тела над Землей $h = y = H - S_2 = H - \dfrac{gt^2}{2}$.

Когда тело упадет на Землю, то в точке A (точке падения) модуль скорости тела в момент падения $\upsilon_{пад} = gt_{пад}$, где $t_{пад}$ – время падения.

В момент времени $t = 0$ положение тела определяется координатой $y_0 = H$.

При $t = t_{пад}$ тело упадет на Землю и координата $y = 0$, тогда уравнение движения $0 = H - \dfrac{gt_{пад}^2}{2}$ или $t_{пад} = \sqrt{\dfrac{2H}{g}}$, то $(\upsilon_{пад})_y = -\sqrt{2gH}$, а модуль скорости падения $\upsilon_{пад} = \upsilon_1 = \sqrt{2gH}$ или $S_2 = H = \dfrac{\upsilon_1^2}{2g}$.

Максимальная высота подъёма $H = \dfrac{\upsilon_0^2}{2g}$ равна пути, который проходит тело в свободном падении $H = \dfrac{\upsilon_1^2}{2g}$. Из этих формул видно, что начальная скорость подъёма тела равна конечной скорости свободного падения с максимальной высоты. Следовательно, скорость падения равна начальной скорости по модулю и противоположна по направлению $|\vec{\upsilon}_1| = |\vec{\upsilon}_0|$, $\vec{\upsilon}_1 = -\vec{\upsilon}_0$.

Время подъёма тела на максимальную высоту $t_1 = \sqrt{\dfrac{2H}{g}}$ (или $t_{подъем} = \dfrac{\upsilon_0}{g}$) равно времени падения тела с максимальной высоты $t_{пад} = \sqrt{\dfrac{2H}{g}}$ (или $t_{падение} = \dfrac{\upsilon_1}{g}$), значит $t_{падение} = \dfrac{\upsilon_1}{g} = \dfrac{\upsilon_0}{g}$. Общее время движения тела из точки A в точку B и обратно равно $t_{общее} = t_{подъем} + t_{падение}$, $\quad t_{общее} = \dfrac{\upsilon_0}{g} + \dfrac{\upsilon_0}{g} = \dfrac{2\upsilon_0}{g}$.

При подъёме (когда $t \le t_{подъем} = \dfrac{\upsilon_0}{g}$) уравнения пути, координаты и высоты совпадают $y = h = S_1 = \upsilon_0 t - \dfrac{gt^2}{2}$. При $t = t_{подъем}$ $S_1 = H$.

Когда тело начинает падать ($t \ge t_{подъем} = \dfrac{\upsilon_0}{g}$), уравнение пути принимает вид $S = S_1 + S_2$,

$$S = H + \frac{gt^2}{2} = H + \frac{1}{2}g\left(t - \frac{\upsilon_0}{g}\right)^2 = \frac{\upsilon_0^2}{2g} + \frac{1}{2}g\left(t - \frac{\upsilon_0}{g}\right)^2; \; S = \frac{\upsilon_0^2}{g} - \upsilon_0 t + \frac{gt^2}{2}.$$

Когда тело снова вернулось в точку A, то $S_2 = H = \frac{gt_{пад}^2}{2}$. Тогда ***время движения равно*** $t = t_{общее} = t_{подъем} + t_{падение}$***, а общий путь, пройденный телом за это время*** **S = 2*H*.**

Графики проекции скорости и проекции ускорения на ось OY от времени. Графики пути и координаты от времени тела, брошенного вертикально вверх

Чтобы построить графики проекции скорости, ускорения на ось OY от времени, запишем и проанализируем уравнения движения тела, брошенного вверх.

Подъём

$g_y = -g = const$

$\upsilon_y = \upsilon_{0y} + g_y t = \upsilon_0 - gt$

$y = y_0 + \upsilon_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2} = \upsilon_0 t - \frac{gt^2}{2}$

$S = \left| \upsilon_0 t - \frac{gt^2}{2} \right|$

Падение

$g_y = -g = const$

$\upsilon_y = \upsilon_{0y} + g_y t = -gt$

$y = y_0 + \upsilon_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2} = H - \frac{gt^2}{2}$

$S = \left| -\frac{gt^2}{2} \right|$

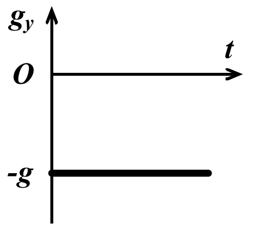


График ускорения

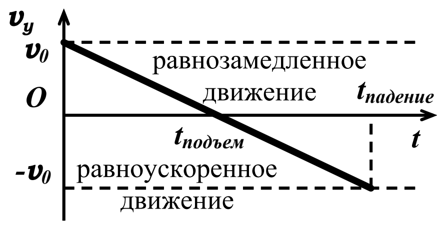


График скорости

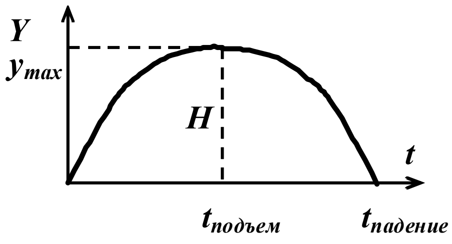


График координаты

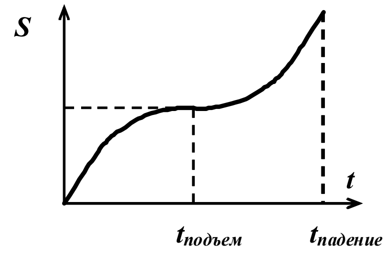


График пути

В интервале времени [0, $t_{подъем}$] графики пути и координаты совпадают, а в интервале [$t_{подъем}$, $t_{падение}$] координата тела уменьшается, а путь продолжает увеличиваться.

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Слушайте и повторяйте слова и словосочетания.*

Падать, тело падает вниз, падение, время падения, скорость падения, подниматься, подъём, время подъёма, высота подъёма, тело бросили вертикально вверх, тело бросили вертикально вниз, тело брошено вертикально вверх, движение тела, брошенного вертикально вверх, тело поднимается вертикально вверх, тело останавливается, тело свободно падает.

Упражнение 2. *Решите задачи.*

1. Тело бросили вертикально вверх. Оно упало на Землю через 8 с. На какую высоту поднялось тело? С какой скоростью его бросили? С какой скоростью оно упало на землю?

2. Тело бросили вертикально вверх. Оно поднялось на высоту 30 м. С какой скоростью бросили тело? Сколько времени оно поднималось?

3. Тело бросили вертикально вверх со скоростью 20 м/с. Чему равна скорость тела в момент времени 4 с? На какой высоте будет тело в этот момент времени? Сколько времени тело поднималось? Чему равна высота подъёма?

4. Тело бросили вертикально вверх со скоростью 10 м/с. На какую максимальную высоту поднимется тело? Сколько времени тело будет подниматься? В какой момент времени тело будет находиться на высоте 3 м?

5. Тело находилось на высоте 15 м над Землей. Его бросили вертикально вверх со скоростью 10 м/с. На какую высоту поднимется тело относительно Земли? Через какое время тело упадет на Землю? Чему равна скорость падения?

6. С высоты 8 м над поверхностью Земли начинает свободно падать тело. Одновременно с высоты 5 м бросают вертикально вверх другое тело с начальной скоростью 3 м/с. Написать уравнения координат тел и найти место их встречи. Выбрать за начало отсчета поверхность Земли.

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. Бросить тело вверх означает сообщить ему начальную скорость ($\vec{v}_0 \neq 0$). Начальная скорость направлена ***вертикально вверх***.
2. Движение тела, брошенного вертикально вверх – это равнопеременное движение с ускорением свободного падения $\vec{g}$.
3. Кинематические уравнения движения в векторной форме:
   $\vec{g} = const$ – уравнение ускорения; $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g}t$ – уравнение скорости; $\Delta\vec{r} = \vec{v}_0 \cdot t + \dfrac{\vec{g} \cdot t^2}{2}$ – уравнение вектора перемещения;
   $\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 \cdot t + \dfrac{\vec{g} \cdot t^2}{2}$ – уравнение радиус-вектора;
   $S = \left|\vec{r} - \vec{r}_0\right| = \left|\vec{v}_0 t + \dfrac{\vec{g}t^2}{2}\right|$ – уравнение пути
4. Движение тела можно разбить на два этапа:
   I этап: тело движется вертикально вверх равнозамедленно **(подъём)** ($v < v_0$, $\vec{g} = const$); тело поднимается на максимальную высоту H и останавливается ($\vec{v} = 0$);
   II этап: тело свободно падает вниз **(падение)**. Оно движется равноускоренно.
5. **Максимальная высота подъёма тела** – путь, пройденный телом за время подъёма.
6. **Кинематические уравнения движения в проекции на ось *OY*:**

Подъём	**Падение**
$g_y = -g = const$	$g_y = -g = const$
$v_y = v_{0y} + g_y t = v_0 - gt$	$v_y = v_{0y} + g_y t = -gt$
$y = y_0 + v_{0y}t + \dfrac{g_y t^2}{2} = v_0 t - \dfrac{gt^2}{2}$	$y = y_0 + v_{0y}t + \dfrac{g_y t^2}{2} = H - \dfrac{gt^2}{2}$
$S = \left\| v_0 t - \dfrac{gt^2}{2} \right\|$	$S = \left\| -\dfrac{gt^2}{2} \right\|$

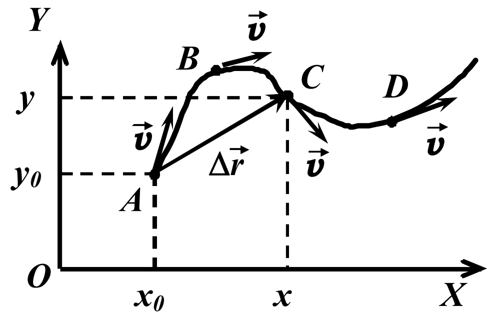
ТЕМА 8. **КРИВОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ**

Новые слова и словосочетания

криволинейное	под углом
горизонт	под углом к горизонту
учитывать, не учитывать	траектория
парабола	совокупность
искусственный	брошенный
дальность	полет
вакуум	принцип
суперпозиция	подчиняться

8.1. **Принцип суперпозиции движений**

И в природе, и в технике очень часто встречаются движения, траектории которых представляют не прямые, а кривые линии. Такие движения называют ***криволинейными***.

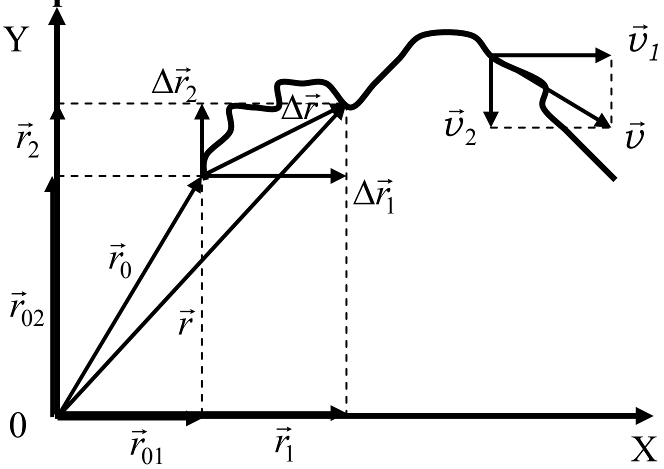


По криволинейным траекториям движутся в космическом пространстве планеты и искусственные спутники, а на Земле – всевозможные тела, части машин и т.д.

При криволинейном движении решать задачи механики труднее потому, что это движение сложнее прямолинейного. Например, при движении тела по плоскости XOY изменяются одновременно две координаты x и y. Направление движения, т.е. направление вектора скорости также все время меняется. Изменяться может и направление вектора ускорения. При этом могут изменяться и модули скорости и ускорения. Таким образом, криволинейное движение – сложное движение.

При изучении сложного движения можно использовать **принцип (правило) суперпозиции (сложения) движений**. Положение точки в любой момент времени t можно определить радиус-вектором $\vec{r}(t)$, скорость – вектором скорости $\vec{v}(t)$, ускорение – вектором ускорения $\vec{a}(t)$. Изменение радиус-вектора, вектора скорости и вектора ускорения во времени – это кинематические уравнения движения тела. Векторный характер закона движения $\vec{r}(t)$ позволяет представить его в виде суммы двух любых других законов движения $\vec{r}_1(t)$ и $\vec{r}_2(t)$, таких, что $\vec{r}(t)=\vec{r}_1(t)+\vec{r}_2(t)$. **В этом случае говорят, что движение** $\vec{r}(t)$ **есть**

сумма (или суперпозиция) движений $\vec{r}_1(t)$ и $\vec{r}_2(t)$. Принципу суперпозиции подчиняются все векторные величины: вектор перемещения, скорость, ускорение.

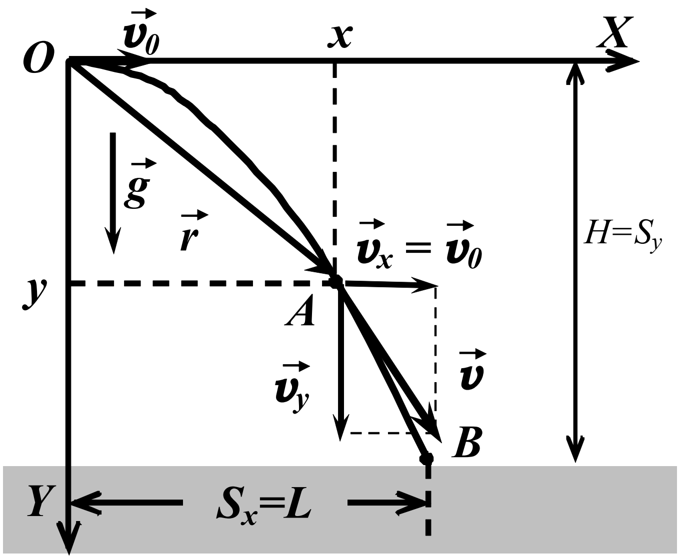


Движение тела в плоскости XOY можно представить как сумму (совокупность, суперпозицию) двух движений: движения по оси *OX* и движения по оси *OY*.

Рассмотрим два случая криволинейного движения.

8.2. Движение тела, брошенного в горизонтальном направлении

Рассмотрим движение тела в вакууме, брошенного горизонтально с начальной скоростью $\vec{\upsilon}_0$ на высоте h. Движение тела можно рассматривать как сумму двух движений:



1) горизонтального (равномерного) со скоростью $\vec{\upsilon}_0$ по оси *OX*;

2) вертикального свободного падения (равноускоренное движение с ускорением $\vec{g}$) по оси OY.

Примем за начало отсчета точку O, из которой брошено тело со скоростью $\vec{\upsilon}_0$, направленной горизонтально.

Ось OX направим горизонтально, а ось OY – вертикально вниз.

Движение тела по оси OX	Движение тела по оси OY
Тело **<u>по оси *OX*</u>** движется равномерно со скоростью $\vec{\upsilon}_0$.	Тело **<u>по оси *OY*</u>** движется равнопеременно (равноускоренно) с ускорением $\vec{g}$.
Кинематические уравнения движения в векторной форме:	
$\vec{\upsilon}_x = \vec{\upsilon}_0 = \text{const}$ $\Delta\vec{r}_x = \vec{\upsilon}_0 t$ $\vec{r}_x = \vec{r}_{0x} + \vec{\upsilon}_0 t$, так как $\vec{r}_{ox} = 0$, то $\vec{r}_x = \vec{\upsilon}_0 t$	$\vec{g}_y = \vec{g} = const$ $\vec{\upsilon}_y = \vec{\upsilon}_{0y} + \vec{g}t$, так как $\vec{\upsilon}_{0y} = 0$, то $\vec{\upsilon}_y = \vec{g}t$ $\Delta\vec{r}_y = \frac{\vec{g}t^2}{2}$ $\vec{r}_y = \vec{r}_{0y} + \frac{\vec{g}t^2}{2}$, так как $\vec{r}_{0y} = 0$, то $\vec{r}_y = \frac{\vec{g}t^2}{2}$
Кинематические уравнения движения в скалярной форме:	
в проекции на ось *OX:*	в проекции на ось OY:
$\upsilon_{0x} = \upsilon_0 = const$ – уравнение проекции скорости; $x = \upsilon_0 t$ – уравнение координаты; $\Delta r_x = (x - x_0) = \upsilon_0 t$ – уравнение проекции вектора перемещения; $S_x = \upsilon_0 t$ – уравнение пути.	$g_y = g = const$ – уравнение проекции ускорения; $\upsilon_y = gt$ – уравнение проекции скорости; $\Delta r_y = y - y_0 = \frac{gt^2}{2}$ – уравнение проекции вектора перемещения; $y = \frac{gt^2}{2}$ – уравнение координаты; $S_y = \frac{gt^2}{2}$ – уравнение пути.

В любой момент времени t проекция скорости $\upsilon_y = gt$; координата $y = \frac{gt^2}{2}$, высота тела над Землей $h = H - y = H - \frac{gt^2}{2}$.

В момент падения на Землю ($h=0$) координата $y=H$, тогда $H=\frac{gt_{пад}^2}{2}$. Время падения тела на Землю $t_{пад}=\sqrt{\frac{2H}{g}}$. Скорость, с которой тело упадет на Землю $\upsilon_{y\ пад}=gt_{пад}=\sqrt{2gH}$. Путь, пройденный телом за время падения по оси *OY*, равен $S_y = H$.

Положение тела в какой-то момент времени t в точке A может быть определено координатами x и y, где $x=\upsilon_0 t$, $y=\frac{gt^2}{2}$.

Тогда уравнение траектории тела, брошенного горизонтально, $y=\frac{g}{2\upsilon_0^2}x^2$. Это уравнение ***<u>параболы</u>***.

Вектор перемещения $\vec{r}=\vec{r}_x+\vec{r}_y=\vec{\upsilon}_0 t+\frac{\vec{g}t^2}{2}$.

Скорость тела в точке A (мгновенная скорость) направлена по касательной к траектории $\vec{\upsilon}=\vec{\upsilon}_0+\vec{g}t$ или $\vec{\upsilon}=\vec{\upsilon}_x+\vec{\upsilon}_y$, где $\vec{\upsilon}_x$ – скорость движения тела по оси *OX*, $\vec{\upsilon}_y$ – скорость движения по оси OY. Модуль мгновенной скорости $\upsilon=\sqrt{\upsilon_0^2+(gt)^2}$.

В момент падения на Землю скорость в точке падения (в точке *B*) будет равна $\upsilon_B=\sqrt{\upsilon_0^2+(gt_{пад})^2}=\sqrt{\upsilon_0^2+2gH}$.

Расстояние, которое тело пролетит по горизонтали, пока не упадет на землю, называется ***<u>дальность полета</u>*** *L*. Время падения тела $t_{пад}$ с высоты H равно времени движения по оси *OX*. За это время тело по оси *OX* пройдет расстояние $S_x = L$. Запишем уравнения движения тела по оси *OX* и по оси OY до точки B (до точки падения):

$$S_x=L=\upsilon_0 t_{пад} \quad \text{(по оси } OX\text{)};$$

$$S_y=H=\frac{gt_{пад}^2}{2} \quad \text{(по оси } OY\text{)}.$$

Тогда дальность полёта тела, брошенного горизонтально $L=\upsilon_0\sqrt{\frac{2H}{g}}$.

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Слушайте и повторяйте слова и словосочетания.*

Криволинейное движение, брошенное горизонтально тело, тело движется по параболе, дальность полета, сложение движений, принцип суперпозиции, криволинейное движение – это сложное движение.

Движение тела по кривой линии – это криволинейное движение.

Движение тела, брошенного горизонтально, состоит из двух простых прямолинейных движений.

В горизонтальном направлении тело движется равномерно и прямолинейно.

В вертикальном направлении тело движется равноускоренно. Эти движения не зависят друг от друга.

Тело, брошенное горизонтально, движется по параболе.

Упражнение 2. *Решите задачи.*

1. Тело находилось на высоте 25 м над Землей. На этой высоте его бросили горизонтально со скоростью 20 м/с. Напишите уравнения проекций скорости на оси OX и OY и уравнения координат $x(t)$ и $y(t)$. По какой траектории будет двигаться тело? Чему равна дальность полета? Через какое время тело упадет на Землю? Чему равна скорость падения?

2. Тело бросили со стола горизонтально с начальной скоростью 3 м/с. В момент падения на Землю скорость тела равна 5 м/с. Найти высоту стола.

3. Тело бросили горизонтально из окна, которое находится на высоте 25 м над Землей. Начальная скорость тела равна 10 м/с. На каком расстоянии от основания дома тело упадет на Землю?

4. Тело бросили горизонтально. Начальная скорость тела равна 15 м/с. Через какое время скорость тела будет направлена под углом 45° к горизонту?

5. Тело бросили горизонтально с высоты 2 м. Тело упало на Землю на расстоянии 7 м от места бросания. Найти модули начальной и конечной скорости тела.

6. Из одной точки одновременно бросили два тела: одно вертикально вверх, другое горизонтально. Начальная скорость каждого тела равна 15м/с. Найти расстояние между телами через 1,5 с.

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. Если траектории движения кривая линия, то такое движение криволинейное.
2. При изучении сложного движения можно использовать **принцип (правило) суперпозиции (сложения) движений**.
3. Векторный характер закона движения $\vec{r}(t)$ позволяет представить его в виде суммы двух любых других законов движения $\vec{r}_1(t)$ и $\vec{r}_2(t)$, таких, что $\vec{r}(t)=\vec{r}_1(t)+\vec{r}_2(t)$. **В этом случае говорят, что движение $\vec{r}(t)$ есть сумма (или суперпозиция) движений $\vec{r}_1(t)$ и $\vec{r}_2(t)$**. Принципу суперпозиции подчиняются все векторные величины: вектор перемещения, скорость, ускорение.
4. Движение тела в плоскости XOY можно представить как сумму (совокупность, суперпозицию) двух движений: движения по оси *OX* и движения по оси *OY*. Движение тела можно рассматривать как сумму двух движений:

   a) горизонтального (равномерного) со скоростью $\vec{\upsilon}_0$ по оси *OX*;

   b) вертикального свободного падения (равноускоренное движение с ускорением $\vec{g}$) по оси *OY*.
5. Тогда уравнение траектории тела, брошенного горизонтально, $y=\dfrac{g}{2\upsilon_0^2}x^2$. Это уравнение ***параболы***.
6. Расстояние, которое тело пролетит по горизонтали, пока не упадет на землю, называется ***дальность полета*** *L*. Дальность полета равна $S_x=L=\upsilon_0 t_{пад}$.
7. Кинематические уравнения движения тела, брошенного горизонтально:

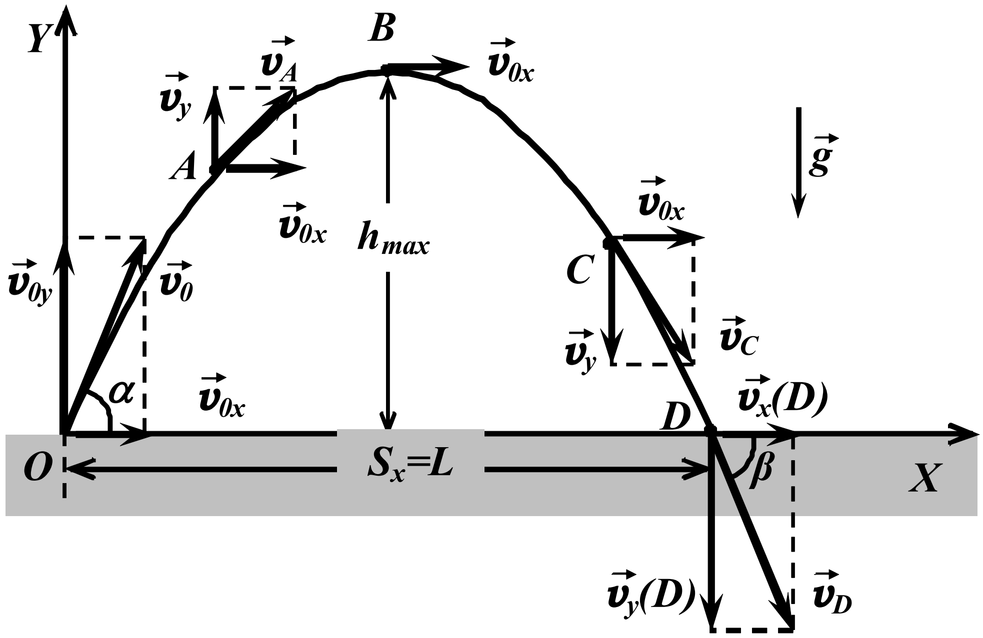
Кинематические уравнения движения в векторной форме:	
$\vec{\upsilon}_x = \vec{\upsilon}_0 = \text{const}$ $\Delta\vec{r}_x = \vec{\upsilon}_0 t$ $\vec{r}_x = \vec{r}_{0x} + \vec{\upsilon}_0 t$, так как $\vec{r}_{ox} = 0$, то $\vec{r}_x = \vec{\upsilon}_0 t$	$\vec{g}_y = \vec{g} = const$ $\vec{\upsilon}_y = \vec{\upsilon}_{0y} + \vec{g}t$, так как $\vec{\upsilon}_{0y} = 0$, то $\vec{\upsilon}_y = \vec{g}t$ $\Delta\vec{r}_y = \frac{\vec{g}t^2}{2}$ $\vec{r}_y = \vec{r}_{0y} + \frac{\vec{g}t^2}{2}$, так как $\vec{r}_{0y} = 0$, то $\vec{r}_y = \frac{\vec{g}t^2}{2}$

Кинематические уравнения движения в скалярной форме:	
в проекции на ось *OX:*	в проекции на ось OY:
$\upsilon_{0x} = \upsilon_0 = const$ – уравнение проекции скорости; $x = \upsilon_0 t$ – уравнение координаты; $\Delta r_x = (x - x_0) = \upsilon_0 t$ – уравнение проекции вектора перемещения; $S_x = \upsilon_0 t$ – уравнение пути.	$g_y = g = const$ – уравнение проекции ускорения; $\upsilon_y = gt$ – уравнение проекции скорости; $\Delta r_y = y - y_0 = \frac{gt^2}{2}$ – уравнение проекции вектора перемещения; $y = \frac{gt^2}{2}$ – уравнение координаты; $S_y = \frac{gt^2}{2}$ – уравнение пути.

8. Время падения тела на Землю $t_{пад} = \sqrt{2H/g}$. Скорость, с которой тело упадет на Землю $\upsilon_{y\ пад} = gt_{пад} = \sqrt{2gH}$.
9. Скорость тела в точке A (мгновенная скорость) направлена по касательной к траектории $\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_0 + \vec{g}t$ или $\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_x + \vec{\upsilon}_y$, где $\vec{\upsilon}_x$ – скорость движения тела по оси *OX*, $\vec{\upsilon}_y$ – скорость движения по оси *OY*. Модуль мгновенной скорости $\upsilon = \sqrt{\upsilon_0^2 + (gt)^2}$.
10. В момент падения на Землю скорость в точке падения (в точке *B*) будет равна $\upsilon_B = \sqrt{\upsilon_0^2 + (gt_{пад})^2} = \sqrt{\upsilon_0^2 + 2gH}$.

8.3. **<u>Движение тела, брошенного под углом к горизонту</u>**

Пусть тело брошено под углом α к горизонту со скоростью $\vec{v}_0$ в вакууме. Движение тела, брошенного под углом к горизонту – это криволинейное движение. Траектория движения представляет собой параболу.



При изучении криволинейного движения можно использовать **принцип (правило) суперпозиции (сложения) движений**. Изучаемое движение складывается из двух движений:

1) равномерного и прямолинейного движения по оси *OX*;
2) равнопеременного движения тела по оси *OY* (сначала равнозамедленное движение вверх с ускорением свободного падения до максимальной высоты подъема, а затем свободное падение вниз без начальной скорости).

Примем за начало отсчета точку O, из которой брошено тело со скоростью $\vec{v}_0$ под углом α к горизонту. Ось OX направим горизонтально, а ось OY – вертикально вверх. <u>Разложим скорость $\vec{v}_0$ на составляющие $\vec{v}_{0x}$ и $\vec{v}_{0y}$</u>. <u>Таким образом, начальная скорость движения тела по оси *OX* равна $\vec{v}_{0x}$</u>, а <u>начальная скорость движения по оси *OY* равна</u> $\vec{v}_{0y}$.

Запишем кинематические уравнения движения по оси OX и по оси OY.

<table>
<tr><th>Движение тела по оси OX:</th><th>Движение тела по оси OY:</th></tr>
<tr><td>Тело <u>по оси OX</u> движется равномерно со скоростью $\vec{\upsilon}_{0x}$.</td><td>Тело <u>по оси OY</u> движется равнопеременно с ускорением $\vec{g}$
1. от точки O до точки B равнозамедленно с начальной скоростью $\vec{\upsilon}_{0y}$;
2. от точки B до точки D равноускоренно с начальной скоростью равной нулю.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Кинематические уравнения движения в векторной форме:</td></tr>
<tr><td>$\vec{\upsilon}_{0x} = const$
$\Delta\vec{r}_x = \vec{\upsilon}_{0x}t$
$\vec{r}_x = \vec{r}_{0x} + \vec{\upsilon}_{0x}t$, так как $\vec{r}_{ox} = 0$, то $\vec{r}_x = \vec{\upsilon}_{0x}t$</td><td>$\vec{g}_y = \vec{g} = const$
$\vec{\upsilon}_y = \vec{\upsilon}_{0y} + \vec{g}t$,
$\Delta\vec{r}_y = \vec{\upsilon}_{0y}t + \frac{\vec{g}t^2}{2}$
$\vec{r}_y = \vec{r}_{0y} + \vec{\upsilon}_{0y}t + \frac{\vec{g}t^2}{2}$, так как $\vec{r}_{0y} = 0$, то $\vec{r}_y = \vec{\upsilon}_{0y}t + \frac{\vec{g}t^2}{2}$</td></tr>
<tr><td colspan="2">Кинематические уравнения движения в скалярной форме:</td></tr>
<tr><td>в проекции на ось OX:</td><td>в проекции на ось OY:</td></tr>
<tr><td>$\upsilon_{0x} = \upsilon_0 \cos\alpha = const -$ уравнение проекции скорости;
$x = \upsilon_{0x}t$ – уравнение координаты;
$\Delta r_x = (x - x_0) = \upsilon_{0x}t$ – уравнение проекции вектора перемещения;
$S_x = \upsilon_{0x}t$ – уравнение пути.</td><td>$g_y = -g = const -$ уравнение проекции ускорения;
$\upsilon_{0y} = \upsilon_0 \sin\alpha$
$\upsilon_y = \upsilon_{oy} - gt$ – уравнение проекции скорости;
$\Delta r_y = (y - y_0) = \upsilon_{0y}t - \frac{gt^2}{2}$ – уравнение проекции вектора перемещения;
$y = \upsilon_{0y}t - \frac{gt^2}{2}$ – уравнение координаты;
$S_y = \upsilon_{0y}t - \frac{gt^2}{2}$ – уравнение пути.</td></tr>
</table>

ЗАПОМНИТЕ!

Движение тела, брошенного под углом к горизонту – это движение с ускорением свободного падения $\vec{g}$.

Кинематические уравнения движения тела, брошенного под углом к горизонту, имеют вид:

$\upsilon_x(t) = \upsilon_{0x} = \upsilon_0 \cos\alpha = const$ $x(t) = \upsilon_{0x} t = \upsilon_0 \cos\alpha \cdot t$	$g_y = -g = const$ $\upsilon_y(t) = \upsilon_{0y} - gt = \upsilon_0 \sin\alpha - gt$ $y(t) = \upsilon_{0y} t - \frac{gt^2}{2} = \upsilon_0 \sin\alpha \cdot t - \frac{gt^2}{2}$

Из кинематических уравнений движения тела, брошенного под углом к горизонту, можно найти все физические величины, характеризующие сложное криволинейное движение.

Время подъёма тела до точки *B* – $t_{подъём}$.

По оси OY от точки O до точки B тело движется равнозамедленно, поэтому в точке B проекция скорости на ось OY равна нулю. Время движения до точки B – время подъёма $t_{подъём}$. Из уравнения проекции скорости по оси OY: $\upsilon_y(B) = \upsilon_{0y} - gt_{подъём} = \upsilon_0 \sin\alpha - gt_{подъём} = 0$, найдем $t_{подъём} = \frac{\upsilon_0 \cdot \sin\alpha}{g}$.

Максимальная высота подъёма – $h_{\max}$.

В момент $t_{подъём}$ тело находится на максимальной высоте $h_{\max}$ (координата y в момент $t_{подъём}$ равна $h_{\max}$). Из уравнения движения по оси OY $y(t) = \upsilon_{0y} t - \frac{gt^2}{2} = \upsilon_0 \sin\alpha \cdot t - \frac{gt^2}{2}$, найдем $h_{\max}$.

$$h_{\max} = \upsilon_0 \sin\alpha \cdot t_{подъём} - \frac{gt^2_{подъём}}{2} = \frac{(\upsilon_0 \sin\alpha)^2}{2g}.$$

Время движения тела $t_{дв}$ **(от точки *O* до точки *D*).**

Точка D – это точка падения тела на Землю. В момент падения на Землю координата тела y по оси OY **равна нулю**, поэтому из уравнения движения найдем $t_{дв}$.

$$y(t_{дв}) = \upsilon_{0y} t_{дв} - \frac{gt_{дв}^2}{2} = \upsilon_0 \sin\alpha \cdot t_{дв} - \frac{gt_{дв}^2}{2} = 0 \quad \Longrightarrow t_{дв} = 2\frac{\upsilon_0 \sin\alpha}{g}.$$

<u>Время падения тела (время движения от точки *B* до точки *D*)</u> – $t_{пад}$.

Время падения тела **(время движения от точки *B* до точки *D*)** найдем, если из времени движения вычесть время подъёма: $t_{пад} = t_{дв} - t_{подъём} = 2\frac{\upsilon_0 \sin\alpha}{g} - \frac{\upsilon_0 \sin\alpha}{g} = \frac{\upsilon_0 \sin\alpha}{g}$. Время падения тела $t_{пад}$ **(время движения от точки *B* до точки *D*)** ***равно*** времени подъёма тела $t_{подъём}$.

ЗАПОМНИТЕ!

Когда тело брошено под углом к горизонту, время подъёма и время падения равны.

<u>Скорость падения на Землю</u> $\vec{\upsilon}_{пад}$.

Найдем проекции скорости тела в момент падения на Землю.

$\upsilon_x(D) = \upsilon_x(t_{дв}) = \upsilon_{пад\,x} = \upsilon_{0x} = \upsilon_0 \cos\alpha = const$;

$\upsilon_y(D) = \upsilon_{пад\,y} = \upsilon_{0y} - gt_{дв} = \upsilon_0 \sin\alpha - gt_{дв} = -\upsilon_0 \sin\alpha$.

Модуль скорости падения $\upsilon_{пад} = \sqrt{\upsilon_{пад\,x}^2 + \upsilon_{пад\,y}^2} = \upsilon_0$. Модуль скорости падения равен модулю начальной скорости $\upsilon_{пад} = \upsilon_0$.

ЗАПОМНИТЕ!

Когда тело брошено под углом к горизонту, модуль начальной скорости и модуль скорости падения на Землю равны.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

$\vec{\upsilon}_y(O) \uparrow\downarrow \vec{\upsilon}_y(D)$ – направление составляющих вектора начальной скорости и скорости падения противоположные;

$|\vec{\upsilon}_y(O)| = |\vec{\upsilon}_y(D)|$ – модуль проекции скорости падения на ось OY равен модулю проекции начальной скорости на эту же ось.

Направление скорости падения и начальной скорости разное: начальная скорость $\vec{\upsilon}_0$ направлена вверх под углом α к горизонту, а скорость падения $\vec{\upsilon}_{пад}$ – вниз под углом α к горизонту. Из рисунка видно, что $tg\beta = \dfrac{|\upsilon_{пад\,y}|}{|\upsilon_{пад\,x}|} = \dfrac{|-\upsilon_0 \sin\alpha|}{|\upsilon_0 \cos\alpha|} = tg\alpha$ или $\beta = \alpha$.

<u>Дальность полета</u> $S_x = L$ **<u>(расстояние, которое пролетело тело за время полета по оси *OX*)</u>.**

Из уравнения пути по оси *OX* найдем дальность полета:

$$S_x = L = \upsilon_{0x} t_{дв} \text{ или } x(t_{дв}) = \upsilon_{0x} t_{дв} = \upsilon_0 \cos\alpha \cdot t_{дв} = L;$$

подставим в уравнение $t_{дв} = 2\dfrac{\upsilon_0 \sin\alpha}{g}$, получим $L = \dfrac{\upsilon_0^2 \sin 2\alpha}{g}$.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Дальность полета будет максимальной, когда $\sin 2\alpha = 1$, следовательно $\alpha = 45°$. Таким образом, если тело бросить под углом $\alpha = 45°$ к горизонту, то дальность полета будет максимальной $S_{\max} = \dfrac{\upsilon_0^2}{g}$.

<u>Уравнение траектории движения тела, брошенного под углом к горизонту</u> можно найти, если известны зависимости координат *x(t)* и *y(t)* от времени.

Найдем уравнение траектории

$x(t) = \upsilon_0 \cos\alpha \cdot t$, из этого уравнения найдем *t*: $t = \dfrac{x}{\upsilon_0 \cos\alpha}$ и подставим в уравнение координаты *y(t)*: $y(t) = \upsilon_0 \sin\alpha \cdot t - \dfrac{gt^2}{2}$.

После подстановки получим:

$$y(x) = \upsilon_0 \sin\alpha \cdot \frac{x}{\upsilon_0 \cos\alpha} - \frac{g}{2} \cdot \left(\frac{x}{\upsilon_0 \cos\alpha}\right)^2 = tg\alpha \cdot x - \frac{g}{2} \cdot \frac{x^2}{(\upsilon_0 \cos\alpha)^2}.$$

Из уравнения видно, что координата *y* зависит от x^2 – это квадратичная зависимость. Значит линия *y = f(x)* – парабола. Поэтому **траектория тела, брошенного под углом к горизонту – парабола.**

<u>Мгновенная скорость в любой момент времени.</u> В произвольный момент времени проекции скорости на оси OX и OY равны:

$$\upsilon_x(t)=\upsilon_{0x}=\upsilon_0\cos\alpha=const \quad \text{и} \quad \upsilon_y(t)=\upsilon_{0y}-gt=\upsilon_0\sin\alpha-gt,$$

тогда **мгновенная скорость тела, брошенного под углом к горизонту в любой момент времени в любой точке траектории направлена по касательной к траектории и равна**

$$\upsilon=\sqrt{\upsilon_x^2+\upsilon_y^2}=\sqrt{(\upsilon_0\cos\alpha)^2+(\upsilon_0\sin\alpha-gt)^2}\ .$$

<u>УПРАЖНЕНИЯ</u>

<u>Упражнение 1.</u> *Слушайте и повторяйте слова и словосочетания.*

Касательная; касательная к траектории; касательная к траектории в точке; мгновенная скорость; тело, брошенное горизонтально; тело, брошенное под углом к горизонту; парабола; тело движется по параболе; дальность полета; дальность полета тела; горизонтальная дальность полета тела; максимальная высота подъёма; высота подъёма над Землей.

<u>Упражнение 2.</u> *Решите задачи.*

1. Тело бросили под углом α = 30° к горизонту с начальной скоростью 60 м/с. С какой скоростью оно упадет на Землю? Сколько времени тело будет двигаться? Чему равна дальность полета?

2. Тело бросили под углом α = 45° к горизонту. Оно упало на Землю на расстоянии 200 м от точки бросания. Чему равна начальная скорость тела? Сколько времени тело поднималось? На какую высоту поднялось тело? Сколько времени двигалось тело? С какой скоростью тело упало на Землю?

3. Тело бросили под углом α = 60° к горизонту. Тело поднялось на высоту 100 м. Чему равна начальная скорость тела? Сколько времени тело поднималось? Сколько времени тело падало? Чему равно время движения? Чему равна дальность полета?

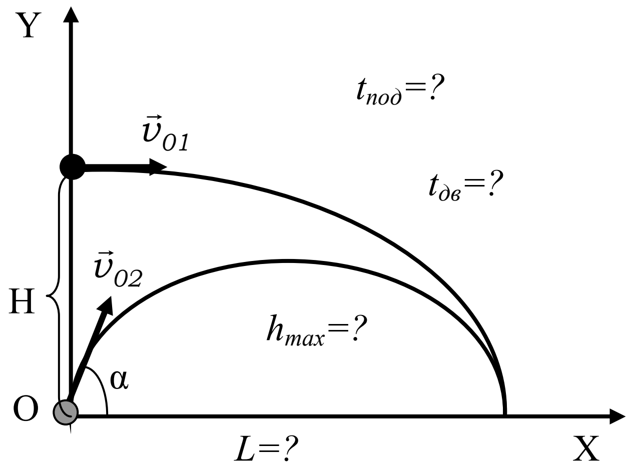
4. Тело бросили под углом α = 45° со скоростью 20 м/с. На какую высоту поднимется тело? Сколько времени тело будет подниматься? В

какой момент времени тело будет находиться на высоте 5 м над Землей? Постройте графики зависимости координат $x = f(t)$ и $y = f(t)$.

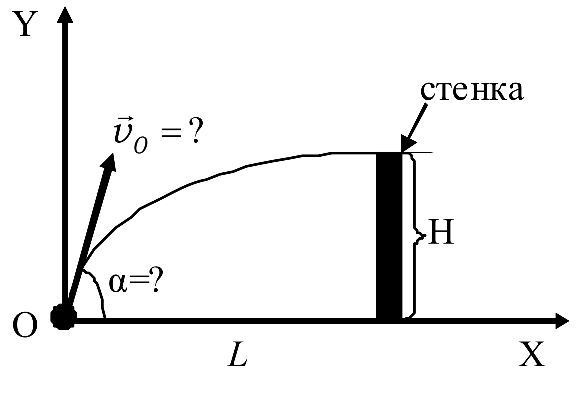
5. На высоте 20 м над Землей тело бросили под углом $\alpha = 60°$ к горизонту с начальной скоростью 30 м/с. Напишите кинематические уравнения движения тела. По какой траектории будет двигаться тело? Сколько времени тело будет подниматься? На какую высоту над Землей поднимется тело? Сколько времени тело будет падать? Чему равна дальность полета? Чему равна скорость падения? Чему равно время движения?

6. Два тела бросили из одной точки под углами α_1 и α_2 к горизонту. Тела упали на Землю в одном месте. Найти отношение начальных скоростей тел.

<u>Упражнение 3.</u> *Составить и решить задачу по рисунку.*



<u>Упражнение 4.</u> *Составить и решить задачу по рисунку.*



ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. При изучении криволинейного движения можно использовать **принцип (правило) суперпозиции (сложения) движений**. Изучаемое движение складывается из двух движений:
а) равномерного и прямолинейного движения по оси *OX*;
б) равнопеременного движения тела по оси *OY* (сначала равнозамедленное движение вверх с ускорением свободного падения до максимальной высоты подъема, а затем свободное падение вниз без начальной скорости).

2. Кинематические уравнения движения

Кинематические уравнения движения в векторной форме:	
$\vec{\upsilon}_{0x} = const$ $\Delta\vec{r}_x = \vec{\upsilon}_{0x}t$ $\vec{r}_x = \vec{r}_{0x} + \vec{\upsilon}_{0x}t$, так как $\vec{r}_{ox} = 0$, то $\vec{r}_x = \vec{\upsilon}_{0x}t$	$\vec{g}_y = \vec{g} = const$ $\vec{\upsilon}_y = \vec{\upsilon}_{0y} + \vec{g}t$, $\Delta\vec{r}_y = \vec{\upsilon}_{0y}t + \dfrac{\vec{g}t^2}{2}$ $\vec{r}_y = \vec{r}_{0y} + \vec{\upsilon}_{0y}t + \dfrac{\vec{g}t^2}{2}$, так как $\vec{r}_{0y} = 0$, то $\vec{r}_y = \vec{\upsilon}_{0y}t + \dfrac{\vec{g}t^2}{2}$

3. Кинематические уравнения движения тела, брошенного под углом к горизонту, в скалярной форме имеют вид:

$\upsilon_x(t) = \upsilon_{0x} = \upsilon_0 \cos\alpha = const$ $x(t) = \upsilon_{0x}t = \upsilon_0 \cos\alpha \cdot t$	$g_y = -g = const$ $\upsilon_y(t) = \upsilon_{0y} - gt = \upsilon_0 \sin\alpha - gt$ $y(t) = \upsilon_{0y}t - \dfrac{gt^2}{2} = \upsilon_0 \sin\alpha \cdot t - \dfrac{gt^2}{2}$

4. **Время подъёма тела** $t_{подъём} = \dfrac{\upsilon_0 \cdot \sin\alpha}{g}$.

5. **Максимальная высота подъёма**

$$h_{\max} = \upsilon_0 \sin\alpha \cdot t_{подъём} - \frac{gt^2_{подъём}}{2} = \frac{(\upsilon_0 \sin\alpha)^2}{2g}.$$

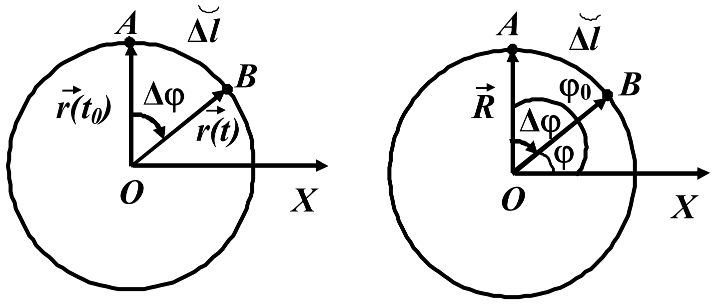
6. **Время движения тела** $t_{дв}$: $t_{дв} = 2\frac{\upsilon_0 \sin\alpha}{g}$. Когда тело брошено под углом к горизонту, время подъёма и время падения равны.
7. **скорость падения на Землю** $\upsilon_{пад} = \upsilon_0$**.** Когда тело брошено под углом к горизонту, модуль начальной скорости и модуль скорости падения на Землю равны.
8. **Дальность полета** $S_x = L$ **(расстояние, которое пролетело тело за время полета по оси *OX*):** $L = \frac{\upsilon_0^2 \sin 2\alpha}{g}$. Дальность полета будет максимальной, когда $\sin 2\alpha = 1$, следовательно $\alpha = 45°$. Таким образом, если тело бросить под углом $\alpha = 45°$ к горизонту, то дальность полета будет максимальной $S_{\max} = \frac{\upsilon_0^2}{g}$.
9. Уравнение траектории движения тела, брошенного под углом к горизонту – уравнение параболы. **Траектория движения – парабола.**
10. Мгновенная скорость тела, брошенного под углом к горизонту в любой момент времени в любой точке траектории направлена по касательной к траектории и равна $\upsilon = \sqrt{\upsilon_x^2 + \upsilon_y^2} = \sqrt{(\upsilon_0 \cos\alpha)^2 + (\upsilon_0 \sin\alpha - gt)^2}$.

8.4. Равномерное движение материальной точки по окружности

Новые слова и словосочетания

угловая скорость	угловое перемещение
центральный угол	полный центральный угол
радиус окружности	длина окружности
длина дуги	длина дуги окружности
вращение	частота вращения
угол поворота	период
периодическое движение	оборот
центростремительное	нормальное

Движение по окружности – это криволинейное движение. Траектория движения – окружность.



Материальная точка движется по окружности из точки А в точку В, ее положение изменяется относительно точки О. Точка О – центр окружности. В любой момент времени положение материальной точки однозначно определяется углом φ между осью OX и радиус-вектором $\vec{r}$, проведенным из точки O к материальной точке (угловая координата). При движении точки угол φ изменяется. За время движения Δt угол изменился на $\Delta\varphi$ (или радиус-вектор повернулся на угол $\Delta\varphi$).

Для нахождения положения точки в любой момент времени нужно знать угол φ_0 в начальный момент времени t_0 и определить, на сколько изменился угол за время движения $\Delta\varphi$, тогда $\varphi = \varphi_0 + \Delta\varphi$.

Так как точка движется по окружности, то модуль радиус-вектора $|\vec{r}|$ в любой момент времени – это постоянная величина и равная R. R – радиус окружности.

$\Delta\varphi$ – **центральный угол** (угол между двумя радиус-векторами $\vec{r}(t_0)$ и $\vec{r}(t)$, определяющими положение точки на окружности в моменты времени t_0 и $t = t_0 + \Delta t$).

Единица измерения центрального угла – 1 радиан (1 рад) или 1 градус (1°). В системе СИ угол измеряется в радианах.

Часть окружности между точками A и B – это **дуга окружности** $\breve{\Delta l}$. Длина дуги окружности $\breve{\Delta l}$ это расстояние, которое прошла точка за время Δt движения по окружности. **Центральный угол равен 1 радиану, если длина дуги $\breve{\Delta l}$ равна радиусу окружности *R*. ($\Delta\varphi = 1$ рад, если $\Delta l = R$). Значит, длину дуги Δl можно найти, если умножить центральный угол (в радианах) на радиус окружности *R*:**

$$\Delta l = R \cdot \Delta\varphi.$$

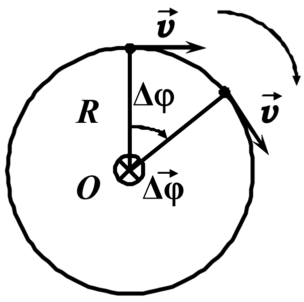
Если материальная точка сделала **полный оборот** по окружности (снова вернулась в точку A), то **полный центральный угол равен 2π радиан** ($\pi = 3{,}1415926535\ldots$). Тогда длина всей окружности равна $l = 2\pi R$.

Угловые кинематические характеристики движения материальной точки по окружности

1. **Угловое перемещение.**

Если точка движется по окружности, то радиус-вектор поворачивается. За время движения $\Delta t = t - t_0$ радиус-вектор повернулся на угол $\Delta\varphi$.

$\Delta\vec{\varphi}$ – угловое перемещение точки за время Δt. **Угловое перемещение – это вектор, направление которого определяется по правилу буравчика (правого винта) и связано с направлением движения точки по окружности. Если буравчик вращать по направлению движения точки по окружности, то поступательное движение буравчика совпадает с направлением вектора** $\Delta\vec{\varphi}$**.** На рисунке вектор $\Delta\vec{\varphi}$ направлен «от нас», перпендикулярно рисунку и проходит через точку *O*. Направление «от нас» на рисунке изображается маленьким кружочком с крестиком внутри ⊗. (Говорят, что вектор $\Delta\vec{\varphi}$ направлен «от нас» по оси вращения. Ось вращения – это прямая, которая проходит через точку *O* перпендикулярно плоскости вращения точки).

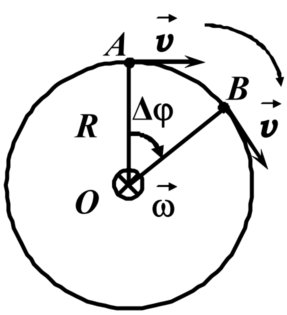


Направление «к нам» на рисунке изображается маленьким кружочком с точкой внутри ⊙.

2. **Угловая скорость.**

Средняя угловая скорость – это физическая величина, которая определяет быстроту вращения точки по окружности. Средняя угловая скорость равна отношению углового перемещения к промежутку времени, за который это перемещение произошло:

$$\vec{\omega}_{cp} = \frac{\Delta\vec{\varphi}}{\Delta t}.$$



Средняя угловая скорость – это вектор, который направлен также как вектор углового перемещения $\Delta\vec{\varphi}$ **(по оси вращения).** На рисунке точка движется по часовой стрелке, поэтому вектор угловой скорости направлен «от нас» за чертеж перпендикулярно плоскости чертежа по оси вращения, проходящей через точку O. Символически это на рисунке изображается маленьким кружочком с крестиком внутри ⊗.

Мгновенная угловая скорость $\vec{\omega}$ – это средняя угловая скорость за очень маленький промежуток времени:

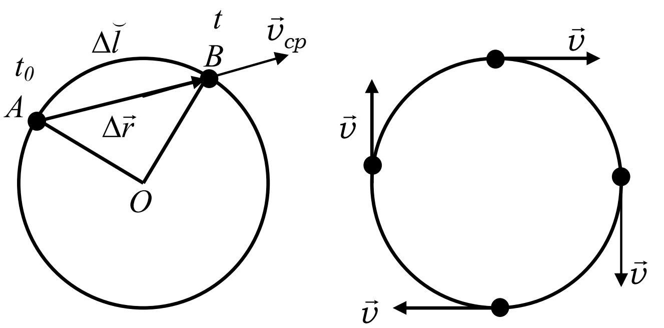
$$\vec{\omega} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{\varphi}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}.$$

Вектор мгновенной угловой скорости направлен также как вектор средней угловой скорости.

Угловая скорость измеряется в радианах в секунду (рад/с или $с^{-1}$).

3. **<u>Линейная скорость вращения.</u>**

Если точка переместилось за время движения из точки A в точку B, то вектор перемещения $\Delta\vec{r}$ направлен из точки A в точку B. $\Delta\vec{r}$ – это вектор линейного перемещения точки. Средняя линейная скорость движения точки равна $\vec{\upsilon}_{ср} = \dfrac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$. Вектор средней линейной скорости направлен по направлению вектора линейного перемещения $\Delta\vec{r}$ ($\vec{\upsilon}_{ср} \uparrow\uparrow \Delta\vec{r}$).



Мгновенная линейная скорость $\vec{\upsilon}$ (линейная скорость) – это средняя линейная скорость за очень маленький промежуток времени. $\vec{\upsilon} = \lim\limits_{\Delta t \to 0} \vec{\upsilon}_{ср} = \lim\limits_{\Delta t \to 0} \dfrac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$. Когда $\Delta t \to 0, \Delta\vec{r} \to 0$ и вектор $\vec{\upsilon}$ направлен по касательной к траектории (окружности).

Мгновенная линейная скорость в каждой точке направлена по касательной к траектории движения (окружности).

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

При равномерном движении точки по окружности, скорость не изменяется по модулю, но изменяется по направлению.

4. **Период и частота вращения.**

Время, за которое точка совершает один полный оборот по окружности, называется *периодом*. Если за время t точка делает N полных оборотов по окружности, то время, за которое точка совершает 1 оборот – это период вращения $T = \frac{t}{N}$.

> ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!
>
> Время, за которое точка делает один оборот или время одного оборота.

За один оборот радиус R поворачивается на угол 2π, тогда $T = \frac{2\pi}{\omega}$.

Число полных оборотов точки за единицу времени (за 1 секунду) называется частотой вращения $\nu = \frac{N}{t}$ или $\nu = \frac{1}{T}$. Тогда $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$.

Частота вращения – это величина обратная периоду. Частота обозначается буквой ν (ню) и измеряется в Герцах. 1 *Гц* = 1 *с* $^{-1}$. Частота также измеряется в оборотах за единицу времени: *об/с*, *об/мин*, *об/час.*

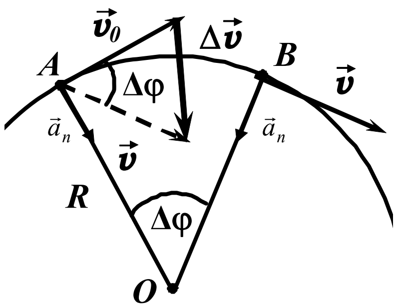
Если линейная скорость точки, равномерно движущейся по окружности υ, то за время равное периоду *T*, точка проходит по окружности путь, равный длине окружности $2\pi R$, тогда $\upsilon = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi R\nu = \omega R$, или $\omega = \frac{\upsilon}{R}$.

5. **Нормальное (центростремительное) ускорение.**

Если точка движется по окружности, то направление вектора линейной скорости непрерывно изменяется. Значит, **равномерное движение по окружности – ускоренное движение (движение с ускорением).**

Ускорение, как известно, определяется равенством $\vec{a} = \frac{\vec{\upsilon} - \vec{\upsilon}_0}{\Delta t} = \frac{\Delta\vec{\upsilon}}{\Delta t}$.

Вектор ускорения направлен также как $\Delta\vec{\upsilon}$. Из рисунка видно, что вектор $\Delta\vec{\upsilon}$ направлен внутрь окружности. Если $\Delta t \to 0$, то $\Delta\vec{\upsilon}$ будет направлен к центру окружности. Таким образом, при равномерном движении точки по окружности ускорение во всех точках окружности «устремлено» к ее центру. Поэтому это ускорение называется ***<u>центростремительным ускорением или нормальным ускорением</u>***. Нормальное (центростремительное) ускорение характеризует изменение линейной скорости по направлению. **Вектор нормального ускорения $\vec{a}_n$ направлен к центру окружности по радиусу.**



Так как ускорение $a_n = \dfrac{\Delta\upsilon}{\Delta t}$. При малых углах Δφ поворота радиуса $\Delta\upsilon = \upsilon\cdot\Delta\varphi$, а $\Delta\varphi = \omega\cdot\Delta t$. Тогда $a_n = \dfrac{\upsilon\cdot\omega\cdot\Delta t}{\Delta t} = \upsilon\cdot\omega$.

Нормальное ускорение характеризует ***<u>быстроту изменения линейной скорости только по направлению</u>***. Так как $\omega = \dfrac{\upsilon}{R}$, то $a_n = \dfrac{\upsilon^2}{R}$ или $a_n = \omega^2 R$.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Вектор нормального ускорения $\vec{a}_n$ направлен к центру окружности по радиусу.
Вектор линейной скорости направлен по касательной.
Касательная перпендикулярна радиусу окружности, поэтому вектор нормального ускорения перпендикулярен вектору линейной скорости: $\vec{a}_n \perp \vec{\upsilon}$.

6. <u>Кинематические уравнения равномерного движения материальной точки по окружности</u>

<u>Равномерным движением по окружности</u> называют движение по окружности с постоянной по величине и переменной по направлению скоростью, т.е. $|\vec{\upsilon}| = const$, но $\vec{\upsilon} \neq const$. В этом случае модули средней и мгновенной линейных скоростей равны.

Если $\Delta t \to 0$, то $|\Delta\vec{r}| = \Delta l$, тогда

$$\upsilon = \lim_{\Delta t\to 0}\upsilon_{cp} = \lim_{\Delta t\to 0}\frac{|\Delta\vec{r}|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta l}{\Delta t} = \lim_{\Delta t\to 0}\frac{R\cdot\Delta\varphi}{\Delta t} = R\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = R\cdot\omega.$$

Из уравнения видно, что если $|\vec{v}| = const$**, то** $|\vec{\omega}| = const$**. При равномерном движении точки по окружности угловая скорость вращения постоянная** $|\vec{\omega}| = |\vec{\omega}_{cp}| = \omega_0 = const$ **(направление движения не меняется). Говорят, что точка равномерно вращается с угловой скоростью** $\vec{\omega}_0$**.** Кинематическое уравнение угловой скорости равномерного движения материальной точки по окружности: $\vec{\omega} = const = \vec{\omega}_0$.

Так как $\vec{\omega}_{cp} = \dfrac{\Delta\vec{\varphi}}{\Delta t}$, то угловое перемещение можно найти по формуле $\Delta\vec{\varphi} = \vec{\omega}_{cp}\Delta t$ – кинематическое уравнение углового перемещения в векторной форме.

Вектор $\Delta\vec{\varphi}$ и вектор $\vec{\omega}_{cp}$ направлены одинаково, поэтому проекция углового перемещения на ось вращения равна $\Delta\varphi = \omega_{cp}\Delta t = \omega_0\Delta t$ – кинематическое уравнение перемещения в скалярной форме.

В любой момент времени положение материальной точки однозначно определяется углом φ между осью OX и радиус-вектором $\vec{r}$, проведенным из точки O к материальной точке (угловой координатой). **Поэтому** $\varphi = \varphi_0 + \Delta\varphi$ **или** $\varphi = \varphi_0 + \omega_0\Delta t$ **– это кинематическое уравнение угловой координаты материальной точки на окружности.**

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!	
Кинематические уравнения материальной точки, движущейся	
РАВНОМЕРНО И ПРЯМОЛИНЕЙНО вдоль оси OX:	**РАВНОМЕРНО ПО ОКРУЖНОСТИ:**
$\vec{v} = const = \vec{v}_0$ – уравнение вектора скорости;	$\vec{\omega} = const = \vec{\omega}_0$ – уравнение вектора угловой скорости;
$\Delta\vec{r} = \vec{v}_{cp}\Delta t = \vec{v}\Delta t$ – уравнение вектора перемещения;	$\Delta\vec{\varphi} = \vec{\omega}_{cp}\Delta t$ – уравнение вектора углового перемещения;
$\Delta r_x = v_x\Delta t$ – уравнение проекции вектора перемещения на ось OX;	$\Delta\varphi = \omega_{cp}\Delta t = \omega_0\Delta t$ – уравнение проекции вектора углового перемещения на ось вращения;
$x = x_0 + v_0\Delta t$ – уравнение координаты материальной точки.	$\varphi = \varphi_0 + \omega_0\Delta t$ – уравнение угловой координаты.

ЗАПОМНИТЕ!

Физические величины, характеризующие вращательное движение точки:

$T = t / N$ – период вращения;

$\nu = N / t$ или $\nu = 1/T$ – частота вращения;

$\omega = \dfrac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$ – угловая скорость вращения;

$\upsilon = \dfrac{2\pi R}{T} = 2\pi R\nu = \omega R$, или $\omega = \dfrac{\upsilon}{R}$ – связь линейной и угловой скорости вращения;

$a_n = \dfrac{\upsilon^2}{R}$ или $a_n = \omega^2 R$ – связь нормального ускорения с линейной и угловой скоростью вращения;

$\Delta\vec{\varphi} = \vec{\omega}_{cp}\Delta t$ или $\Delta\varphi = \omega_{cp}\Delta t = \omega_0\Delta t$ – кинематическое уравнение углового перемещения;

$\varphi = \varphi_0 + \omega_0\Delta t$ **– кинематическое уравнение угловой координаты.**

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Слушайте и повторяйте слова и словосочетания.*

Угол; угол поворота; радиус-вектор; угол поворота радиус-вектора; радиан; угловая скорость; период, оборот; полный оборот; время одного оборота; число оборотов; правило правого винта; правило буравчика; направление вектора; направление вектора определяется по правилу; вращение буравчика; поступательное движение буравчика; если вращать буравчик по направлению движения точки по окружности; поступательное движение буравчика совпадает с направлением вектора; центростремительное ускорение; нормальное ускорение; вектор центростремительного ускорения; направление вектора нормального ускорения.

Упражнение 2. *Решите задачи.*

1. Точка движется по окружности равномерно. За 3 с радиус повернулся на угол 45°. Найдите период вращения и угловую скорость.

2. Точка движется по окружности с угловой скоростью 3 рад/с. Найдите период, частоту вращения. На какой угол повернется радиус за 20 с? Сколько оборотов сделает тело за это время?

3. Точка движется по окружности равномерно с частотой 3 об/с. Радиус окружности 60 см. Чему равен период вращения, угловая скорость, линейная скорость и нормальное ускорения точки?

4. Точка движется по окружности радиусом 0,5 м равномерно. Оно делает 60 об/мин. Найдите период, частоту вращения, угловую скорость. Чему равна линейная скорость и нормальное ускорение точки?

5. Точка равномерно движется по окружности радиусом 4 м. Линейная скорость точки равна 20 м/с. Найдите период, частоту, угловую скорость вращения точки по окружности. Чему равно центростремительное ускорение точки? Сколько оборотов сделает точка за 50 с движения по окружности?

6. Точка движется равномерно по окружности. Точка делает 600 оборотов за 0,5 мин. Радиус окружности 2 м. Определить период, частоту и угловую скорость вращения. Чему равна линейная скорость и центростремительное ускорение точки?

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. Движение по окружности – это криволинейное движение. Траектория движения – окружность.
2. Единица измерения центрального угла – 1 радиан (1 рад) или 1 градус (1°). В системе СИ угол измеряется в радианах.
3. **Угловое перемещение** $\Delta\vec{\varphi}$ – это вектор, направление которого определяется по правилу буравчика (правого винта) и связано с направлением движения точки по окружности.
4. **Правило буравчика (правого винта):** если буравчик вращать по направлению вращения точки по окружности, то поступательное движение буравчика совпадает с направлением вектора $\Delta\vec{\varphi}$.

5. Средняя угловая скорость – это физическая величина, которая определяет быстроту вращения точки по окружности. **Средняя угловая скорость –** это вектор, который направлен также как вектор углового перемещения $\Delta\vec{\varphi}$ (по оси вращения).
6. **Мгновенная угловая скорость** $\vec{\omega}$ – это средняя угловая скорость за очень маленький промежуток времени:
$$\vec{\omega} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{\varphi}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}.$$
Вектор мгновенной угловой скорости направлен также как вектор средней угловой скорости.
7. Мгновенная линейная скорость в каждой точке направлена по касательной к траектории движения (окружности).
8. Время, за которое точка совершает один полный оборот по окружности, называется ***<u>периодом</u>***.
9. Число полных оборотов точки за единицу времени (за 1 секунду) называется **частотой вращения** $\nu = \frac{N}{t}$ или $\nu = \frac{1}{T}$. Тогда $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$.
10. **Вектор нормального ускорения** $\vec{a}_n$ направлен к центру окружности по радиусу.
11. Нормальное ускорение характеризует ***<u>быстроту изменения линейной скорости только по направлению</u>***. Так как $\omega = \frac{\upsilon}{R}$, то $a_n = \frac{\upsilon^2}{R}$ или $a_n = \omega^2 R$.
12. **Кинематические уравнения движения:**
Физические величины, характеризующие вращательное движение точки:
$T = \frac{t}{N}$ – период вращения;
$\nu = \frac{N}{t}$ или $\nu = \frac{1}{T}$ – частота вращения;
$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$ – угловая скорость вращения;
$\upsilon = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi R\nu = \omega R$, или $\omega = \frac{\upsilon}{R}$ – связь линейной и угловой скорости вращения;

$a_n = \frac{\upsilon^2}{R}$ или $a_n = \omega^2 R$ – связь нормального ускорения с линейной и угловой скоростью вращения.

$\Delta\vec{\varphi} = \vec{\omega}_{cp}\Delta t$ или $\Delta\varphi = \omega_{cp}\Delta t = \omega_0\Delta t$ – кинематическое уравнение углового перемещения;

$\varphi = \varphi_0 + \omega_0\Delta t$ **– кинематическое уравнение угловой координаты.**

8.5. Переменное движение материальной точки по окружности

Новые слова и словосочетания

тангенциальное	касательная
переменное вращение	угловое ускорение
угловое перемещение	угол поворота

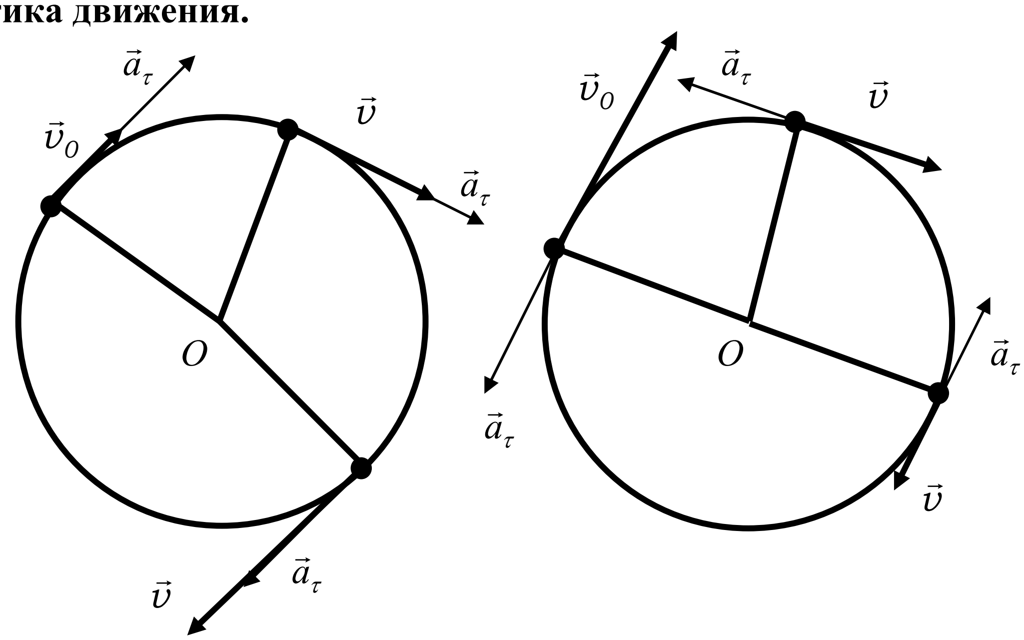
При равномерном движении точки по окружности модуль линейной скорости не изменяется $|\vec{\upsilon}| = \upsilon = const$, а направление линейной скорости изменяется, поэтому равномерное движение по окружности – это движение с центростремительным $\vec{a}_n$ (нормальным) ускорением. Нормальное ускорение $\vec{a}_n$ характеризует ***быстроту изменения линейной скорости только по направлению***. Вектор нормального ускорения направлен по радиусу окружности к центру.

Переменное вращение – это движение точки по окружности с переменной по модулю линейной скоростью. Так как модуль линейной скорости изменяется, то угловая скорость вращения также изменяется: $|\vec{\upsilon}| = \upsilon \neq const$; $\vec{\omega} \neq const$. **Физическая величина, характеризующая быстроту изменения модуля линейной скорости вращения называется тангенциальным ускорением** $\vec{a}_\tau$**.**

Если в момент времени t_0 линейная скорость точки υ_0, а в момент времени t линейная скорость точки υ, то за промежуток времени $\Delta t = t - t_0$ линейная скорость изменилась на $|\Delta\vec{\upsilon}| = \Delta\upsilon = \upsilon - \upsilon_0$. Модуль тангенциального ускорения для равнопеременного вращения можно найти по формуле: $a_\tau = \frac{|\Delta\vec{\upsilon}|}{\Delta t} = \frac{|\vec{\upsilon} - \vec{\upsilon}_0|}{\Delta t}$.

Вектор тангенциального ускорения направлен по касательной к окружности.

Если тело вращается ускоренно ($\upsilon > \upsilon_0$), то вектор тангенциального ускорения направлен по вектору скорости ($\vec{a}_\tau \uparrow\uparrow \vec{\upsilon}$) и $\upsilon = \upsilon_0 + a_\tau \cdot \Delta t$. Если тело вращается замедленно ($\upsilon < \upsilon_0$), то вектор тангенциального ускорения направлен против вектора скорости ($\vec{a}_\tau \uparrow\downarrow \vec{\upsilon}$), и $\upsilon = \upsilon_0 - a_\tau \cdot \Delta t$. **Тангенциальное ускорение – это линейная характеристика движения.**



$\vec{a}_\tau \uparrow\uparrow \vec{\upsilon}$ $\qquad\qquad$ $\vec{a}_\tau \uparrow\downarrow \vec{\upsilon}$

Точка вращается ускоренно, направления тангенциального ускорения и линейной скорости совпадают

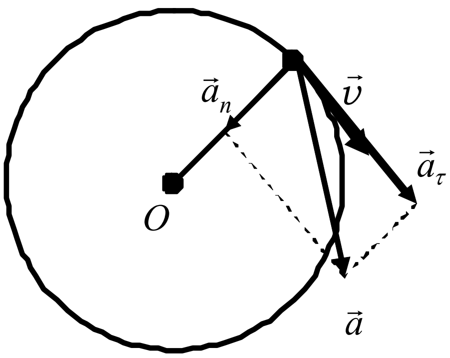
$\vec{a}_\tau \uparrow\uparrow \vec{\upsilon}$

Точка вращается замедленно, направления тангенциального ускорения и линейной скорости противоположны

$\vec{a}_\tau \uparrow\downarrow \vec{\upsilon}$

<u>Полное ускорение</u>

Когда точка движется по окружности переменно, она имеет нормальное ускорение $\vec{a}_n$ (потому что изменяется направление вектора линейной скорости $\vec{\upsilon}$) и тангенциальное ускорение $\vec{a}_\tau$ (потому что изменяется модуль вектора линейной скорости $\vec{\upsilon}$). Вектора ускорений $\vec{a}_n$ и $\vec{a}_\tau$ перпендикулярны друг другу, поэтому **полное ускорение точки равно векторной сумме нормального и тангенциального ускорений**



$\vec{a} = \vec{a}_n + \vec{a}_\tau$. Полное ускорение имеет две составляющие $\vec{a}_\tau$ и $\vec{a}_n$, а модуль полного ускорения равен $a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2}$.

Вектор полного ускорения направлен под углом к линейной скорости.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

$\vec{a}_n$ – это составляющая полного ускорения, направленная перпендикулярно линейной скорости. Она характеризует изменение линейной скорости по направлению.
$\vec{a}_\tau$ – это составляющая полного ускорения, направленная по касательной к окружности (параллельно скорости). Она характеризует изменение линейной скорости по модулю.

Угловое ускорение

Среднее угловое ускорение $\vec{\varepsilon}_{ср}$ показывает, как изменяется угловая скорость за единицу времени: $\vec{\varepsilon}_{ср} = \dfrac{\Delta\vec{\omega}}{\Delta t} = \dfrac{\vec{\omega} - \vec{\omega}_0}{\Delta t}$, где $\vec{\omega}_0$ – начальная угловая скорость в момент времени t_0, $\vec{\omega}$ – угловая скорость в момент времени t, $\Delta\vec{\omega}$ – вектор изменения угловой скорости за промежуток времени $\Delta t = t - t_0$. Единица измерения углового ускорения – радиан на секунду в квадрате ($\dfrac{рад}{с^2} = с^{-2}$).

Угловое ускорение – это вектор. Направление вектора углового ускорения $\vec{\varepsilon}_{ср}$ совпадает с направлением вектора изменения угловой скорости $\Delta\vec{\omega}$.

Мгновенное угловое ускорение – это физическая величина, показывающая изменение угловой скорости за очень маленький промежуток времени ($\Delta t \to 0$). Мгновенное угловое ускорение равно:

$$\vec{\varepsilon} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{\omega}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} = \frac{d^2\vec{\varphi}}{dt^2}.$$

Мгновенное ускорение равно первой производной угловой скорости $\vec{\omega}(t)$ по времени или второй производной углового $\Delta\vec{\varphi}(t)$ перемещения по времени.

Вектор мгновенного ускорения направлен также как вектор изменения угловой скорости $\Delta\vec{\omega}$.

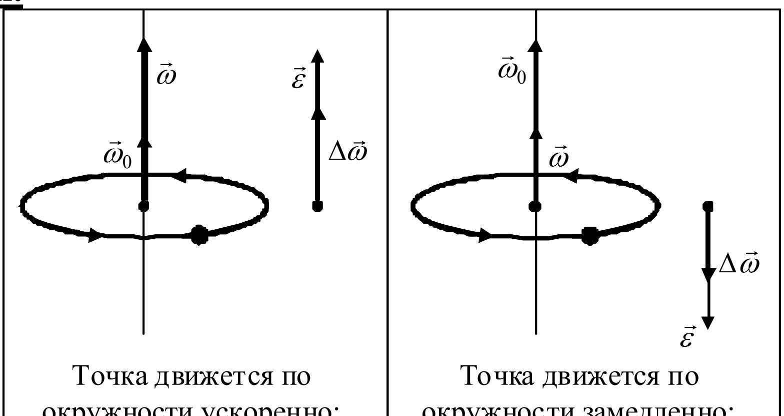
Единица измерения углового ускорения – радиан в секунду в квадрате (рад/с^2).

Изменение угловой скорости вращения связано с изменением линейной скорости движения точки по окружности, а изменение модуля линейной скорости характеризуется тангенциальным ускорением. Поэтому найдем **связь между угловым ускорением и тангенциальным ускорением:**

$$a_\tau = \frac{\Delta\upsilon}{\Delta t} = \frac{\upsilon - \upsilon_0}{\Delta t} = \frac{(\omega - \omega_0)\cdot R}{t - t_0} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}\cdot R = \varepsilon \cdot R.$$

Кинематические уравнения движения (уравнения угловых физических величин)

Если точка движется по окружности переменно, угловое ускорение за промежуток времени Δt можно найти по формуле $\vec{\varepsilon}_{cp} = \dfrac{\Delta\vec{\omega}}{\Delta t} = \dfrac{\vec{\omega} - \vec{\omega}_0}{\Delta t}$. Направление вектора углового ускорения $\vec{\varepsilon}_{cp}$ всегда совпадает с направлением вектора изменения угловой скорости $\Delta\vec{\omega}$. Поэтому $\Delta\vec{\omega} = \vec{\varepsilon}_{cp}\cdot\Delta t$, а $\vec{\omega} = \vec{\omega}_0 + \vec{\varepsilon}_{cp}\cdot\Delta t$ – **кинематическое уравнение для вектора угловой скорости при переменном движении точки по окружности.**



Точка движется по окружности ускоренно: $\vec{\varepsilon}\uparrow\uparrow\vec{\omega}$	Точка движется по окружности замедленно: $\vec{\varepsilon}\uparrow\downarrow\vec{\omega}$

При ускоренном движении угловая скорость увеличивается и $\vec{\varepsilon}_{cp} \uparrow\uparrow \vec{\omega}$**,** тогда уравнение проекции вектора угловой скорости на ось вращения можно записать $\omega = \omega_0 + \varepsilon_{cp} \cdot \Delta t$. **При замедленном движении угловая скорость уменьшается и** $\vec{\varepsilon}_{cp} \uparrow\downarrow \vec{\omega}$**,** тогда уравнение проекции вектора угловой скорости на ось вращения можно записать $\omega = \omega_0 - \varepsilon_{cp} \cdot \Delta t$.

Если движение точки по окружности равнопеременное, то $\vec{\varepsilon}_{cp} = \vec{\varepsilon} = \vec{\varepsilon}_0 = const$**, угловое ускорение – постоянная величина. Вектор угловой скорости равен:** $\vec{\omega} = \vec{\omega}_0 + \vec{\varepsilon}_0 \cdot \Delta t$. Тогда уравнение проекции вектора угловой скорости на ось вращения можно записать с учетом направления векторов $\vec{\varepsilon}_0$ и $\vec{\omega}$: $\omega = \omega_0 + \varepsilon_0 \cdot \Delta t$ (ускоренное движение) или $\omega = \omega_0 - \varepsilon_0 \cdot \Delta t$ (замедленное движение) – **угловая скорость такого движения зависит от времени линейно.**

Угловое перемещение за время движения Δt можно найти по аналогии с равнопеременным прямолинейным движением:

$$\Delta\vec{\varphi} = \vec{\omega}_{cp} \cdot \Delta t\,;\ \vec{\omega} = \vec{\omega}_0 + \vec{\varepsilon}_0 \cdot \Delta t\,;$$

$$\vec{\omega}_{cp} = \frac{\vec{\omega}_0 + \vec{\omega}}{2} = \frac{\vec{\omega}_0 + \vec{\omega}_0 + \vec{\varepsilon}_0 \cdot \Delta t}{2} = \vec{\omega}_0 + \frac{\vec{\varepsilon}_0 \cdot \Delta t}{2}$$

тогда $\Delta\vec{\varphi} = (\vec{\omega}_0 + \frac{\vec{\varepsilon}_0 \cdot \Delta t}{2}) \cdot \Delta t = \vec{\omega}_0 \cdot \Delta t + \frac{\vec{\varepsilon}_0 \cdot \Delta t^2}{2}$ – **кинематическое уравнение для углового перемещения материальной точки движущейся по окружности равнопеременно.**

Уравнение проекции вектора углового перемещения на ось вращения (угол поворота радиус-вектора за время движения) можно записать с учетом направления векторов $\vec{\varepsilon}_0$ и $\vec{\omega}$: то $\Delta\varphi = \omega_0 \cdot \Delta t + \frac{\varepsilon \cdot \Delta t^2}{2}$ при ускоренном движении или $\Delta\varphi = \omega_0 \cdot \Delta t - \frac{\varepsilon \cdot \Delta t^2}{2}$ при замедленном движении.

Для нахождения положения точки в любой момент времени нужно знать угол φ_0 в начальный момент времени t_0 и определить, на сколько изменился угол за время движения $\Delta\varphi$: $\varphi = \varphi_0 + \Delta\varphi$, поэтому $\varphi = \varphi_0 + \omega_0 \cdot \Delta t \pm \frac{\varepsilon \cdot \Delta t^2}{2}$ – **кинематическое уравнение, определяющее угловую координату материальной точки на окружности в момент времени *t* при её равнопеременном движении.**

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!	
Кинематические уравнения равнопеременного движения материальной точки	
вдоль оси *OX*:	**по окружности:**
$\vec{a}=\vec{a}_{cp}=const=\vec{a}_0$ – **уравнение вектора ускорения;**	$\vec{\varepsilon}_{cp}=\vec{\varepsilon}=\vec{\varepsilon}_0=const$ – **уравнение вектора углового ускорения;**
$\vec{\upsilon}=\vec{\upsilon}_0+\vec{a}_0\Delta t$ – уравнение вектора скорости;	$\vec{\omega}=\vec{\omega}_0+\vec{\varepsilon}_0\cdot\Delta t$ – уравнение вектора угловой скорости;
$\Delta\vec{r}=\vec{\upsilon}_0\Delta t+\frac{\vec{a}_0\Delta t^2}{2}$ – уравнение вектора перемещения;	$\Delta\vec{\varphi}=\vec{\omega}_0\cdot\Delta t+\frac{\vec{\varepsilon}\cdot\Delta t^2}{2}$ – уравнение вектора углового перемещения;
Проекции кинематических уравнений материальной точки, движущейся	
равнопеременно ПРЯМОЛИНЕЙНО, на ось *OX*:	**равнопеременно ПО ОКРУЖНОСТИ, на ось вращения:**
$a_x=const$ – уравнение проекции ускорения на ось *OX*;	$\varepsilon_0=const$ – уравнение проекции углового ускорения на ось вращения;
$\upsilon_x=\upsilon_{0x}\pm a_x\cdot\Delta t$ – уравнение проекции скорости на ось *OX*;	$\omega=\omega_0\pm\varepsilon_0\cdot\Delta t$ – уравнение проекции угловой скорости на ось вращения;
$\Delta r_x=\upsilon_{0x}\cdot t\pm\frac{a_x\cdot t^2}{2}$ – уравнение проекции вектора перемещения на ось *OX*;	$\Delta\varphi=\omega_0\cdot\Delta t\pm\frac{\varepsilon\cdot\Delta t^2}{2}$ – уравнение проекции вектора углового перемещения на ось вращения;
$x=x_0+\upsilon_{0x}\cdot t\pm\frac{a_x\cdot t^2}{2}$ – уравнение координаты	$\varphi=\varphi_0+\omega_0\cdot\Delta t\pm\frac{\varepsilon\cdot\Delta t^2}{2}$ – уравнение угловой координаты.

Классификация движений

По значениям, которые принимают нормальное и тангенциальное ускорения, можно классифицировать различные движения точки.

Если $\vec{a}_n$ **= 0**, то при любых значениях скорости движение точки происходит **по прямой линии.** Эту прямую линию можно рассматривать как окружность бесконечно большого радиуса ($R \to \infty$).

Если $\vec{a}_\tau$ **= 0 и** $\vec{a}_n$ **= 0**, но скорость отлична от нуля, то **движение по прямой линии будет равномерным**, так как не меняется модуль скорости.

В случае $\vec{a}_n$**≠0** движение точки **криволинейное**, так как меняется направление скорости. **Когда** $\vec{a}_n$**≠0,** $\vec{a}_\tau$ **= 0**, то при движении **по кривой линии** модуль скорости не меняется – **точка движется равномерно**.

Если $\vec{a}_\tau$ **= 0,** $\vec{a}_n$ **=** ***const*****,** то точка движется **равномерно по окружности**.

Если оба ускорения $\vec{a}_n$ **и** $\vec{a}_\tau$ **отличны от нуля**, то точка движется **неравномерно по криволинейной траектории.**

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Слушайте, читайте, повторяйте.*

Переменное движение точки по окружности; переменное вращение точки по окружности; равнопеременное движение по окружности; движение по окружности с переменной линейной скоростью; вращение с переменной угловой скоростью; равноускоренное вращение; равнозамедленное вращение; нормальное ускорение; тангенциальное ускорение; центростремительное ускорение; касательное ускорение; нормальное ускорение характеризует изменение линейной скорости по направлению; тангенциальное ускорение характеризует изменение линейной скорости по модулю; вектор нормального ускорения всегда направлен к центру окружности; вектор тангенциального ускорения направлен по касательной к окружности; вектор нормального ускорения перпендикулярен вектору линейной скорости; вектор тангенциального ускорения направлен по скорости в случае ускоренного движения; вектор тангенциального ускорения направлен противоположно скорости в случае замедленного движения.

Упражнение 2. *Решите задачи.*

1. Точка движется равнозамедленно по окружности радиусом 20 см. За время 3 с угловая скорость изменилась на величину $\Delta\omega$ = 2 рад/с. Чему равно угловое ускорение точки? Чему равен модуль

тангенциального ускорения? Что можно сказать о направлениях тангенциального ускорения и линейной скорости?

2. Точка движется по окружности равноускоренно с угловым ускорением 5 рад/с^2 . Радиус окружности 4 м. Начальная линейная скорость точки 3 м/с. Найдите модуль тангенциального ускорения. Чему равен модуль нормального ускорения в начальный момент времени? Чему равно полное ускорение точки в этот момент времени? Сделайте рисунок и покажите векторы нормального, тангенциального и полного ускорений точки в начальный момент времени. Чему равен угол между векторами полного ускорения и линейной скорости?

3. Точка движется равноускоренно по окружности радиусом 0,5 м с тангенциальным ускорением 2 м/с^2 . Начальная угловая скорость точки 8 рад/с. Определите угловое ускорение точки. Чему равна линейная скорость и нормальное ускорение в начальный момент времени?

4. Точка движется равнозамедленно по окружности радиусом 5 м с тангенциальным ускорением 6 м/с^2. Начальная линейная скорость точки 30 м/с. Определите начальную угловую скорость, нормальное ускорение в начальный момент времени и угловое ускорение точки. Сделайте рисунок и покажите векторы нормального, тангенциального и полного ускорений точки в начальный момент времени. Как направлены векторы угловой скорости и углового ускорения?

5. Движение точки по окружности радиусом 4 м задано уравнением $\varphi = 1 + 2t + 4t^2$ (рад). Определите нормальное ускорение точки через 2 с от начала движения.

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. **Переменное вращение** – это движение точки по окружности с переменной по модулю линейной скоростью.
2. Физическая величина, характеризующая быстроту изменения модуля линейной скорости вращения, называется **тангенци-**

альным ускорением $\vec{a}_\tau$**.** Вектор тангенциального ускорения направлен по касательной к окружности.

3. Модуль тангенциального ускорения для равнопеременного вращения можно найти по формуле: $a_\tau = \frac{|\Delta\vec{\upsilon}|}{\Delta t} = \frac{|\vec{\upsilon} - \vec{\upsilon}_0|}{\Delta t}$.
4. **Полное ускорение точки** равно векторной сумме нормального и тангенциального ускорений: $\vec{a} = \vec{a}_n + \vec{a}_\tau$. Полное ускорение имеет две составляющие $\vec{a}_\tau$ и $\vec{a}_n$, а модуль полного ускорения равен $a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2}$.
5. **Среднее угловое ускорение** $\vec{\varepsilon}_{cp}$ показывает, как изменяется угловая скорость за единицу времени: $\vec{\varepsilon}_{cp} = \frac{\Delta\vec{\omega}}{\Delta t} = \frac{\vec{\omega} - \vec{\omega}_0}{\Delta t}$, где $\vec{\omega}_0$ – начальная угловая скорость в момент времени t_0, $\vec{\omega}$ – угловая скорость в момент времени t, $\Delta\vec{\omega}$– вектор изменения угловой скорости за промежуток времени $\Delta t = t - t_0$. Единица измерения углового ускорения – радиан на секунду в квадрате ($\frac{рад}{с^2} = с^{-2}$).
6. **Мгновенное угловое ускорение** – это физическая величина, показывающая изменение угловой скорости за очень маленький промежуток времени ($\Delta t \to 0$). Мгновенное угловое ускорение равно:
$$\vec{\varepsilon} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{\omega}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} = \frac{d^2\vec{\varphi}}{dt^2}.$$
Мгновенное ускорение равно первой производной угловой скорости $\vec{\omega}(t)$ по времени или второй производной углового $\Delta\vec{\varphi}(t)$ перемещения по времени.

   Вектор мгновенного ускорения направлен также как вектор изменения угловой скорости $\Delta\vec{\omega}$.
7. Связь между угловым ускорением и тангенциальным ускорением:
$$a_\tau = \frac{\Delta\upsilon}{\Delta t} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \cdot R = \varepsilon \cdot R.$$
8. Кинематические уравнения вращательного движения точки:
$\vec{\omega} = \vec{\omega}_0 + \vec{\varepsilon}_{cp} \cdot \Delta t$ – уравнение для угловой скорости в векторном виде;

$\Delta\vec{\varphi} = \vec{\omega}_0 \cdot \Delta t + \dfrac{\vec{\varepsilon} \cdot \Delta t^2}{2}$ – **кинематическое уравнение углового перемещения в векторном виде для материальной точки, движущейся по окружности равнопеременно;**

$\omega = \omega_0 + \varepsilon_0 \cdot \Delta t$ (ускоренное движение) или $\omega = \omega_0 - \varepsilon_0 \cdot \Delta t$ (замедленное движение) – уравнения проекции угловой скорости при равнопеременном вращательном движении;

$\Delta\varphi = \omega_0 \cdot \Delta t + \dfrac{\varepsilon \cdot \Delta t^2}{2}$ при ускоренном движении или $\Delta\varphi = \omega_0 \cdot \Delta t - \dfrac{\varepsilon \cdot \Delta t^2}{2}$ при замедленном движении – угол поворота за время движения по окружности (кинематические уравнения угла поворота).

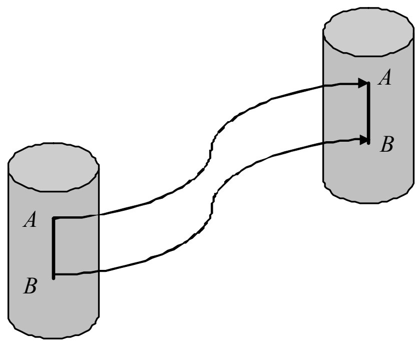
ТЕМА 9. **ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ**

Новые слова и словосочетания

твердое тело	ось вращения
система	совокупность
колесо	обод колеса

Любое физическое тело можно представить как (систему) совокупность большого числа материальных точек. **Твердое тело – это система материальных точек, расстояние между которыми при движении тела не изменяются.**

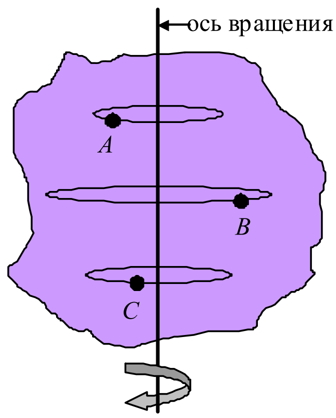
Механическое движение – это изменение положения физического тела в пространстве относительно других тел с течением времени.



Простейшие виды механического движения – поступательное и вращательное.

Поступательное движение – это движение, при котором отрезок прямой, соединяющий любые две точки тела остается параллельным самому себе.

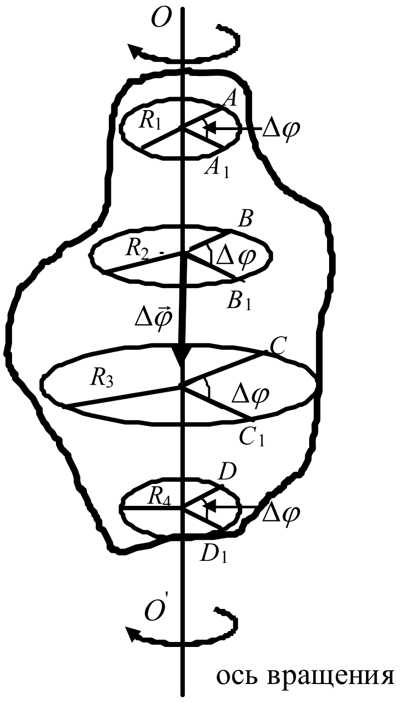
Самое важное свойство этого движения – то, что при поступательном движении все точки тела движутся одинаково. При поступательном движении (прямолинейном или криволинейном) все точки тела описывают одинаковые траектории, совершают одинаковые перемещения, имеют одинаковые скорости и ускорения. Поэтому при изучении поступательного движения можно рассматривать движение **одной точки** этого тела. **Кинематические уравнения поступательного движения одной материальной точки твердого тела и всего твердого тела одинаковые.**



Вращательное движение – это движение, при котором все точки твердого тела движутся по окружностям с центрами, лежащими на одной прямой – оси вращения.

Разные точки тела движутся по разным окружностям. Движение каждой точки по окружности повторяется через один поворот тела вокруг оси вращения.

Движение тела повторяется через определенный промежуток времени – такое движение называется периодическим. Вращательное движение – **это периодическое** движение.



Рассмотрим вращательное движение твердого тела относительно оси OO′.

При вращении твердого тела точки *A, B, C, D* движутся по окружностям. Центры этих окружностей находятся на одной прямой – оси вращения твердого тела. Ось вращения перпендикулярна к плоскости вращения каждой точки. За промежуток времени Δt все радиусы окружностей поворачиваются на одинаковый угол $\Delta\varphi$ и имеют одинаковое угловое перемещение $\Delta\vec{\varphi}$. Угловое перемещение – это угол, на который поворачивается радиус каждой точки за время движения. Поэтому все точки твердого тела имеют одинаковую угловую скорость $\vec{\omega}_A = \vec{\omega}_B = \vec{\omega}_C = \vec{\omega}_D = \vec{\omega}$. Значит, **угловая скорость $\vec{\omega}$ характеризует вращение твердого тела и показывает, на какой угол поворачивается твердое тело в единицу времени.**

Линейные параметры разных точек твердого тела (пути, линейные скорости, тангенциальные и центростремительные ускорения) разные. Они зависят от радиусов окружностей, по которым движутся точки. Пример:

$$\upsilon_A = \omega_A \cdot R_1 = \omega \cdot R_1$$
$$\upsilon_B = \omega_B \cdot R_2 = \omega \cdot R_2$$
$$\upsilon_C = \omega_C \cdot R_3 = \omega \cdot R_3$$
$$\upsilon_D = \omega_D \cdot R_4 = \omega \cdot R_4 .$$

Поэтому вращение твердого тела характеризуется только угловыми параметрами: угловым перемещением $\Delta\vec{\varphi}$, угловой скоростью $\vec{\omega}$ и угловым ускорением $\vec{\varepsilon}$.

Угловая скорость – это вектор. Вектор угловой скорости твердого тела направлен по оси вращения. Направление вектора $\vec{\omega}$ определяется по правилу правого винта (правилу буравчика) или по правилу умножения векторов, так как $\vec{v} = \left[\vec{\omega} \cdot \vec{R}\right]$.

Правило правого винта: вращаем винт так, как вращается твердое тело, поступательное движение винта покажет направление вектора угловой скорости $\vec{\omega}$.

Рассмотрите внимательно рисунки.

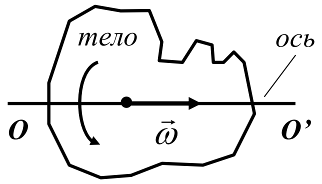


Рис. 1

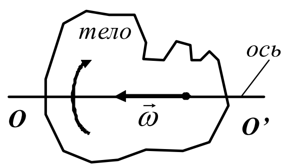


Рис. 2

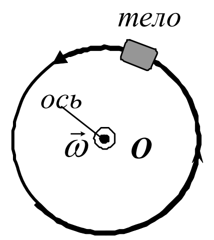


Рис. 3

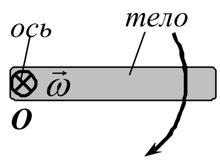


Рис. 4

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Вектор угловой скорости $\vec{\omega}$ и вектор углового перемещения $\Delta\vec{\varphi}$ направлены одинаково – по оси вращения.

Направление вектора углового перемещения $\Delta\vec{\varphi}$ тоже определяется по правилу правого винта.

Также как движение материальной точки по окружности, вращение твердого тела может быть равномерным и переменным.

Равномерное вращение твердого тела

Равномерное вращение твердого тела – это вращение твердого тела с постоянной угловой скоростью: $\vec{\omega} = const$. Мгновенная угловая скорость вращения в этом случае равна средней угловой скорости ($\vec{\omega}_{cp} = \vec{\omega} = \vec{\omega}_0 = const$). Равномерное вращение твердого тела – это периодическое движение. **Период вращения твердого тела *T*** – это время, за которое каждая точка твердого тела делает один полный оборот по окружности. **Частота** вращения твердого тела ν – это число оборотов твердого тела в единицу времени: $\nu = \dfrac{1}{T}$, $\omega = \dfrac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$.

Угловое перемещение твердого тела $\Delta\vec{\varphi}$ – это угол, на который поворачивается твердое тело за время движения $\Delta t = t - t_0$. Если $t_0 = 0$, то $\Delta t = t$.

Кинематические уравнения равномерного вращения твердого тела такие же, как уравнения равномерного вращения материальной точки по окружности: $\vec{\omega}_{cp} = \vec{\omega} = \vec{\omega}_0 = const$;

$\Delta\vec{\varphi} = \vec{\omega}_0 t$ – уравнение вектора углового перемещения;

$\Delta\varphi = \omega_0 t$ – уравнение проекции вектора углового перемещения на ось вращения;

$\varphi = \varphi_0 + \omega_0 t$ – уравнение угловой координаты твердого тела.

Переменное вращение твердого тела

Переменное вращение твердого тела – это вращение с переменной угловой скоростью $\vec{\omega} \neq const$.

При переменном вращении твердого тела его движение характеризуется средним угловым ускорением $\vec{\varepsilon}_{cp} = \dfrac{\Delta\vec{\omega}}{\Delta t} = \dfrac{\vec{\omega} - \vec{\omega}_0}{\Delta t}$. Модуль среднего углового ускорения равен $\varepsilon_{cp} = \dfrac{\Delta\omega}{\Delta t} = \dfrac{\omega - \omega_0}{\Delta t}$.

Мгновенное угловое ускорение равно: $\vec{\varepsilon} = \lim\limits_{\Delta t \to 0} \dfrac{\Delta\vec{\omega}}{\Delta t} = \dfrac{d\vec{\omega}}{dt} = \dfrac{d^2\vec{\varphi}}{dt^2}$. Мгновенное ускорение равно первой производной угловой скорости $\vec{\omega}(t)$ по времени или второй производной углового $\Delta\vec{\varphi}(t)$ перемещения по времени.

Вектор мгновенного ускорения направлен также как вектор изменения угловой скорости $\Delta\vec{\omega}$.

Модуль мгновенного углового ускорения равен: $\varepsilon = \dfrac{d\omega}{dt} = \dfrac{d^2\varphi}{dt^2}$.

Равнопеременное вращение твердого тела – это вращение с постоянным угловым ускорением: $\vec{\varepsilon} = const$.

Кинематические уравнения равнопеременного вращения твердого тела такие же, как уравнения равнопеременного вращения материальной точки по окружности:

в векторной форме

$\vec{\varepsilon} = \vec{\varepsilon}_0 = const$ – уравнение углового ускорения;

$\vec{\omega} = \vec{\omega}_0 + \vec{\varepsilon}_0 \cdot t$ – уравнение угловой скорости;

$$\Delta\vec{\varphi} = \vec{\omega}_0 \cdot t + \frac{\vec{\varepsilon} \cdot t^2}{2}$$ – уравнение углового перемещения;

в проекции на ось вращения

$\varepsilon = \varepsilon_0 = const$ – уравнение проекции углового ускорения;

$\omega = \omega_0 \pm \varepsilon_0 \cdot t$ – уравнение проекции угловой скорости;

$$\Delta\varphi = \omega_0 \cdot t \pm \frac{\varepsilon \cdot t^2}{2}$$ – уравнение проекции углового перемещения;

$$\varphi = \varphi_0 + \omega_0 \cdot t \pm \frac{\varepsilon \cdot t^2}{2}$$ – уравнение угловой координаты твердого тела.

(Знаки « + » или « – » зависят от того, равноускоренно или равнозамедленно вращается твердое тело).

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Слушайте, читайте, повторяйте.*

Равномерное вращение твердого тела; вращение тела вокруг оси; ось вращения; поворот; угол поворота; угол поворота радиус-вектора; угловая скорость; угловое ускорение; полный поворот; время одного поворота; время одного оборота вокруг оси; частота; число оборотов; число оборотов в единицу времени; период; угловое перемещение; направление вектора угловой скорости; правило правого винта; правило буравчика; вращение буравчика совпадает с вращением твердого тела; поступательное движение буравчика совпадает с направлением вектора угловой скорости.

Упражнение 2. *Решите задачи.*

1. Твердое тело вращается равномерно и за время 2 с повернулось на угол 180°. Определите угловую скорость вращения твердого тела.

2. Твердое тело вращается равнозамедленно с начальной угловой скоростью 15 $с^{-1}$. Тело останавливается через 5 с. Определите угловое ускорение твердого тела. На какой угол повернулось твердое тело и сколько оборотов оно сделало до остановки?

3. Твердое тело начинает вращаться равноускоренно без начальной угловой скорости. За 10 мин тело сделало 3600 оборотов. Определите угловое ускорение тела и угловую скорость в момент времени 5 мин.

4. Твердое тело имело начальную угловую скорость 2π $с^{-1}$. Оно сделало 20 оборотов и остановилось. Определите угловое ускорение, считая движение тела равнопеременным.

5. Диск начинает вращаться равноускоренно без начальной скорости. Угловое ускорение диска 2 $с^{-2}$, радиус диска 0,5 м. Диск вращается 20 с. Напишите уравнения зависимости угловой скорости и угла поворота от времени. На какой угол повернется диск за это время? Чему равна угловая скорость диска в этот момент времени? Постройте графики зависимости угловой скорости и угла поворота от времени.

6. Твердое тело вращается равнозамедленно с угловым ускорением 2 $с^{-2}$. Начальная угловая скорость равна π $с^{-1}$. Напишите уравнения зависимости угловой скорости и углового перемещения от времени. На какой угол повернется тело до остановки. Постройте графики зависимости угловой скорости, углового ускорения и угла поворота от времени.

7. Колесо вращается так, что зависимость угла поворота радиуса колеса от времени определяется уравнением $\varphi = 1 + 2t - 2t^3$ (рад). Нормальное ускорение точек, лежащих на ободе колеса к концу второй секунды движения, равно 200 м/$с^2$. Определите зависимость от времени угловой и линейной скоростей, углового и полного линейных ускорений для точек, лежащих на ободе колеса; радиус колеса.

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. **<u>Вращательное движение</u>** – это движение, при котором все точки твердого тела движутся по окружностям с центрами, лежащими на одной прямой – <u>оси вращения</u>.
2. Вращение твердого тела характеризуется только угловыми параметрами: угловым перемещением $\Delta\vec{\varphi}$, угловой скоростью $\vec{\omega}$ и угловым ускорением $\vec{\varepsilon}$.

3. **Кинематические уравнения равномерного вращения твердого тела** такие же, как уравнения равномерного вращения материальной точки по окружности: $\vec{\omega}_{cp} = \vec{\omega} = \vec{\omega}_0 = const$;

   $\Delta\vec{\varphi} = \vec{\omega}_0 t$ – уравнение вектора углового перемещения;

   $\Delta\varphi = \omega_0 t$ – уравнение проекции вектора углового перемещения на ось вращения;

   $\varphi = \varphi_0 + \omega_0 t$ – уравнение угловой координаты твердого тела.

4. **Кинематические уравнения равнопеременного вращения твердого тела** такие же, как уравнения равнопеременного вращения материальной точки по окружности:

   в векторной форме

   $\vec{\varepsilon} = \vec{\varepsilon}_0 = const$ – уравнение углового ускорения;

   $\vec{\omega} = \vec{\omega}_0 + \vec{\varepsilon}_0 \cdot t$ – уравнение угловой скорости;

   $\Delta\vec{\varphi} = \vec{\omega}_0 \cdot t + \frac{1}{2}\vec{\varepsilon} \cdot t^2$ – уравнение углового перемещения;

   в проекции на ось вращения (знаки « + » или « – » зависят от того, равноускоренно или равнозамедленно вращается твердое тело)

   $\varepsilon = \varepsilon_0 = const$ – уравнение проекции углового ускорения;

   $\omega = \omega_0 \pm \varepsilon_0 \cdot t$ – уравнение проекции угловой скорости;

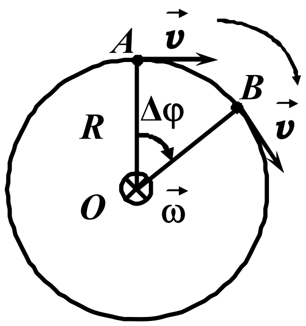
   $\Delta\varphi = \omega_0 \cdot t \pm \frac{1}{2}\varepsilon \cdot t^2$ – уравнение проекции углового перемещения; $\varphi = \varphi_0 + \omega_0 \cdot t \pm \frac{1}{2}\varepsilon \cdot t^2$ – уравнение угловой координаты твердого тела.

ТЕМА 10. **КОЛЕБАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ**

Новые слова и словосочетания

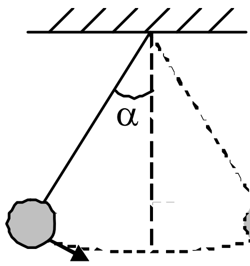
период	периодическое движение
цикл	циклическое движение
гармонический	синус
косинус	амплитуда
период	частота
начальная фаза	качели
математический маятник	маятник

Периодическое движение – движение, повторяющееся через равные промежутки времени.



Различают два вида периодических движений: вращательное и колебательное.

Вращательное движение – движение в одном направлении по плоской (или пространственной) замкнутой траектории. Например, движение материальной точки по окружности, движение Земли вокруг Солнца и т.д.



Колебательное движение (колебания) – движение вдоль одного и того же отрезка с изменением направления движения. Например, движения маятника, качели и т.д. **Колебания** – процесс, при котором значения физических величин (например, смещения, скорости, ускорения) изменяющиеся в процессе движения, повторяются через равные промежутки времени.

Важнейшей характеристикой периодического движения является **период – минимальный промежуток времени, через который движение повторяется.**

Гармонические колебания

Простейшим видом колебательного движения являются гармонические колебания – движение, при котором колеблющаяся величина изменяется с течением времени **по закону синуса или косинуса**.

Гармоническим колебательным движением (гармоническим колебанием) называется движение, при котором координата тела (материальной точки) изменяется по закону: $x = A\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ **или**

$x = A\sin(\omega_0 t + \varphi_0)$**, где** A **– амплитуда колебаний, ω_0 – циклическая частота,** $\omega_0 t + \varphi_0$ **– фаза колебаний, φ_0 – начальная фаза.**

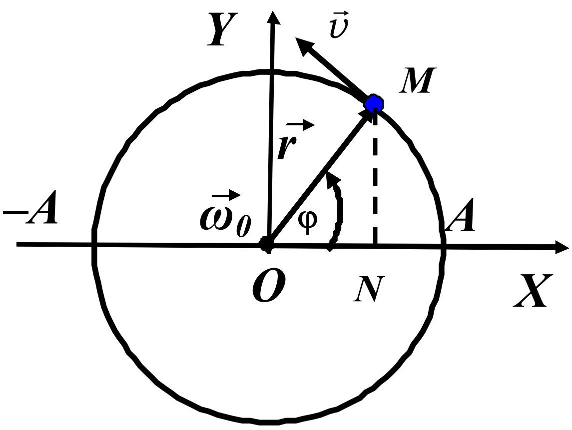
Так как в выражении $x = A\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ наибольшее значение косинуса равно единице, то наибольшее по модулю значение координаты тела равно A. Таким образом, **амплитуда – это величина наибольшего смещения тела от положения равновесия**.

Начальная фаза φ_0 определяет положение тела в начальный момент времени: в момент времени $t = 0$ координата тела равна $x_0 = A\cos\varphi_0$.

Функция $x = A\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ **является периодической** с периодом равным $T = \dfrac{2\pi}{\omega_0}$; частота колебаний (число колебаний в единицу времени) $\nu = \dfrac{1}{T}$.

При гармонических колебаниях скорость тела в проекции на ось x равна: $\upsilon_x = \dfrac{dx}{dt} = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$.

Ускорение тела, совершающего гармонические колебания в проекции на ось x, равно: $a_x = \dfrac{d\upsilon_x}{dt} = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$. Ускорение a_x может быть выражено через координату x тела: $a_x = -\omega_0^2 \cdot x$.

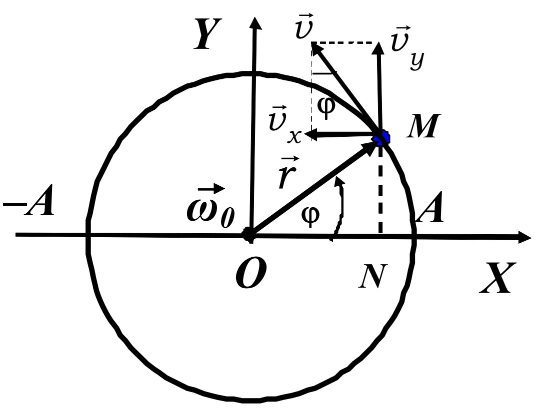


Гармоническое колебание можно наглядно представить, рассмотрев периодическое вращение материальной точки по окружности с постоянной скоростью.

Пусть материальная точка M равномерно вращается с угловой скоростью ω_0 по окружности радиуса r с центром в точке O. Ось x совпадает с одним из диаметров окружности; $x = 0$ в точке O. Положение точки M на плоскости в любой момент времени задаётся радиус-вектором $\vec{r}$, проведенным к ней из точки O. Точка N – проекция на ось x точки M – будет совершать гармонические колебания между двумя крайними положениями, координаты которых равны $–A$ и A. Из рисунка видно, что зависимость от времени координаты x точки N определятся уравнением $x = r\cos\varphi = r\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$, где $\varphi = \omega_0 t + \varphi_0$ – угол, который составляет к моменту времени t радиус-вектор $\vec{r}$ с осью x; при $t = 0$ $\varphi = \varphi_0$.

Таким образом, движение точки N вдоль оси x имеет характер гармонического колебания.

Для описания колебательного движения применяются специальные термины: координата x, определяющая положение точки N относительно точки O – **называется смещением** точки N; максимальное смещение материальной точки относительно положения равновесия называется **амплитудой колебания** $x_{\max} = A = |\vec{r}|$ (длина радиус-вектора $\vec{r}$); угловая скорость вращения ω_0 называется **циклической частотой колебаний**; а угол $\varphi = \omega_0 t + \varphi_0$ между радиус-вектором $\vec{r}$ и осью x в момент времени t называется **фазой колебания**. В начальный момент времени при $t = 0$ угол φ равен φ_0 – **начальной фазе**. Точка O (точка, в которой смещение $x = 0$) – **положение равновесия**. Так как $x_{\max} = A = |\vec{r}|$, то $x = r\cos\varphi = r\cos(\omega_0 t + \varphi_0) = A\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ – **уравнение колебаний.**

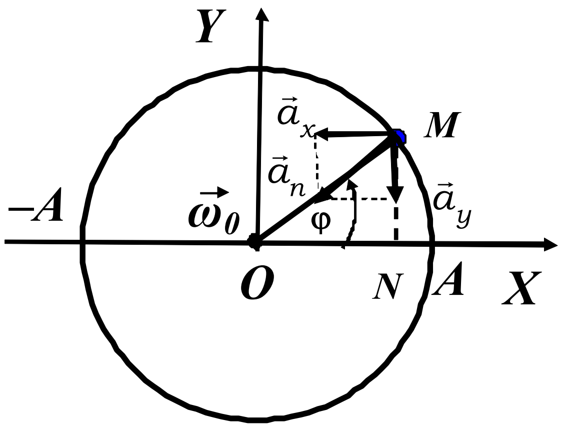


Для определения скорости колебательного движения по оси x рассмотрим произвольное положение материальной точки на окружности в момент времени t. Скорость материальной точки, движущейся по окружности, направлена перпендикулярно радиус-вектору $\vec{r}$ и образует с осью y угол φ, равный углу поворота радиус-вектора в момент времени t. Горизонтальная компонента скорости направлена противоположно оси x. Поэтому проекция скорости на ось x равна $\upsilon_x = -\upsilon\sin\varphi = -\omega_0 r\sin\varphi = -\omega_0 r\sin(\omega_0 t + \varphi_0)$, так как $\varphi = \omega_0 t + \varphi_0$ – угол между радиус-вектором $\vec{r}$ и осью x в момент времени t; а линейная скорость движения точки по окружности связана с угловой скоростью вращения выражением $\upsilon = \omega_0 r$.

Так как максимальное смещение материальной точки относительно положения равновесия точки O равно **амплитуде колебаний** $A = |\vec{r}|$ (длина радиус-вектора $\vec{r}$), то $\upsilon_x = -\omega_0 A\sin\varphi = -\omega_0 A\sin(\omega_0 t + \varphi_0)$ – **уравнение проекции скорости.**

Найдём зависимость проекции ускорения на ось x от времени при движении материальной точки по окружности с постоянной скоростью.

При движении точки по окружности центростремительное ускорение материальной точки направлено к центру окружности и равно $a_n = \omega^2 r$. Горизонтальная компонента центростремительного ускорения направлена противоположно оси *x*. Поэтому проекция вектора ускорения на ось x равна $a_x = -a_n \cos\varphi = -a_n \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = -\omega_0^2 r \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$, так как $\varphi = \omega_0 t + \varphi_0$ – угол между радиус-вектором $\vec{r}$ и осью x в момент времени *t*; а центростремительное ускорение равно $a_n = \omega_0^2 r$.



Так как максимальное смещение материальной точки относительно положения равновесия точки *O* равно **амплитуде колебаний** $A = |\vec{r}|$ (длина радиус-вектора $\vec{r}$), то

$a_x = -a_n \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = -\omega_0^2 A \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ – **уравнение проекции ускорения.**

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Смещение *x* точки относительно положения равновесия, проекция υ_x скорости на ось *x*, проекция a_x ускорения на ось *x* в процессе движения материальной точки по окружности изменяются по гармоническому закону.

Можно показать, что смещение *y* точки относительно положения равновесия, проекция υ_y скорости на ось *y*, проекция a_y ускорения на ось *y* в процессе движения материальной точки по окружности также изменяются по гармоническому закону.

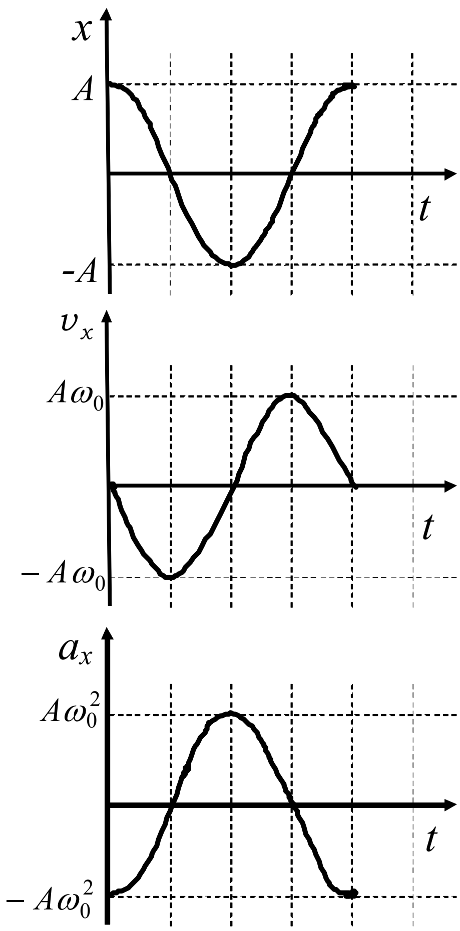
Кинематические уравнения гармонических колебаний

Материальная точка совершает гармонические колебания, если её смещение зависит от времени по гармоническому закону $x = A\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ **или** $x = A\sin(\omega_0 t + \varphi_0)$, **где *A* – амплитуда колеба-**

ний, ω_0 – циклическая частота, $\omega_0 t + \varphi_0$ – фаза колебаний, φ_0 – начальная фаза.

Рассмотрим, по какому закону меняется скорость и ускорение *материальной* точки, совершающей колебания по закону $x = A\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$.

Так как $\upsilon_x = \dfrac{dx}{dt} = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = A\omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \dfrac{\pi}{2})$ – скорость изменяется по гармоническому закону с той же циклической частотой, что и координата. Амплитудное (максимальное) значение скорости равно $A\omega_0$. Фаза колебаний скорости отличается от фазы колебаний смещения на $\dfrac{\pi}{2}$. Следовательно, в момент времени, когда смещение $x = 0$, скорость принимает максимальное значение. Когда же смещение достигает максимального отрицательного значения, то скорость $\upsilon_x = 0$.



Ускорение

$$a_x = \frac{d\upsilon_x}{dt} = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) =$$

$$= A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \pi)$$

– ускорение изменяется по гармоническому закону с той же циклической частотой, что и координата. Амплитудное (максимальное) значение ускорения равно $A\omega_0^2$. Фаза колебаний ускорения отличается от фазы колебаний смещения на π. Следовательно, в момент времени, когда смещение $x = 0$, ускорение принимает максимальное отрицательное значение. Когда же смещение достигает максимального отрицательного значения, то скорость $\upsilon_x = 0$, а ускорение принимает наибольшее положительное значение. Можно показать, что $a_x = -\omega_0^2 x$.

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Решите задачи.*

1. Маятник совершает колебания по закону $x = 0{,}1\sin(0{,}628t)$. Чему равны амплитуда колебаний, частота и период колебаний? Чему равны максимальное значение скорости и ускорения?

2. Маятник совершает колебания по закону $x = 0{,}05\sin(\frac{2\pi}{4}t + \frac{\pi}{2})$. Чему равны амплитуда, период и частота колебаний? Чему равны фаза, смещение, скорость и ускорение в момент времени t = 4 с?

3. Частица совершает гармонические колебания по закону $x = 24\cos(\frac{\pi}{12}t)$ см. Как зависят проекции скорости и ускорения частицы на ось x от времени? Определите координату частицы, проекции её скорости и ускорения на ось x в момент времени t = 2 с?

4. Две частицы совершают гармонические колебания вдоль оси x с одинаковой амплитудой A = 18 см. Их координаты зависят от времени по закону косинуса. Первая частица совершает колебания с периодом T_1 = 3,6 с, период колебаний второй частицы T_2 = 1,8 с. На каком расстоянии друг от друга будут находиться частицы в момент времени t = 0,9 с? Найдите скорость второй частицы относительно первой частицы в этот момент времени.

5. Амплитуда колебаний 10 см, частота 0,5 Гц. Написать уравнение колебаний и построить его график. Найти наибольшее значение скорости и ускорения, а также фазу и смещение в момент времени 1,5 с. Построить график скорости и ускорения от времени. Принять начальную фазу равной нулю.

6. За какую часть периода материальная точка, совершающая колебательное движение, проходит путь от среднего положения до крайнего? первую половину этого пути? вторую его половину?

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. **Гармоническим колебательным движением (гармоническим колебанием)** называется движение, при котором координата тела (материальной точки) изменяется по закону: $x = A\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ или $x = A\sin(\omega_0 t + \varphi_0)$, где A – амплитуда колебаний, ω_0 – циклическая частота, $\omega_0 t + \varphi_0$ – фаза колебаний, φ_0 – начальная фаза.
2. Кинематическое уравнение скорости колеблющейся материальной точки $\upsilon_x = \dfrac{dx}{dt} = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$.
3. Кинематическое уравнение ускорения материальной точки, совершающей колебательное движение
$a_x = \dfrac{d\upsilon_x}{dt} = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$.
4. Связь ускорения материальной точки, совершающая колебания и её смещения $a_x = -\omega_0^2 x$.

ТЕМА 11. **ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ**

Новые слова и словосочетания

относительно	относительный
преобразования	подвижный
абсолютный	переносный
неподвижный	мотоциклист
лифт	чемодан
следствие	циклоида

Движение любого тела можно рассматривать только относительно других тел или систем отсчета.

Система отсчета – это тело отсчета, система координат и часы. Тело отсчета – это тело, относительно которого рассматривается движение данного тела.

Любое движение относительно. В разных системах отсчета одно и то же движение может выглядеть по-разному, например:

Пример 1. Пассажиры движущегося поезда неподвижны относительно стен вагона (система отсчета – вагон). И эти же пассажиры движутся в системе отсчета связанной с Землей.

Поднимается лифт. Стоящий на его полу чемодан покоится относительно стен лифта и человека, находящегося в лифте. Но чемодан движется относительно Земли и дома.

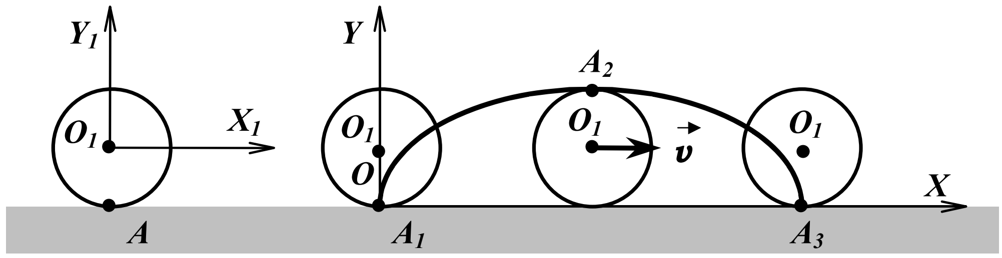
Значит положение тела в различных системах отсчета различно. ***Координата, положение тела в пространстве относительны***.

Пример 2. Соревнуются мотоциклисты. Они одновременно начали двигаться относительно Земли. Если они движутся с одинаковыми скоростями, то расстояние между ними не изменяется (они не обгоняют друг друга). Значит, друг относительно друга мотоциклисты покоятся, но движутся относительно Земли.

Таким образом, ***понятие скорости*** тоже ***относительно***. Скорость одного и того же тела в разных системах отсчета различна.

Относительна не только скорость, но и форма траектории движения, пройденный телом путь.

Пример 3. Пусть колесо катится по поверхности Земли. Точка A на ободе колеса относительно системы $X_1O_1Y_1$ (центра колеса) движется по окружности. За один оборот она проходит путь, равный длине окружности. Но относительно системы координат XOY, связанной с Землей, траектория точки A – более сложная кривая $A_1A_2A_3$, называемая циклоидой. За один оборот точка A проходит путь, равный длине циклоиды.



а б

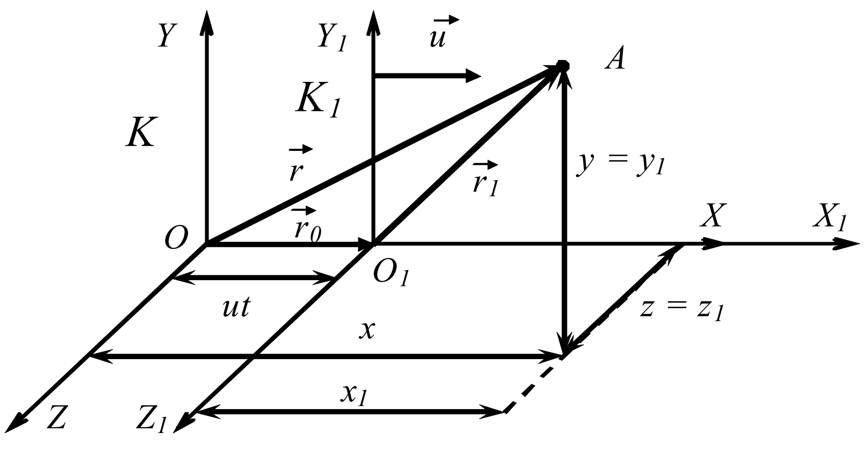
Таким образом, все кинематические понятия (траектория, координата, путь, перемещение, скорость, ускорение) имеют определенную форму и числовые значения в одной выбранной системе отсчета. При переходе от одной системы отсчета к другой все кинематические характеристики могут изменяться.

Связь между кинематическими величинами, характеризующими механическое движение в двух различных системах отсчета, движущихся друг относительно друга, называются преобразованиями.

Связь координат точки в системах отсчета, движущихся друг относительно друга, описывается **преобразованиями Галилея.** Преобразование всех других кинематических величин являются их следствиями.

Преобразование координат (преобразования Галилея)

Рассмотрим движение материальной точки A относительно системы XYZ (системы K) и системы $X_1Y_1Z_1$ (системы K_1). Система K_1 движется относительно системы K с постоянной скоростью $\vec{u}$, направленной параллельно оси X.



Найдем связь между координатами точки в системах отсчета K и K_1 в момент времени t. Расположим системы так, что координатные оси X и X_1 обеих систем совпадают, а оси Y и Y_1, Z и Z_1 – параллельны друг другу. В начальный момент времени $t_0 = 0$ начала координат обеих систем (точки O и O_1) совпадали.

Тогда в момент времени t положение точки в системах отсчета K и K_1 можно определить радиус-векторами $\vec{r}$ и $\vec{r}_1$. Тогда $\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{r}_1$. За время t начало координат системы K_1 переместилось на $\vec{r}_0 = \vec{u}t$, поэтому

$$\vec{r} = \vec{r}_1 + \vec{u}t.$$

Запишем это выражение в проекции на ось X:

$$x = x_1 + u_x t.$$

Координаты y, z и y_1, z_1 одинаковы в обеих системах отсчета. Поэтому преобразования координат при переходе от системы отсчета K_1 к системе отсчета K будут иметь вид:

$$\begin{cases} x = x_1 + u_x t; \\ y = y_1; \\ z = z_1. \end{cases}$$

Считается, что время течет одинаково в системах K и K_1, то есть $t = t_1$.

Эти преобразования координат называются ***<u>преобразованиями Галилея</u>***. Учитывая, что $u_x = u$, преобразования Галилея запишем так:

в векторной форме $\vec{r} = \vec{r}_1 + \vec{u}t$,

в проекциях на оси *X, Y, Z*

$$\begin{cases} x = x_1 + ut; \\ y = y_1; \\ z = z_1; \\ t = t_1. \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} x_1 = x - ut; \\ y_1 = y; \\ z_1 = z; \\ t_1 = t. \end{cases}$$

<u>Закон сложения скоростей</u>

При движении точки A ее радиус-вектор $\vec{r}$ в системе отсчета K за малый промежуток времени Δt изменится на $\Delta\vec{r}$ и станет равным $\vec{r} + \Delta\vec{r}$. За это же время в системе отсчета K_1 радиус-вектор $\vec{r}_1$ изменится на $\Delta\vec{r}_1$ и станет равным $\vec{r}_1 + \Delta\vec{r}_1$, а радиус-вектор $\vec{r}_0$ изменится на $\Delta\vec{r}_0 = \vec{u}\Delta t$. Согласно уравнению

$$(\vec{r} + \Delta\vec{r}) = (\vec{r}_1 + \Delta\vec{r}_1) + (\vec{r}_0 + \Delta\vec{r}_0) = (\vec{r}_1 + \Delta\vec{r}_1) + (\vec{u}t + \vec{u}\Delta t),$$

и так как $\vec{r} = \vec{r}_1 + \vec{u}t$, то

$$\Delta\vec{r} = \Delta\vec{r}_1 + \vec{u}\Delta t.$$

Эта формула связывает перемещение $\Delta\vec{r}$ (в системе отсчета K) и $\Delta\vec{r}_1$ (в системе отсчета K_1) за промежуток времени Δt.

Разделим правую и левую часть уравнения на Δt и будем считать промежуток Δt сколь угодно малым ($\Delta t \to 0$). Тогда

$$\lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{r}_1}{\Delta t} + \vec{u}.$$

Но $\lim\limits_{\Delta t \to 0} \dfrac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \vec{\upsilon}$ – мгновенная скорость точки в системе K, а $\lim\limits_{\Delta t \to 0} \dfrac{\Delta\vec{r}_1}{\Delta t} = \vec{\upsilon}_1$ – мгновенная скорость точки в системе K_1.

Таким образом, скорость точки в различных системах отсчета, движущихся друг относительно друга с постоянной скоростью $\vec{u}$, связаны соотношением

$$\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_1 + \vec{u}.$$

Это уравнение называется ***<u>законом сложения скоростей</u>*** в классической механике.

Учитывая, что при движении вдоль совпадающих осей координат X и X_1 проекции скорости $\vec{u}$ на оси Y и Z равны нулю ($u_y = 0, u_z = 0$), закон сложения скоростей в проекции на оси координат можно записать так

$$\begin{cases} \upsilon_x = \upsilon_{1_x} + u_x; \\ \upsilon_y = \upsilon_{1_y}; \\ \upsilon_z = \upsilon_{1_z}. \end{cases}$$

Часто для большей наглядности и удобства используют понятие абсолютного, относительного и переносного движений.

Для этого одну из систем координат, например XYZ, считают условно неподвижной.

Движение тела относительно неподвижной системы называют ***<u>абсолютным</u>***.

Движение тела относительно подвижной системы координат (относительно $X_1Y_1Z_1$) называют ***<u>относительным</u>***.

Движение подвижной системы координат относительно неподвижной системы называют ***<u>переносным</u>***.

Тогда скорость, ускорение, перемещение, путь, траектория точки в неподвижной системе координат называется абсолютными, а в подвижной системе координат – относительными.

В формуле $\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{u}$: $\vec{v}$ – абсолютная скорость ($\vec{v}_a$); $\vec{v}_1$ – относительная скорость ($\vec{v}_{отн}$) и $\vec{u}$ – переносная скорость ($\vec{v}_{пер}$).

Тогда закон сложения скоростей можно записать так

$$\vec{v}_a = \vec{v}_{отн} + \vec{v}_{пер}.$$

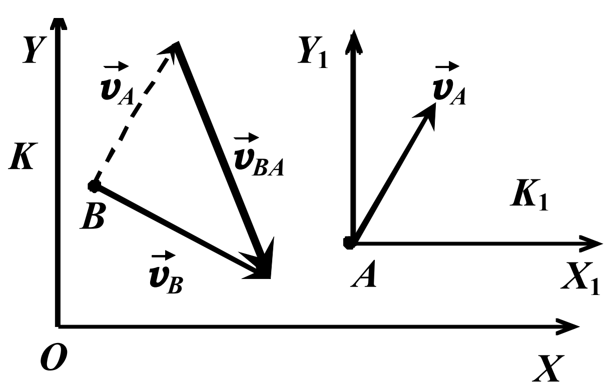
<u>Абсолютная скорость равна векторной сумме относительной и переносной скоростей</u>.

Уравнение для перемещений можно записать аналогично $\Delta\vec{r}_a = \Delta\vec{r}_{отн} + \Delta\vec{r}_{пер}$, или в проекции на ось X: $\Delta x_a = \Delta x_{отн} + \Delta x_{пер}$.

Относительная скорость движения двух тел

Рассмотрим два тела A и B, имеющих в системе отсчета K скорости $\vec{v}_A$ и $\vec{v}_B$. Найдем скорость движения $\vec{v}_{BA}$ тела B относительно тела A (относительную скорость двух тел).

Свяжем систему K_1 с телом A. Тогда система K_1 движется относительно системы K со скоростью $\vec{v}_A$. Относительная скорость $\vec{v}_{BA}$ – это скорость тела B относительно системы K_1. Воспользуемся законом движения скоростей $\vec{v}_a = \vec{v}_{отн} + \vec{v}_{пер}$.



Скорость тела B относительно системы K – это абсолютная скорость $\vec{v}_B = \vec{v}_a$. Скорость тела A в системе отсчета K – это переносная скорость $\vec{v}_A = \vec{v}_{пер}$.

Скорость $\vec{v}_{BA}$ – относительная скорость $\vec{v}_{BA} = \vec{v}_{отн}$.

Согласно закону сложения скоростей

$$\vec{v}_B = \vec{v}_{BA} + \vec{v}_A \text{ или } \vec{v}_{BA} = \vec{v}_B - \vec{v}_A.$$

<u>Скорость движения тела</u> B ***<u>относительно тела</u>*** A ***<u>равна разности скоростей этих двух тел</u>***. Относительную скорость можно найти вычитанием векторов по правилу треугольника.

<u>Относительная скорость не зависит от системы отсчета</u>.

Относительная скорость двух тел в системе отсчета K равна разности скоростей этих тел относительно этой системы:

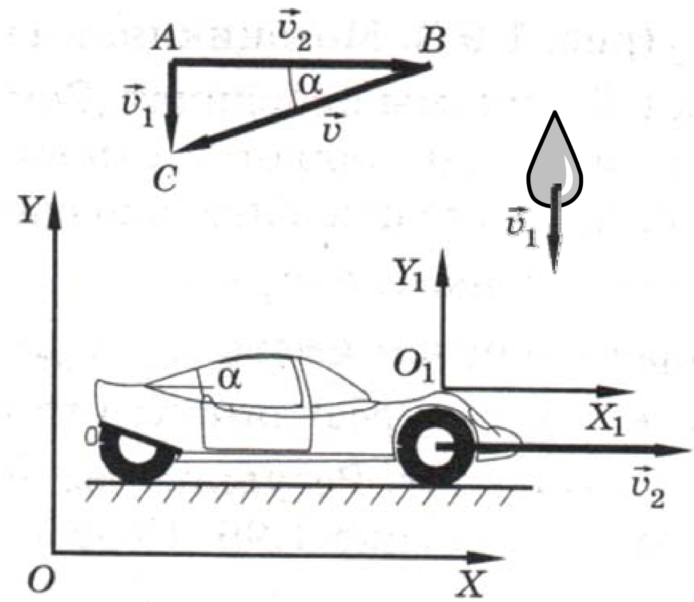
$$\text{так как } \vec{\upsilon}_A = \vec{\upsilon}_{1A} + \vec{u}, \quad \vec{\upsilon}_B = \vec{\upsilon}_{1B} + \vec{u},$$

$$\text{то } \quad \vec{\upsilon}_B - \vec{\upsilon}_A = \vec{\upsilon}_{1B} - \vec{\upsilon}_{1A}$$

Тогда **относительная скорость тел в системе отсчета *K* равна относительной скорости этих тел в системе отсчета *K₁*:** $\vec{\upsilon}_{BA} = \vec{\upsilon}_{1BA}$.

Пример решения задачи

Задача. Капли дождя падают относительно Земли отвесно (вертикально вниз) со скоростью $\upsilon_1 = 20$ *м/с.* С какой наименьшей скоростью υ_2 относительно Земли должен двигаться автомобиль, чтобы на заднем смотровом стекле, наклоненном под углом 45° к горизонту, не оставалось следов капель? Чему равна скорость капель относительно автомобиля?



Решение задачи. Капли дождя не будут задевать стекла автомобиля, если вектор скорости капель относительно автомобиля будет направлен параллельно стеклу.

Систему координат *XYZ* свяжем с Землей и будем считать её неподвижной. Движущуюся систему координат $X_1Y_1Z_1$ свяжем с автомобилем.

Обозначим скорость капель относительно Земли (абсолютная скорость) $\vec{\upsilon}_a = \vec{\upsilon}_1$; $\vec{\upsilon}_{пер} = \vec{\upsilon}_2$, тогда $\vec{\upsilon}_{отн} = \vec{\upsilon}$.

Согласно закону сложения скоростей $\vec{\upsilon}_a = \vec{\upsilon}_{отн} + \vec{\upsilon}_{пер}$ или $\vec{\upsilon}_1 = \vec{\upsilon} + \vec{\upsilon}_2$.

Отсюда $\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_1 - \vec{\upsilon}_2$. Вычитание векторов $\vec{\upsilon}_1$ и $\vec{\upsilon}_2$ показано на рисунке. Треугольник ABC – прямоугольный, поэтому $\angle ABC = \alpha$, $\upsilon = \dfrac{\upsilon_1}{\sin\alpha}$ и $\upsilon_2 = \upsilon_1 \cdot ctg\alpha$. Тогда, подставив значения, получим:

$$\upsilon = \frac{20\ м/с}{\sin 45^0} = 28 м/с\ ;\ \upsilon_2 = \upsilon_1 = 20\ м/с.$$

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Слушайте, читайте, повторяйте.*

Механическое движение; относительное движение; движение тела относительно другого тела; система отсчета; неподвижная система отсчета; подвижная система отсчета; лабораторная система отсчета; положение тела относительно неподвижной системы отсчета; положение тела относительно подвижной системы отсчета; скорость тела относительно неподвижной системы отсчета; абсолютная скорость; скорость тела относительно подвижной системы отсчета; относительная скорость; скорость подвижной системы отсчета относительно неподвижной системы отсчета; переносная скорость; закон сложения скоростей; преобразования координат; преобразования Галилея.

Упражнение 2. *Решите задачи.*

1. Два автобуса движутся в одном направлении. Модули их скоростей равны 90 и 60 км/ч. Чему равна скорость первого автобуса относительно второго и второго относительно первого?

2. Два автобуса движутся равномерно навстречу друг другу. Модули их скоростей равны 20 и 30 м/с. Чему равна скорость первого автобуса относительно второго?

3. По двум параллельным железнодорожным путям навстречу друг другу движутся два поезда со скоростями 72 и 108 км/ч. Длина первого поезда 800 м, а второго 200 м. В течение какого времени один поезд проходит мимо второго?

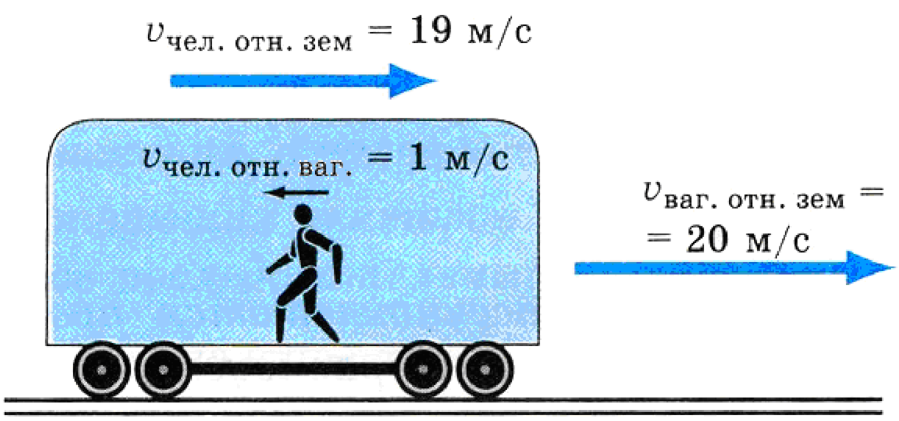
4. Скорость течения реки 1,5 м/с (относительно берега). Чему равен модуль скорости лодки относительно воды, если лодка движется перпендикулярно к берегу со скоростью 2 м/с относительно него?

5. Теплоход от Нижнего Новгорода до Астрахани плывет 5 сут, а обратно 7 сут. Сколько времени от Нижнего Новгорода до Астрахани плывет плот?

6. Два тела начинают падать одновременно без начальной скорости. Первое тело падает вниз с высоты 250 м, а второе тело с высоты 150 м. Определите скорость первого тела относительно второго тела. Найдите изменение относительной координаты первого тела.

7. Два тела бросают одновременно. Первое тело бросают вертикально вверх с Земли со скоростью 20 м/с. Второе тело бросают вертикально вниз с начальной скоростью 10 м/с с высоты 200 м. С какой скоростью первое тело движется относительно второго тела? Как изменяется относительная координата первого тела?

Упражнение 3. *По рисунку составьте и решите задачу.*



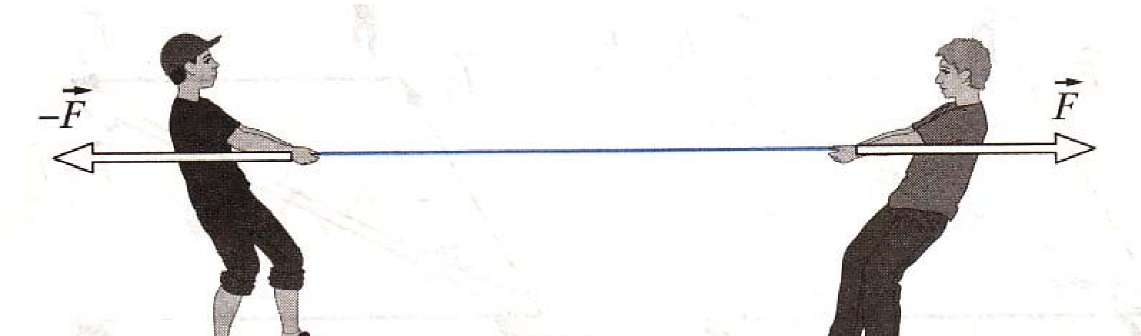
ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. Движение любого тела можно рассматривать только относительно других тел или систем отсчета.

2. Все кинематические понятия (траектория, координата, путь, перемещение, скорость, ускорение) имеют определенную форму и числовые значения в одной выбранной системе отсчета. При переходе от одной системы отсчета к другой все кинематические характеристики могут изменяться.
3. Связь между кинематическими величинами, характеризующими механическое движение в двух различных системах отсчета, движущихся друг относительно друга, называются ***преобразованиями*** .
4. Связь координат точки в системах отсчета, движущихся друг относительно друга, описывается **преобразованиями Галилея.** Учитывая, что $u_x = u$, преобразования Галилея запишем так:
   в векторной форме $\vec{r} = \vec{r}_1 + \vec{u}t$,
   в проекциях на оси *X, Y, Z*
   $$\begin{cases} x = x_1 + ut; \\ y = y_1; \\ z = z_1; \\ t = t_1. \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} x_1 = x - ut; \\ y_1 = y; \\ z_1 = z; \\ t_1 = t. \end{cases}$$
5. $\Delta\vec{r} = \Delta\vec{r}_1 + \vec{u}\Delta t$ – эта формула связывает перемещение $\Delta\vec{r}$ (в системе отсчета *K*) и $\Delta\vec{r}_1$ (в системе отсчета K_1) за промежуток времени Δt.
6. $\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_1 + \vec{u}$ – это уравнение называется ***законом сложения скоростей*** в классической механике или $\vec{\upsilon}_a = \vec{\upsilon}_{отн} + \vec{\upsilon}_{пер}$,
   Абсолютная скорость равна векторной сумме относительной и переносной скоростей.

Глава 3.
ДИНАМИКА



ТЕМА 1. **ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ДИНАМИКИ**

1.1. **Основная задача динамики**

Новые слова и словосочетания

действие	взаимодействие
сила	основоположник
инерция	относительность

Динамика – это часть механики. **Изучая движение тел, динамика,** отвечает на вопрос «почему движется тело?». Динамика объясняет, при каких условиях тело движется равномерно или равноускоренно, когда тело движется прямолинейно и когда криволинейно. ***Динамика,*** которая изучает законы движения тел, выясняет причины, вызывающие или изменяющие это движение.

Причина изменения движения – взаимные действия тел друг на друга. **Действия тел друг на друга – это сила.**

Динамикой (от греческого *dynamis* – сила) называется раздел механики, в котором изучается движение материальных тел под действием приложенных к ним сил.

Основная (прямая) задача динамики:
определение уравнения движения материальной точки (материального тела), если известны все силы, действующие на точку.

Для решения этой задачи необходимо знать начальное состояние точки (положение и скорость точки в некоторый начальный момент времени).

- по уравнению движения можно определить физические (кинематические) величины, характеризующие движение в любой момент времени;

Обратная задача динамики:

- **определение характера сил по известному или заданному уравнению движения тела, то есть по зависимости координат, скорости или ускорения от времени.**

Основоположником динамики как науки является Г. Галилей, который впервые установил закон движения тела под действием постоянной силы (закон равноускоренного падения). Он открыл закон инерции и сформулировал механический принцип относительности.

Основные положения динамики были сформулированы великим английским ученым И. Ньютоном в 1687 г. в виде основных законов движения. Эти законы лежат в основе классической механики и устанавливают связь между параметрами движения тела и причинами, которые вызвали это движение.

Законы Ньютона выполняются для тел, скорость которых меньше скорости света. Знание законов Ньютона позволяет решить основную задачу динамики – найти положение тела или нескольких тел в любой момент времени.

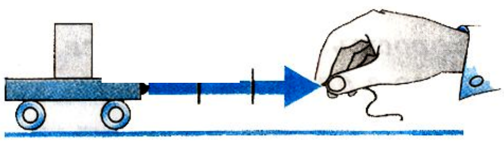
1.2. **Инерция, инертность**

Новые слова и словосочетания

инерция	инертность
наблюдение	причина
влиять	мера
деформация	укреплять, укреплённый
компенсировать	действие
взаимодействие	подвесить
подвешенный	аддитивная величина

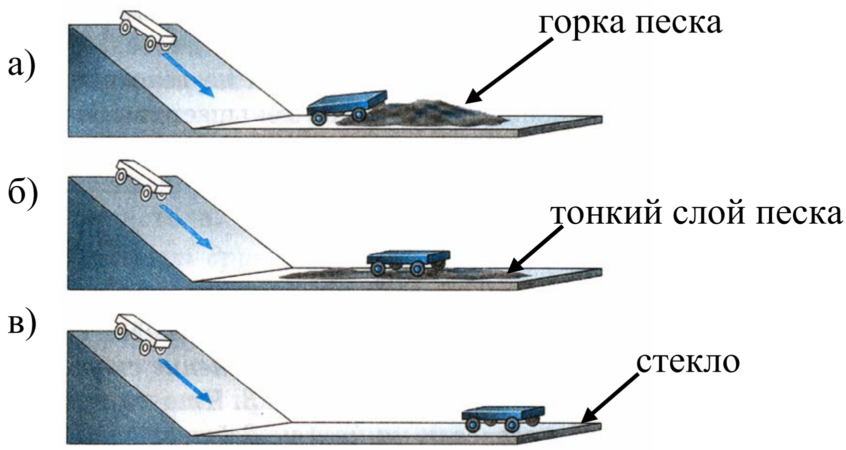
Чтобы тело, находящееся в покое изменило положение в пространстве, необходимо оказать на него некоторое воздействие. Без внешнего воздействия не может быть движения. Чем сильнее воздействие, тем больше скорость.

Пример 1. Чтобы тележка начала двигаться, на нее необходимо подействовать другим телом, например, рукой.

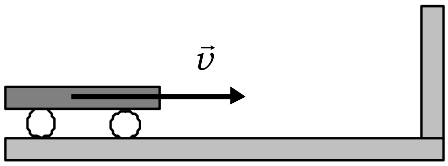


Изменение скорости тела (величины и направления) происходит в результате действия на него другого тела.

Пример 2. Тележка, скатившись с горки и попав в песок, останавливается. Скорость тележки уменьшается очень быстро. Если убрать песок с пути тележки, то её скорость изменяется медленнее (она проходит большее расстояние).



Итак, чем меньше действие другого тела на тележку, тем дольше сохраняется скорость её движения, и меньше изменяется скорость. Движение тележки становится ближе к равномерному движению.

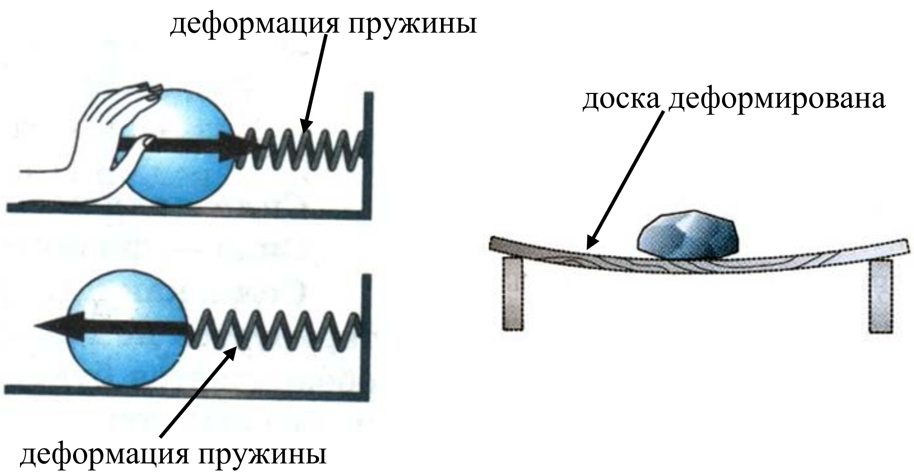


Пример 3. Если на тележку не действуют другие тела, то она будет находиться в покое или двигаться равномерно и прямолинейно. Остановить тележку может только другое тело (например, стенка).

Явление сохранения скорости тела при отсутствии действия на него других тел называют инерцией. (Инерция – от латинского «*инерциа*» – неподвижность, бездеятельность).

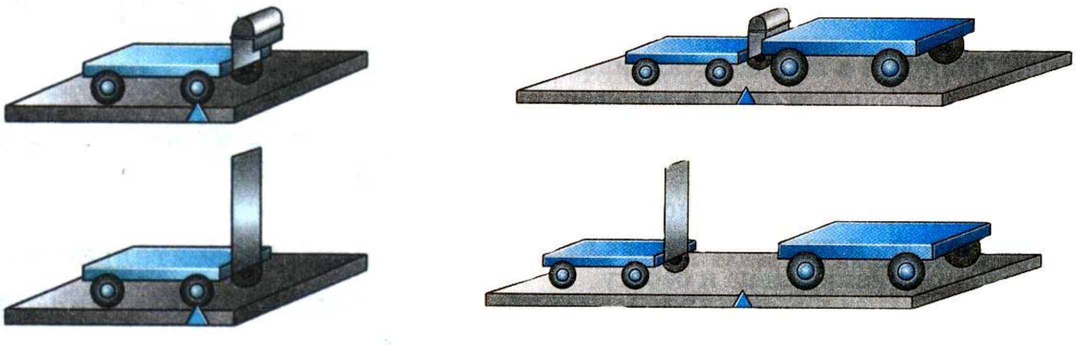
Таким образом, **движение тела при отсутствии действия на него других тел называют движением по инерции.**

Пример 4. В результате действия других тел тело может изменить форму или размер (деформироваться).



1.3. <u>**Сила**</u>

Изменение скорости тела или деформация тела происходит только под действием другого тела.



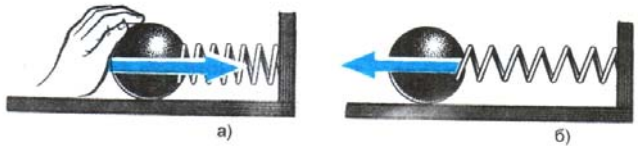
Рассмотрите внимательно рисунок.

Тележки действуют друг на друга, то есть они **взаимодействуют**. В результате взаимодействия оба тела изменяют свою скорость.

Физическая величина, которая характеризует действие одного тела на другое, называется силой.

Сила – это результат действия одного тела на другое тело или результат взаимодействия двух тел.

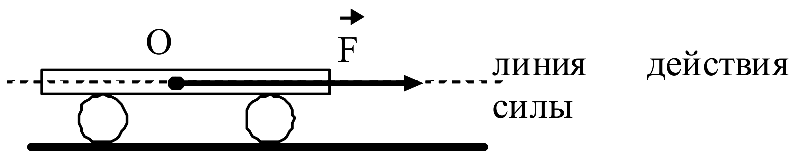
Сила меняет скорость или деформирует тело.



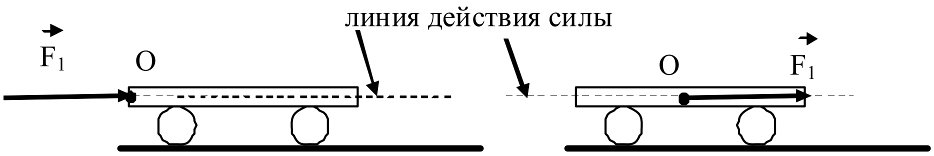
Сила – это количественная мера действия тел друг на друга, в результате которого тела получают ускорения или деформируются.

Сила – величина векторная. Она характеризуется величиной, направлением, точкой приложения.

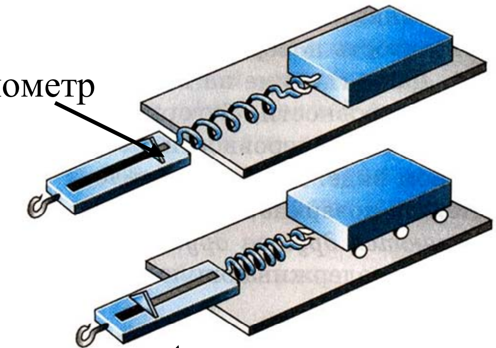
Линия действия силы – это направление, по которому действует сила. Точка O – точка приложения силы.



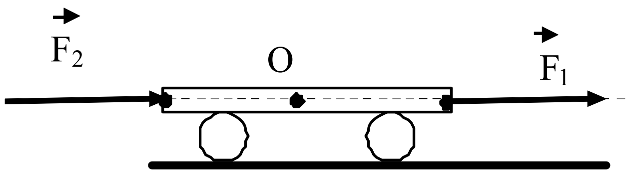
Точку приложения силы можно переносить вдоль линии действия силы.



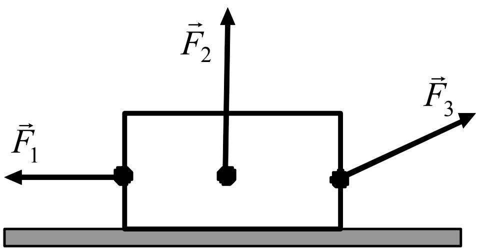
Сила измеряется в системе СИ в ньютонах (Н). **Прибор для измерения силы называется динамометром.**



Две силы равны друг другу, если они равны по модулю, имеют одинаковое направление и действуют по одной прямой. $\vec{F}_1 = \vec{F}_2$.



Все силы, рассматриваемые в механике можно условно разделить на силы, возникающие при непосредственном контакте тел (силы давления, силы трения), и силы, возникающие через созданные взаимодействующими телами поля (гравитационные силы, электромагнитные силы).

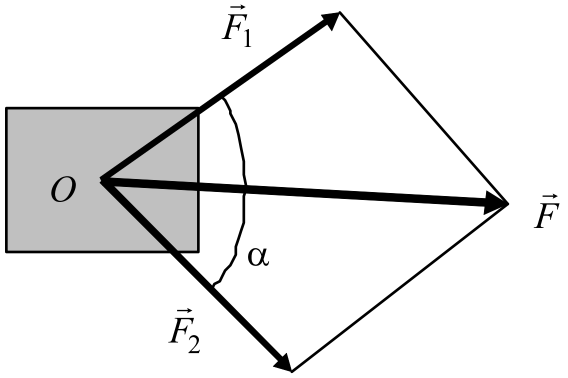


Если на тело действует несколько сил, то для них выполняется **принцип независимого действия: каждая сила действует независимо от других сил.** Совместное действие нескольких сил равно векторной сумме независимых действий отдельных сил.

Сложение сил. Если на тело действует несколько сил, то их можно сложить и заменить одной силой, которая называется **равнодейст-**

вующей. Равнодействующая сила $\vec{F}$ находится по правилу сложения векторов. $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3, ...\vec{F}_n$ – силы, действующие на одно тело:

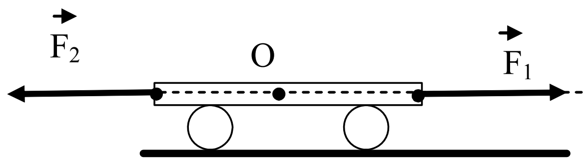
$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + ... + \vec{F}_n = \sum_n \vec{F}_n ,$$



$\vec{F}$ – равнодействующая сила, $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3, ...\vec{F}_n$ – составляющие силы.

Если на тело действует две силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ под углом α друг к другу, то модуль равнодействующей этих сил равен

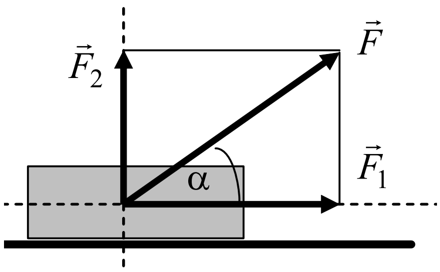
$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2 \cdot \cos\alpha} .$$



Если сумма сил, действующих на тело равна нулю, то силы друг друга **уравновешивают**. На рисунке силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ уравновешивают друг друга, так как **равнодействующая этих сил равна нулю.**

Если на тело не действуют силы или действующие силы уравновешивают друг друга, то тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения (движется по инерции).

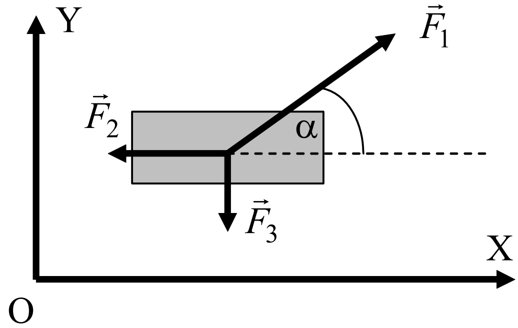
Разложение сил. Любую силу можно разложить на составляющие, то есть одну силу представить как сумму двух сил. Для этого определяют направление составляющих.



Пример: $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$.

Модуль составляющих равен $F_1 = F \cdot \cos\alpha$, $F_2 = F \cdot \sin\alpha$.

Проекция сил. Силы можно спроектировать на соответствующие оси. Можно определить проекцию равнодействующей силы на оси OX и OY.



Пример: проекция равнодействующей силы на ось OX равна сумме проекций всех сил на эту ось

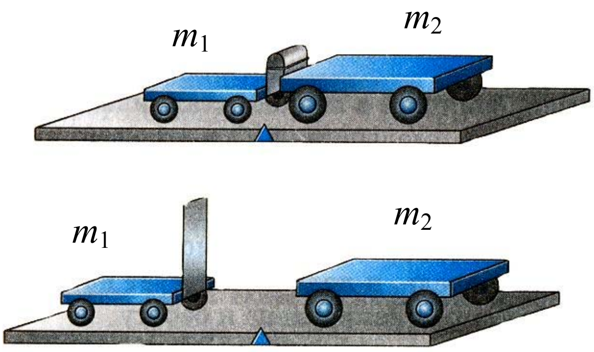
$$F_x = F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} = F_1 \cdot \cos\alpha - F_2 + 0;$$

проекция равнодействующей на ось OY равна сумме проекций всех сил на эту ось

$$F_y = F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} = F_1 \cdot \sin\alpha + 0 - F_3 \quad .$$

1.4. **Масса тела**

Разные тела по-разному меняют свою скорость, если на них действует сила. Одни тела быстро меняют свою скорость под действием силы и движутся с большим ускорением. Другие тела под действием той же силы медленно меняют свою скорость и движутся с меньшим ускорением. Говорят, что разные тела имеют разную **инертность.**



Инертность тела – это физическое свойство тела оказывать сопротивление изменению его скорости или характеризует способность тела менять свою скорость под действием силы.

Обратите внимание на рисунок. Правая тележка больше (массивнее, инертнее), чем левая. В результате взаимодействия правая тележка прошла меньшее расстояние, чем левая. Следовательно, правая тележка имеет меньшее ускорение, чем левая. Чем больше инертность тела, тем меньшее ускорение оно получает под действием силы и тем медленнее меняет свою скорость.

Чтобы оценить инертность тела количественно, вводят понятие **массы**.

Масса тела – это количественная характеристика инертности тела, или масса тела – это мера инертности. Масса – величина скалярная.

Единица измерения массы в СИ – килограмм (*кг*).

На рисунке масса правой тележки m_2 больше, чем масса левой тележки m_1.

В классической механике масса тела величина постоянная, она не зависит от того, где находится тело, движется оно или покоится. Масса тела величина аддитивная – масса тела равна сумме масс частиц тела.

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Слушайте, читайте, повторяйте.*

Действовать; действовать друг на друга; тела действуют друг на друга; действие; действие тел друг на друга; взаимодействие; взаимодействовать; тела взаимодействуют; взаимодействие тел; при взаимодействии тел.

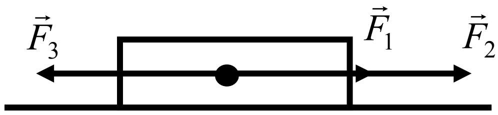
Явление; причина; является; являться причиной; являться причиной изменения скорости; причиной изменения скорости является действие; причиной изменения скорости является действие на тело других тел.

Инерция; движение по инерции; способность оказывать сопротивление; способность изменять скорость; характеристика; характеристика инертности; мера инертности.

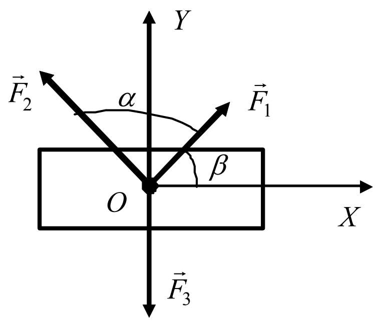
Упражнение 2. *Решите задачи.*

1. На тело действуют две силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ в противоположных направлениях. Определить равнодействующую силу, если $F_1 = 4$ Н, а $F_2 = 9$ Н.

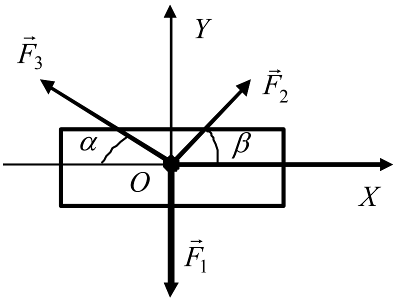
2. На тело действуют три силы $F_1 = 4$ Н, $F_2 = 5$ Н и $F_3 = 10$ Н, как показано на рисунке. Определить равнодействующую силу.



3. На тело действуют три силы $F_1 = 3$ Н, $F_2 = 4$ Н и $F_3 = 8$ Н под углом друг к другу, как показано на рисунке. Углы α = 90°, β = 45°. Найти равнодействующую этих сил. Найти проекции равнодействующей силы на оси *OX* и *OY*.

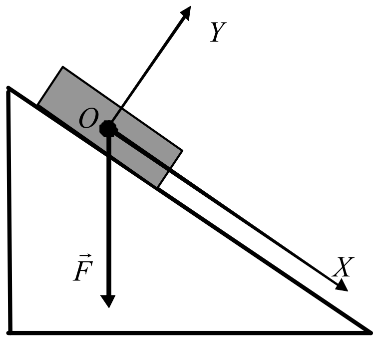


4. На тело действуют три силы $F_1 = 100$ Н, $F_2 = 75$ Н и $F_3 = 50$ Н, как показано на рисунке. Углы $\alpha = 60°$, $\beta = 30°$. Найти равнодействующую методом проекций.



5. На тело действуют три силы $F_1 = 3$ Н, $F_2 = 4$ Н и F_3, которые уравновешивают друг друга. Определить силу F_3, если угол между силами $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ равен 30°.

6. Тело находится на наклонной плоскости. Угол наклона плоскости к горизонту равен 60°. На тело действует сила $F = 100$ Н. Разложить силу на составляющие по осям OX и OY.



ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. Явление сохранения скорости тела при отсутствии действия на него других тел называют **инерцией.**
2. Движение тела при отсутствии действия на него других тел называют движением по инерции.
3. Сила – это результат действия одного тела на другое тело или результат взаимодействия двух тел. Сила меняет скорость или деформирует тело. **Сила –** это количественная мера действия тел друг на друга, в результате которого тела получают ускорения или деформируются. Сила – величина векторная. Она характеризуется величиной, направлением, точкой приложения.

4. **Масса тела –** это количественная характеристика инертности тела, или масса тела – это мера инертности. Масса – величина скалярная.
5. **Инертность тела –** это физическое свойство тела оказывать сопротивление изменению его скорости или характеризует способность тела менять свою скорость под действием силы.

ТЕМА 2. **ЗАКОНЫ НЬЮТОНА**

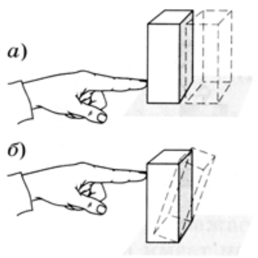
Новые слова и словосочетания

компенсировать	инерциальный
действие	противодействие
принцип независимости	суперпозиция
отклоняться вперёд	отклоняться назад
уравновешивать	изолировать

В основе динамики лежат ТРИ закона Ньютона. Эти законы выполняются для тел, скорости которых меньше скорости света. Знание законов Ньютона позволяет решить основную задачу динамики – найти положение тела или нескольких тел в любой момент времени.

2.1. **Инерциальные системы отсчета. Первый закон Ньютона**

Сила – это действие одного тела на другое тело. Если тело бесконечно удалено от других тел, то такое тело называют *изолированным.*



Изолированное тело, сохраняет свое состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, так как на него не действуют другие тела. В этом случае говорят, что тело движется по инерции.

Система отсчета, в которой тело, не взаимодействующее с другими телами, сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения называется инерциальной.

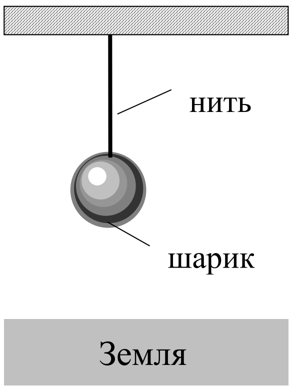
Любая система отсчета, движущаяся равномерно и прямолинейно относительно инерциальной системы, также является инерциальной.

Вокруг любого тела (движется оно или покоится) есть много других тел. Совместное действие нескольких тел может привести к тому, что тело относительно выбранной системы отсчета покоится или движется равномерно и прямолинейно. В этом случае можно сказать, что эта система отсчета для данного тела является инерциальной.

Любое тело может сохранять состояние покоя или равномерного прямолинейного движения относительно инерциальной системы отсчета, если действия на него других тел скомпенсированы (если равнодействующая сила, действующая на тело, равна нулю).

Рассмотрим несколько примеров движения тел.

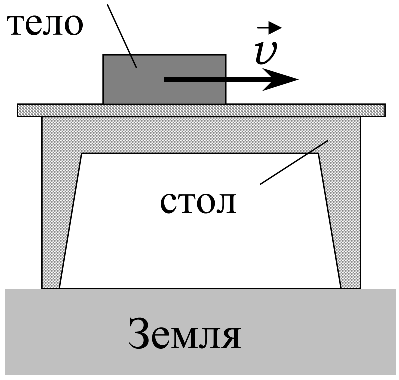
Пример 1. Рассмотрим шарик, подвешенный на нити. Скорость и ускорение такого тела равны нулю относительно Земли. Вокруг шарика



находится множество различных тел. Из всех тел, окружающих шарик только **два тела** влияют на его состояние: **нить** и **Земля**. Их **совместное действие создает состояние покоя**. Если убрать одно из тел, состояние покоя нарушится, (шарик начнет двигаться). Таким образом, действия на шарик двух тел – нити и Земли – **компенсируют** ***(*уравновешивают*)*** друг друга.

Если влияния двух или нескольких тел компенсируют друг друга, то это значит, что результат их совместного влияния такой же, как если бы этих тел не было бы совсем.

Итак, **тело находится в состоянии покоя, если действия на него других тел компенсируются**.



Пример 2. Рассмотрим тело, движущееся по гладкому столу (без трения) с постоянной скоростью прямолинейно. На тело (из всех тел, окружающих данное) влияют только два – стол и Земля. Совместное влияние стола и Земли не изменяет равномерного прямолинейного движения тела.

Движение тела относительно стола равномерное и прямолинейное. Если вместо системы отсчета «стол» выберем «Землю», то движение тела тоже будет равномерным и прямолинейным. Тело движется по инерции.

Системы отсчета, относительно которых тело при компенсации внешних воздействий движется прямолинейно и равномерно или покоится, называются инерциальными системами отсчета.

В рассмотренных нами примерах инерциальными были система отсчета, связанная с Землей, и система отсчета, связанная со столом.

Сформулируем закон инерции.

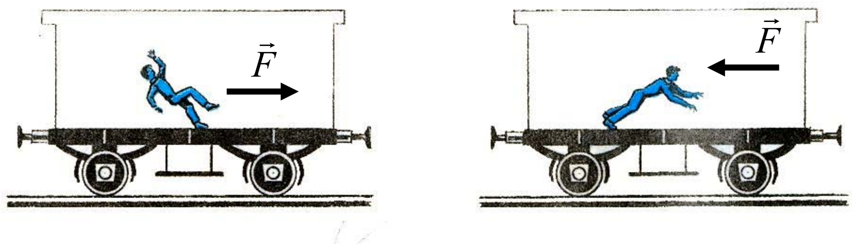
Существуют такие системы отсчета, относительно которых поступательно движущееся тело сохраняет свою скорость постоянной, если на него не влияют другие тела (или влияния других тел компенсируется).

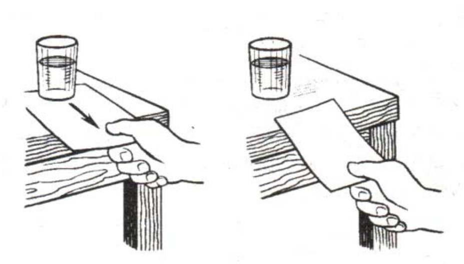
Закон инерции называется первым законом движения или **первым законом Ньютона**:

в инерциальных системах отсчета тело сохраняет состояние покоя или движется равномерно и прямолинейно, если

на это тело не действуют силы или если силы уравновешивают друг друга.

Первый закон Ньютона справедлив только в инерциальных системах отсчета.



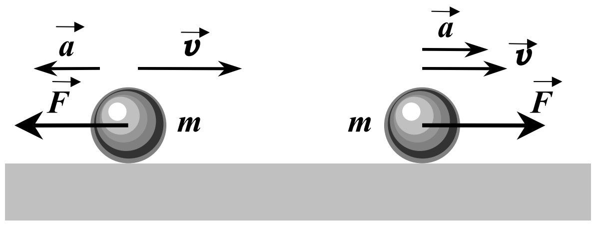


Объясните физические явления, изображенные на рисунках.

Система отсчета, движущаяся относительно инерциальной системы отсчета с ускорением, называется *неинерциальной.*

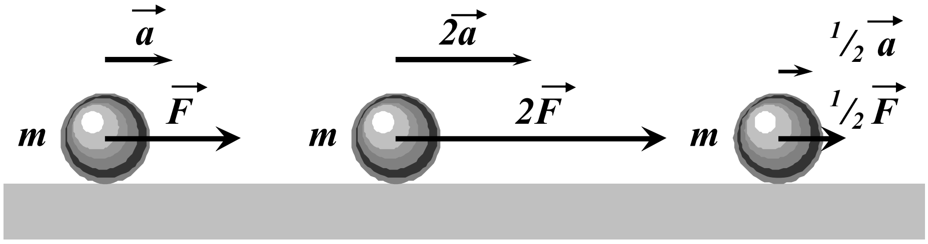
2.2. <u>**Второй закон Ньютона**</u>

Если на тело действует сила, то скорость этого тела изменяется. Если сила действует в направлении движения тела, то скорость тела увеличивается. Если сила действует в направлении, противоположном движению, скорость уменьшается. Вектор изменения скорости (ускорение) совпадает с направление силы.



Чем больше сила $\vec{F}$, тем больше изменение скорости $\Delta\vec{v}$ ($\vec{F} \sim \Delta\vec{v}$). Так как изменение скорости в единицу времени определяет ускорение $\vec{a}$, то ускорение тела пропорционально силе, действующей на тело:

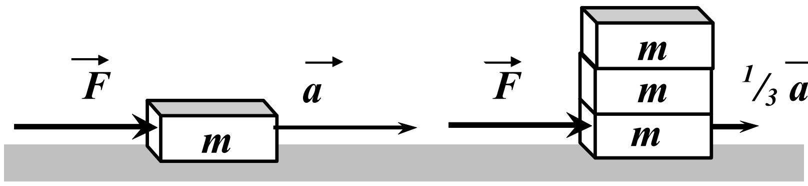
$$\vec{F} \sim \vec{a}\,.$$



Таким образом, **<u>сила – векторная физическая величина. Она является мерой механического воздействия на тело со стороны другого тела, в результате которого тело приобретает ускорение или изменяет форму и объем</u>**.

Таким образом, ускорение, с которым движется тело постоянной массы, прямо пропорционально приложенной к этому телу силе, в результате которой возникает ускорение.

Пропорциональность между силой $\vec{F}$ и ускорением $\vec{a}$ верна для сил любой физической природы. Чем больше сила, действующая на тело определенной массы, тем большее ускорение оно приобретает.



Чем больше масса тела, тем труднее его сдвинуть. Чем больше масса тела, тем меньшее ускорение оно приобретает при одной и той же действующей на него силе.

Таким образом, связь между ускорением тела и силой, действующей на него, можно представить в виде

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

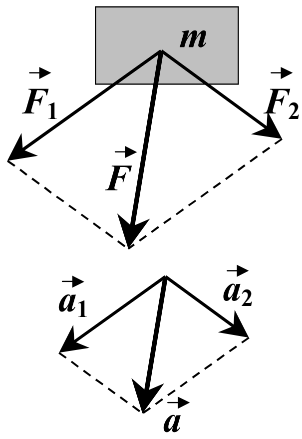
Если на тело массой m действует несколько сил $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, $\vec{F}_3$, … $\vec{F}_n$, то согласно принципа независимости действия сил(принцип суперпозиции, принцип наложения), каждая сила сообщает телу ускорение независимо от действия других сил.

Если на тело массой m действует сила $\vec{F}_1$, то она сообщает ему ускорение $\vec{a}_1 = \frac{\vec{F}_1}{m}$. Под действием силы $\vec{F}_2$ тело приобретает ускорение $\vec{a}_2 = \frac{\vec{F}_2}{m}$. При одновременном действии на тело двух сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ тело движется с ускорением $\vec{a} = \vec{a}_1 + \vec{a}_2$ или

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_1}{m} + \frac{\vec{F}_2}{m} = \frac{(\vec{F}_1 + \vec{F}_2)}{m}.$$

Если на тело действуют n сил $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, $\vec{F}_3$, … $\vec{F}_n$, то результирующее ускорение тела определяется суммарной (равнодействующей) силой $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \ldots + \vec{F}_n$.

С учетом принципа суперпозиции сформулируем **второй закон Ньютона**:



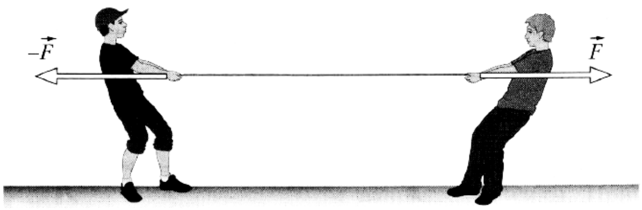
в инерциальной системе отсчета ускорение тела прямо пропорционально векторной сумме всех действующих на тело сил и обратно пропорционально массе тела

$$\vec{a} = \frac{\sum \vec{F}}{m} \text{ или } m\vec{a} = \sum \vec{F}.$$

или произведение массы тела на его ускорение равно векторной сумме всех действующих на него сил.

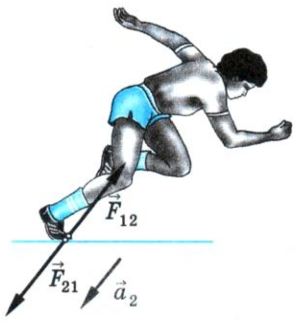
2.3. Третий закон Ньютона

Сила, которая сообщает телу ускорение, является мерой внешнего действия на него другого тела. Эта сила возникает при взаимодействии между телами. Так как тела равноправны, то каждое из тел действует на другое. Говорят **сила действия** первого тела на второе и **сила противодействия** второго тела на первое.



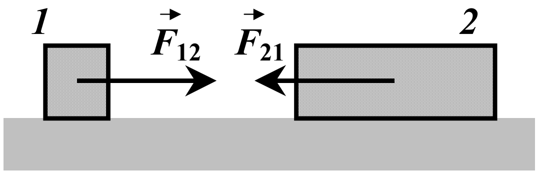
Силы действия и противодействия, которые возникают в результате взаимодействия тел, являются одинаковыми силами по природе.

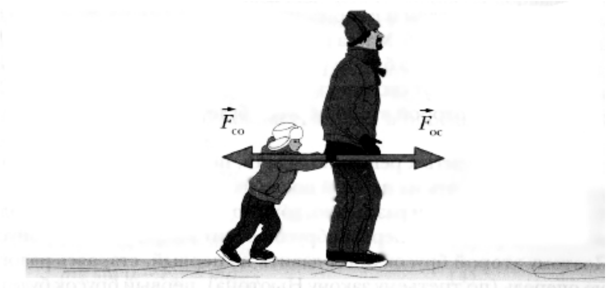
Например, взаимодействие планет является гравитационным, стального бруска и магнита – электромагнитным. При любом действии одного тела на другое всегда возникает одновременно равное по величине и направленное противоположно действие второго тела на первое.



Например, спортсмен действует на Землю, отталкиваясь от неё, Земля также действует на спортсмена, сообщая ему ускорение.

<u>Любому действию есть равное противоположно направленное противодействие</u>. На рисунке тело 1 действует на тело 2 с силой $\vec{F}_{21}$, а тело 2 на тело 1 – с силой $\vec{F}_{12}$. Эти силы приложены к различным телам: сила $\vec{F}_{21}$ к телу 2, а сила $\vec{F}_{12}$ к телу 1. При этом сила $\vec{F}_{21}$ численно равна силе $\vec{F}_{12}$. **Обе силы направлены по одной прямой**. Сила $\vec{F}_{12}$ направлена противоположно силе $\vec{F}_{21}$.



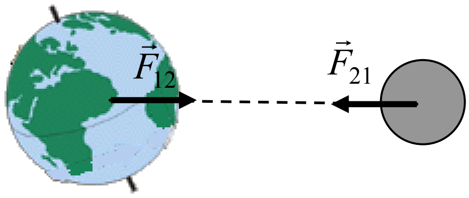


<u>Два тела взаимодействуют с силами, равными по величине, но противоположными по направлению (третий закон Ньютона)</u>

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

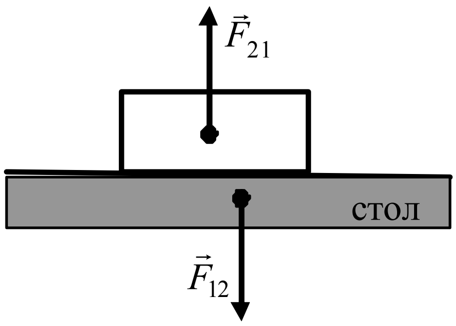
Силы $\vec{F}_{12}$ и $\vec{F}_{21}$ приложены к разным телам, поэтому их нельзя складывать, и они не уравновешиваются. **Действие этих двух сил нельзя заменить действием одной силы.**

Силы действия и противодействия – это силы одной природы.



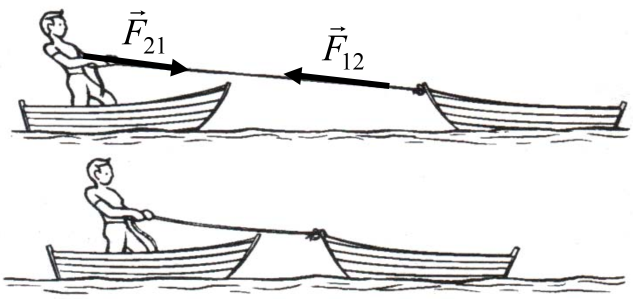
В физике для удобства силы, действия и противодействия, приложенные к разным телам, имеют разные названия.

Пример 1. Тело лежит на столе. Тело находится в покое. Тело давит (действует) на стол с такой же силой, с какой стол действует на тело. Силу действия тела на стол $\vec{F}_{12}$ называют **силой нормального давления**. Эта сила направлена по нормали к поверхности соприкосновения тел.



Сила действия стола (опоры) на тело $\vec{F}_{21}$ называют **силой реакции (силой реакции опоры).**

Пример 2. Человек тянет лодку. В результате взаимодействия, другая лодка также приходит в движение. В этом случае, сила, с которой человек действует на веревку $\vec{F}_{12}$, приложена к веревке натягивая её, поэтому она называется **силой натяжения**. Сила действия веревки на человека $\vec{F}_{21}$ называют **силой реакции (веревки).** Расставьте силы действия и противодействия относительно другой лодки.



<u>УПРАЖНЕНИЯ</u>

<u>Упражнение 1.</u> *Слушайте, читайте, повторяйте.*

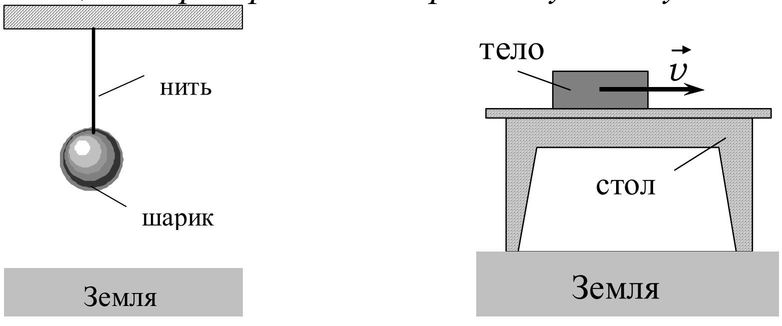
Компенсировать; действие одного тело компенсирует действие другого тела; компенсироваться; действие одного тела компенсируется действием другого тела; компенсация; компенсация действия.

Явление; явление сохранения скорости; явление сохранения скорости движения; сохранять скорость; сохранять состояние; сохранять состояние покоя; сохранять состояние равномерного и прямолинейного движения.

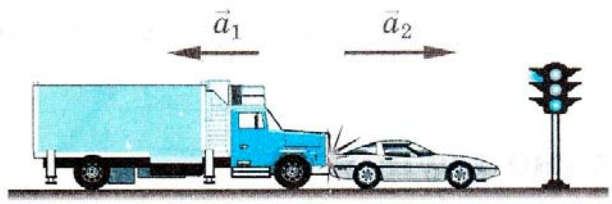
Инерция; движение по инерции; инерциальный; инерциальная система отсчета.

Установить; устанавливать связь; связь между характеристиками; устанавливать связь между характеристиками движения тела.

<u>Упражнение 2.</u> *Сделайте в тетради такие же рисунки и изобразите на них силы, которые равны по третьему закону Ньютона.*



Упражнение 3. *Объясните физические явления, изображенные на рисунках.*



Упражнение 4. *Решите задачи.*

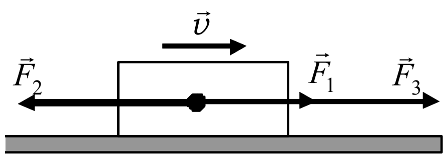
1. Тело массой 5 кг движется под действием силы $\vec{F}_1$ с ускорением 10 м/с^2. Определите модуль силы $\vec{F}_1$.

4. Тело массой 10 кг, двигаясь равнозамедленно, прошло путь 5 м. Начальная скорость тела 8 м/с. Определить силу, под действием которой двигалось тело.

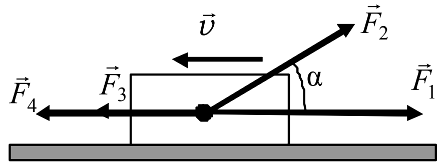
5. Тело массой 10 кг начинает двигаться под действием силы 100 Н. Через сколько времени скорость тела станет 20 м/с? Через сколько времени скорость удвоится?

6. Тело движется равномерно по горизонтальной плоскости под действием двух сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$. Сила $F_1 = 50$Н. Определить силу F_2, если она направлена под углом 30° к горизонту.

7. Тело массой 10 кг движется равнопеременно, как показано на рисунке, под действием трех сил $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$ и $\vec{F}_3$. Определить ускорение тела и характер движения, если $F_1 = 25$ Н, $F_2 = 10$ Н, $F_3 = 5$ Н.



8. Тело массой 5 кг движется, как показано на рисунке, под действием четырех сил $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, $\vec{F}_3$ и $\vec{F}_4$. Определить характер движения тела, если угол $\alpha = 30°$.



ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. ***<u>Закон инерции</u>*** называется первым законом движения или ***<u>первым законом Ньютона</u>***:
   в инерциальных системах отсчета тело сохраняет состояние покоя или движется равномерно и прямолинейно, если на это тело не действуют силы или если силы уравновешивают друг друга.
2. **Система отсчета**, в которой тело, не взаимодействующее с другими телами, сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения называется **инерциальной.**
   Любая система отсчета, движущаяся равномерно и прямолинейно относительно инерциальной системы, также является инерциальной.
3. **<u>Второй закон Ньютона</u>**:
   в инерциальной системе отсчета ускорение тела прямо пропорционально векторной сумме всех действующих на тело сил и обратно пропорционально массе тела
   $$\vec{a} = \frac{\sum \vec{F}}{m} \text{ или } m\vec{a} = \sum \vec{F}.$$
   или произведение массы тела на его ускорение равно векторной сумме всех действующих на него сил.
4. **<u>Третий закон Ньютона:</u>** два тела взаимодействуют с силами, равными по величине, но противоположными по направлению
   $$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}.$$

ТЕМА 3. **СИЛЫ В МЕХАНИКЕ**

Новые слова и словосочетания	
тяготение	притяжение
упругость	упругие силы
сила упругости	сила тяжести
сила трения	проявиться, проявляться
контакт	гравитация
дальнодействие	напряженность

Сила – это количественная характеристика действия одного тела на другое тело или количественная характеристика взаимодействия двух тел.

Во Вселенной, на нашей планете, в любом веществе, в живых организмах, в атомах, в атомных ядрах и в мире элементарных частиц встречается **четыре типа взаимодействий (четыре типа сил)**: гравитационное, электромагнитное, сильное (ядерное) и слабое.

При рассмотрении механических движений рассматриваются только два вида взаимодействий: **электромагнитные и гравитационные**. Сильные (ядерные) и слабые взаимодействия проявляются на малых расстояниях, когда законы Ньютона, а с ними вместе и понятие механическая сила, точка приложения силы, линия действия силы теряет смысл.

К **гравитационным силам** относятся: **силы тяготения**, **сила тяжести**; к **электромагнитным силам относятся:** **сила упругости** и **сила трения**.

Все силы, рассматриваемые в механике можно условно разделить на силы, возникающие при непосредственном контакте тел (силы давления, силы трения), и силы, возникающие через созданные взаимодействующими телами поля (гравитационные силы, сила тяжести).

3.1. **Гравитационные силы. Закон всемирного тяготения**

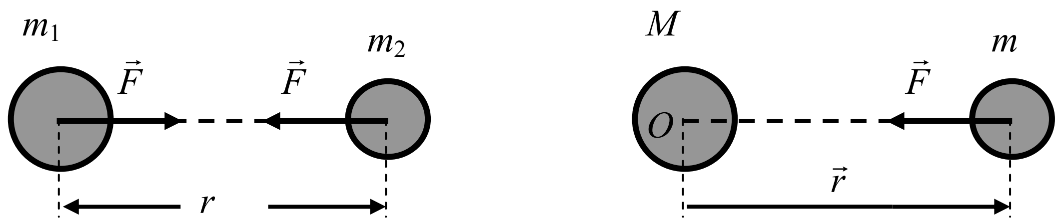
Взаимодействие, свойственное всем телам и проявляющееся в их взаимном притяжении друг к другу называют гравитационным. *Явление взаимного притяжения тел друг к другу называют гравитацией.* Гравитация – от латинского «gravitas» – тяжесть.

Гравитационное взаимодействие называется **тяготением**. Сила всемирного тяготения (гравитационная сила) – это сила взаимного притяжения. Она действует между всеми телами и не зависит от состояния тел. Гравитационное взаимодействие между телами осуществляется через гравитационное поле. Сила тяготения – это сила взаимодействия тел друг с другом на расстоянии. Ее еще называют силой **<u>дальнодействия</u>**.

<u>Закон всемирного тяготения</u> (открыт И. Ньютоном в 1667 году): **<u>сила, с которой два тела притягиваются друг к другу, пропорциональна произведению их масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и направлена по линии, соединяющей центры масс тел</u>**

$$\left|\vec{F}\right| = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где m_1, m_2 – массы взаимодействующих тел, r – расстояние между центрами взаимодействующих тел, γ – коэффициент пропорциональности, гравитационная постоянная (или постоянная всемирного тяготения).



Закон всемирного тяготения выполняется для тел, размеры которые малы по сравнению с расстоянием между телами (между материальными точками) или телами сферической формы.

Гравитационная постоянная численно равна силе притяжения между двумя телами массой 1 *кг* каждое, расположенных на расстоянии 1 *м* друг от друга. Если $m_1 = m_2 = 1$ *кг*, $r = 1$ *м*, то сила $\left|\vec{F}\right| = \gamma$.

Гравитационная постоянная в системе СИ равна: $\gamma = 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ *Н м²/кг²*.

Гравитационное взаимодействие между телами осуществляется через гравитационное поле. **Вокруг любого тела** массой M **существует гравитационное поле**. Гравитационное поле зависит от массы тела, создающего это поле. Чем больше масса тела, тем сильнее гравитационное поле.

Если в гравитационном поле тела массой M находится тело массой m, то сила притяжения тела массой m к телу массой M, равна $F = \gamma \frac{Mm}{r^2}$.

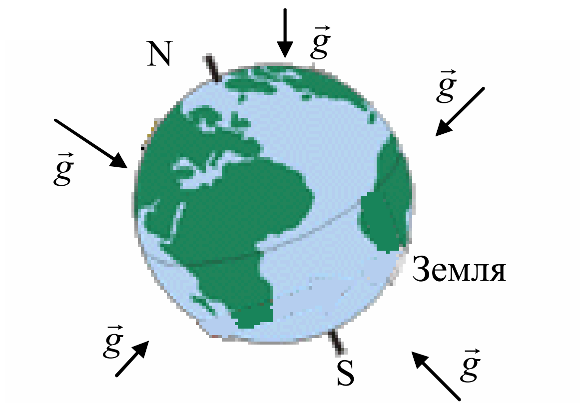
Сила, действующая на тело массой m, направлена против радиус-вектора $\vec{r}$, определяющего положение этого тела относительно тела, создающего поле. Тогда закон всемирного тяготения в векторной форме можно записать: $\vec{F} = -\gamma \frac{Mm}{r^3}\vec{r}$.

Силовой характеристикой гравитационного поля является напряженность поля $\vec{g}$.

Напряженность гравитационного поля в данной точке называется векторная физическая величина, которая численно равна силе, которая действует на материальную точку единичной массы.

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m}; \quad \left(\vec{g} \uparrow\uparrow \vec{F}\right).$$

Следовательно, на тело массой m, находящееся в данной точке гравитационного поля действует сила $\vec{F} = m\vec{g}$.



Модуль напряженности гравитационного поля тела массой M на расстоянии r от неё равен $g(r) = \gamma \frac{M}{r^2}$.

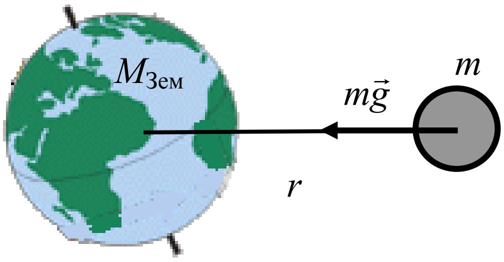
Вокруг Земли также существует гравитационное поле. Направление вектора напряженности гравитационного поля Земли показано на рисунке.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Напряженность гравитационного поля в данной точке пространства зависит от массы тела, создающего поле.

Вследствие притяжения к Земле на все тела действует сила. Эта сила называется силой тяжести.

Сила тяжести – это сила притяжения к Земле.



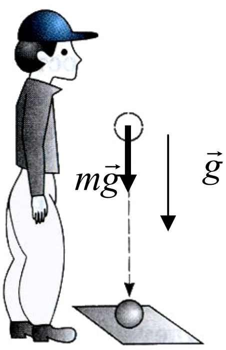
На тело массой m, находящееся на расстоянии r от центра Земли действует сила $\vec{F} = m\vec{g}$. Эта сила по закону всемирного тяготения равна $\vec{F} = -\gamma \frac{M_{Зем} m}{r^3} \vec{r}$, следовательно $\vec{g} = -\gamma \frac{M_{Зем}}{r^3} \vec{r}$.

Сила тяжести – векторная величина. Вектор силы тяжести $m\vec{g}$ направлен также как вектор напряженности гравитационного поля $\vec{g}$. Сила тяжести направлена к центру Земли.

Сила тяжести приложена к телу, значит, она сообщает телу ускорение, одинаковое для всех тел независимо от их массы, формы и размеров. По второму закону Ньютона $\vec{F} = m\vec{g} = m\vec{a}$, значит $\vec{a} = \vec{g}$.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Ускорение, которое сообщает сила тяжести телу $\vec{a} = \vec{g}$, не зависит от массы тела m и, следовательно, оно одинаково для всех тел.



Если тело находится на поверхности (около) Земли $r \approx R_{Зем}$, то ускорение, которое сообщает ему сила тяжести равно $a = g = \gamma \frac{M_{Зем}}{R_{Зем}^2}$.

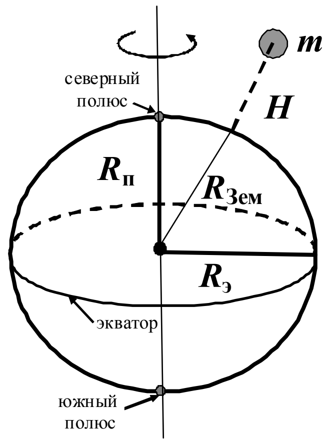
Мы знаем, что около поверхности Земли тела движутся с ускорением свободного падения, значит ускорение свободного падения $g = \gamma \frac{M_{Зем}}{R_{Зем}^2}$.

Отсюда видно, что **ускорение свободного падения g не зависит от массы тела m и, следовательно, оно одинаково для всех тел.**

Свободное падение – это равноускоренное

прямолинейное движение без начальной скорости $\vec{\upsilon}_0 = 0$. Вектор ускорения свободного падения $\vec{g}$ направлен к центру Земли.

Если тело находится далеко от Земли (на высоте H над поверхностью Земли), то сила тяжести равна $F = \gamma \dfrac{mM_{Зем}}{(R_{Зем} + H)^2}$, где H – расстояние от тела до поверхности Земли (высота над поверхностью Земли).



Так как сила F – это сила тяжести данного тела на высоте H, то $mg_H = \gamma \dfrac{mM_{Зем}}{(R_{Зем} + H)^2}$, отсюда $g_H = \gamma \dfrac{M_{Зем}}{(R_{Зем} + H)^2}$.

Ускорение свободного падения изменяется при удалении от поверхности Земли. Так, при подъеме на высоту 300 *км* ускорение свободного падения уменьшится на 1 *м/с*^{2}.

Вращение Земли вокруг своей оси приводит к тому, что ускорение свободного падения в различных местах земного шара различно (радиус Земли на экваторе $R_Э$ больше, чем на полюсе $R_П$). Поэтому ускорение свободного падения, измеренное у полюсов Земли равно 9,83 *м/с*^{2}, на экваторе =9,78 *м/с*^{2}.

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Слушайте, читайте, повторяйте.*

Тяготение; всемирное тяготение; закон всемирного тяготения; сила всемирного тяготения; постоянная всемирного тяготения.

Притяжение; сила притяжения; сила притяжения к Земле; притягивать; притягиваться; притягиваться друг к другу; тела притягиваются друг к другу; тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению их масс.

Гравитация; гравитационный; гравитационная сила; гравитационная постоянная; гравитационная постоянная численно равна.

Тяжесть; сила тяжести; полюс; экватор; ускорение свободного падения на полюсе; ускорение свободного падения на экваторе.

<u>Упражнение 2.</u> *Решите задачи.*

1. Как изменится сила притяжения между телами, если расстояние между ними увеличить в 2 раза?

2. Два маленьких шара одинаковой массы притягиваются друг к другу с силой $2 \cdot 10^{-8}\,H$, расстояние между шарами $10\,м$. Чему равна масса каждого шара?

3. Радиус Марса равен 0,53 радиуса Земли, а его масса равна 0,11 массы Земли. Найти ускорение свободного падения на Марсе, если ускорение свободного падения на Земле $g = 9{,}8$ *м/с*^{2}.

4. Масса Земли $\approx 6 \cdot 10^{24}$ *кг*, масса Луны $\approx 7{,}3 \cdot 10^{22}$ *кг*, расстояние между их центрами 384000 *км*. Найдите силу притяжения между Землей и Луной.

5. Найдите ускорение свободного падения на высоте, равной половине радиуса Земли. Масса Земли $\approx 6 \cdot 10^{24}$ *кг,* радиус Земли $\approx 6{,}4 \cdot 10^{6}$ *м.*

6. Средняя плотность Венеры 4900 *кг/м*^{3}, её радиус 6200 *км*. Найдите ускорение свободного падения на Венере.

7. Найдите напряженность гравитационного поля Земли на высоте 1000 *км* над поверхностью Земли.

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. Взаимодействие, свойственное всем телам и проявляющееся в их взаимном притяжении друг к другу называют **гравитационным.** *Явление взаимного притяжения тел друг к другу называют гравитацией.*
2. **<u>Закон всемирного тяготения</u>** (открыт И. Ньютоном в 1667 г.):

сила, с которой два тела притягиваются друг к другу, пропорциональна произведению их масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и направлена по линии, соединяющей центры масс тел

$$\left|\vec{F}\right| = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где m_1, m_2 – массы взаимодействующих тел, r – расстояние между центрами взаимодействующих тел, γ – коэффициент пропорциональности, гравитационная постоянная (или постоянная всемирного тяготения).

3. Закон всемирного тяготения выполняется для тел, размеры которые малы по сравнению с расстоянием между телами (между материальными точками) или телами сферической формы.
4. Гравитационное взаимодействие между телами осуществляется через гравитационное поле. **Вокруг любого тела** массой M **существует гравитационное поле**. Гравитационное поле зависит от массы тела, создающего это поле. Чем больше масса тела, тем сильнее гравитационное поле.
5. Силовой характеристикой гравитационного поля является напряженность поля $\vec{g}$.

   Напряженность гравитационного поля в данной точке называется векторная физическая величина, численно равная силе, которая действует на материальную точку единичной массы.

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m}; \quad \left(\vec{g} \uparrow\uparrow \vec{F}\right).$$

6. **<u>Сила тяжести – это сила притяжения к Земле</u>**.

3.2. **Силы упругости**

Новые слова и словосочетания

упругость	упругие силы
сила упругости	сжатие
коэффициент упругости	напряжение
удлинение	растяжение
жесткость	пружина
опора	подвес
нить	упругий
пластический	изгиб
кручение	сдвиг
связь	

Если на тело действует сила, то тело изменяет свою скорость или деформируется. **Деформация – это изменение формы, размеров и объема тела в результате действия силы.**

Деформации могут быть упругими и пластическими.

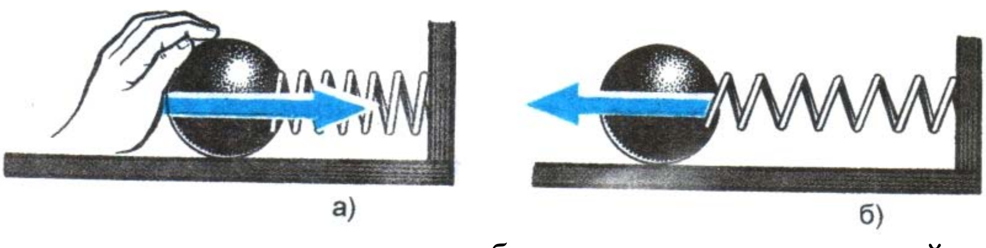
Упругая деформация – это такая деформация, при которой после прекращения действия силы, тело принимает первоначальные размеры и форму.

Пластическая (неупругая) деформация – это такая деформация, в результате которой тело сохраняет новую форму или размеры после прекращения действия силы.

Способность тел к упругим или неупругим деформациям зависит от природы вещества, из которого состоит тело, от условий, в которых оно находится.

Как упругие, так и пластические деформации бывают разных видов. **Виды деформации**: сжатие, растяжение, сдвиг, изгиб, кручение.

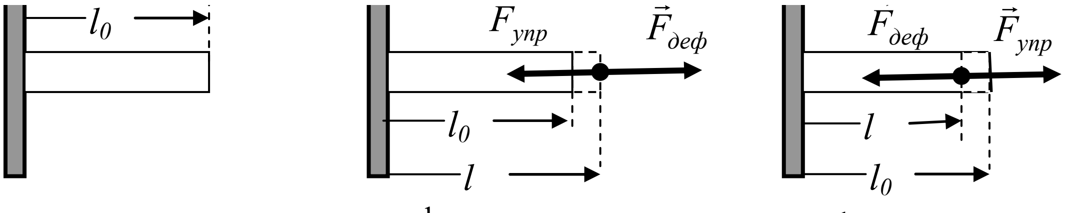
При упругих деформациях в теле возникают **силы упругости,** которые действуют только в процессе деформации.



Возникновение сил упругости обусловлено тем, что под действием деформирующей силы изменяются расстояния между атомами (молекулами), из которых состоит тело. В результате этого изменяются силы межмолекулярного взаимодействия (притяжения или отталкивания), которые препятствуют деформации. Суммарное действие этих сил и создает силу упругости.

Таким образом, силой упругости называют силу, возникающую в теле при его деформации.

При упругой деформации в теле возникает сила упругости $\vec{F}_{упр}$, которая равна по модулю и противоположна по направлению деформирующей силе $\vec{F}_{деф}$.

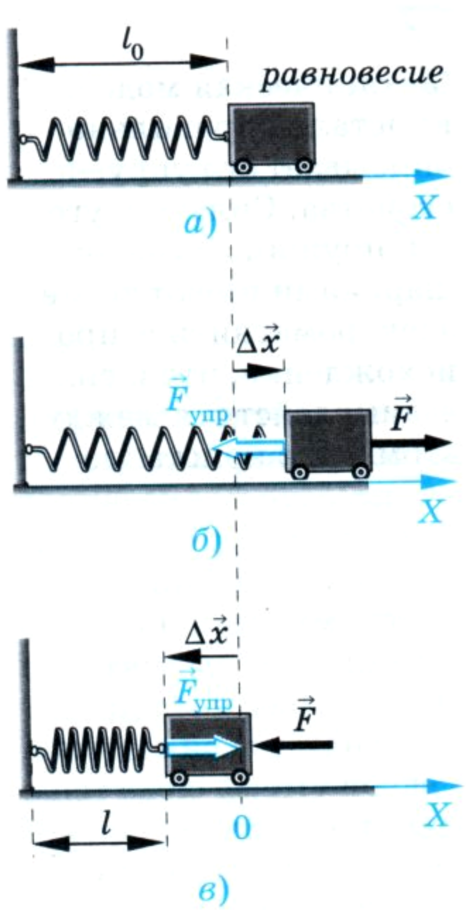


начальное состояние тела

деформация растяжения

деформация сжатия

$$\vec{F}_{упр} = -\vec{F}_{деф}$$



Опыт показывает, что для упругих малых деформаций между силой упругости и деформацией существует линейная связь. Эту зависимость экспериментально установил английский физик Р. Гук.

Закон Гука: **<u>сила упругости, возникающая при упругой деформации, прямо пропорциональна деформации тела, взятой со знаком минус</u>**

$$\vec{F}_{упр} = -k\Delta\vec{x},$$

где $\Delta\vec{x}$ – деформация, k – коэффициент упругости (жесткость).

Знак минус в законе Гука свидетельствует о том, что сила упругости всегда направлена в сторону уменьшения деформации.

Коэффициент упругости (жесткость) численно равна силе упругости при единичной деформации. Единица измерения жесткости: *Н/м*.

Деформация пружины

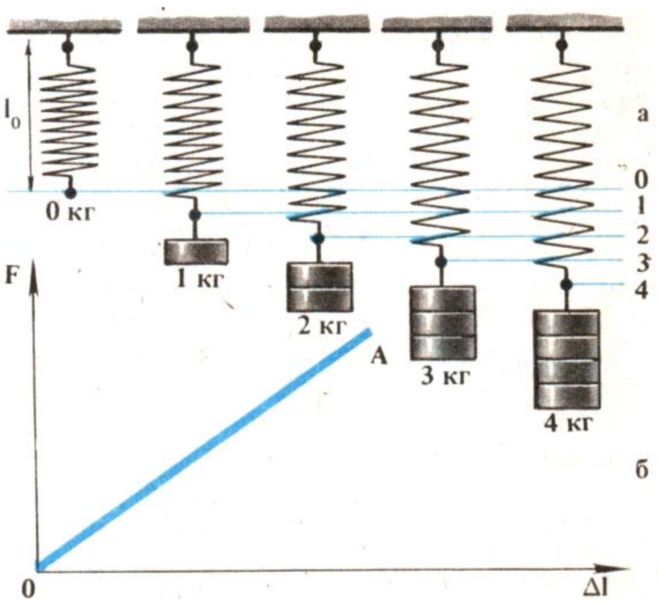
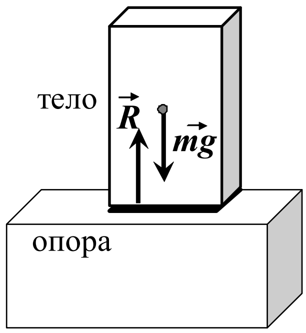


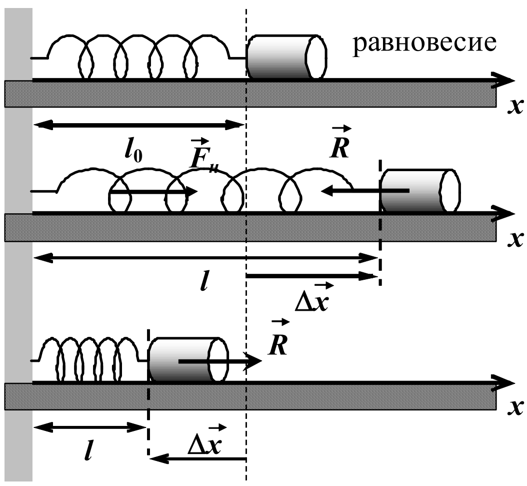
График зависимости между силой, действующей на пружину и удлинением (деформацией) $|\Delta\vec{x}| = \Delta l$ представлен на рисунке.

Силы реакции

Очень часто движение тела в пространстве ограничено другими телами. В этом случае говорят, что **на тело наложены связи.** Например, движение тела, прикрепленного к пружине, нити, находящееся на столе, опоре. Наличие связи приводит к появлению сил, действующих на тело со стороны связи. Эти силы называют **силами реакции связи.**



Действие тела на опору (например, чайник давит на стол, автомобиль на дорогу) приводит к ее сжатию, деформации. При этом со стороны опоры возникает сила – сила упругости (сила реакции связи, опоры).



Сила реакции опоры $\vec{R}$ – **сила упругости, действующая на тело со стороны опоры перпендикулярно поверхности**.

При растяжении пружины, резинового шнура, нити возникает упругая сила, препятствующая растяжению.

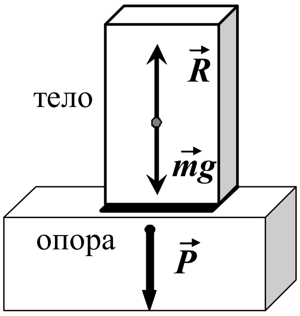
Сила реакции нити (пружины) $\vec{R}$ – **сила, действующая на**

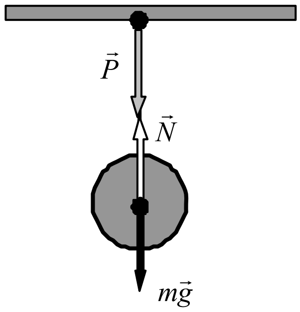
<u>тело со стороны деформированной нити или пружины</u>. Сила реакции нити (пружины) – это сила, действующая со стороны деформированного тела (пружины, нити) на соприкасающееся с ним тело и направленная в сторону, противоположную деформации.

Вес тела

Вследствие действия на тело силы тяжести оно давит на подставку (опору) или растягивает нить, на которой оно висит.

<u>Вес тела – это сила, с которой тело, покоящееся относительно Земли, давит на горизонтальную опору или растягивает вертикальную нить (подвес)</u>.





Сила тяжести и вес – разные силы. Они приложены к разным телам: вес $\vec{P}$ приложен к опоре (подставке) или подвесу (нити, пружине), а сила тяжести $m\vec{g}$ – к телу. Поэтому **<u>сила тяжести и вес не уравновешивают друг друга.</u>**

Рассмотрим, при каких условиях вес тела равен силе тяжести.

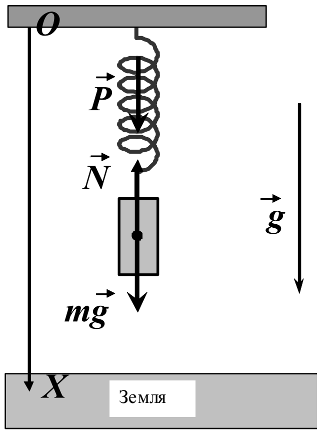
Пример 1. Тело находится на столе (стол – опора) в состоянии покоя. Тело взаимодействует с Землей, на тело действует сила тяжести $m\vec{g}$ со стороны Земли. Тело взаимодействует со столом, со стороны стола на тело действует сила реакции стола $\vec{R}$. По третьему закону Ньютона на стол действует равная и противоположно направленная сила – вес тела $\vec{P}$. Вес тела приложен к столу ($\vec{R} = -\vec{P}$).

Так как тело находится в покое, то результирующая сила, действующая на тело равна нулю, то есть $m\vec{g} + \vec{R} = 0$ или $m\vec{g} = -\vec{R}$. Таким образом, **<u>в случае покоя тела вес тела</u>** P **<u>численно равен силе тяжести</u>** mg.

Пример 2. Тело подвешено на нити. Расставим силы, действующие на тело: сила тяжести $m\vec{g}$ вследствие взаимодействия с Землей; сила реакции нити $\vec{N}$. По третьему закону Ньютона на нить действует равная и противоположно направленная сила – вес тела $\vec{P}$, которая растягивает нить. Вес тела приложен к нити ($\vec{N} = -\vec{P}$).

Если тело, подвешенное на нити, покоится то результирующая сила, действующая на тело равна нулю, то есть $m\vec{g} + \vec{N} = 0$. Тогда $m\vec{g} = -\vec{N}$ и $mg = P$. **В случае покоя тела вес тела** P **численно равен силе тяжести** mg.

При движении тела относительно Земли вес тела и сила тяжести не всегда одинаковы. Покажем это на примере движения тела, подвешенного на пружине.

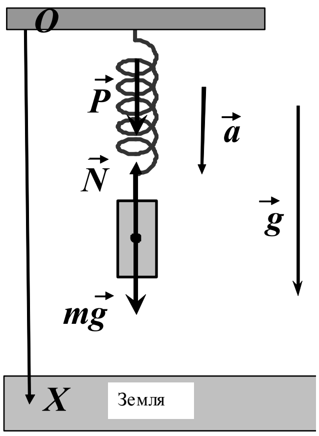


1. Тело неподвижно относительно Земли, $\vec{a} = 0$. Укажем силы, действующие на тело: $m\vec{g}$ – сила тяжести; $\vec{N}$ – сила реакции пружины. Деформация пружины – x_0.

По второму закону Ньютона в проекции на ось *OX*, $mg - N = 0$, отсюда $N = mg$. По третьему закону Ньютона, сила реакции пружины численно равна силе, с которой тело деформирует пружину – весу тела P, то есть $N = P$.

Значит, вес тела P **численно равен силе тяжести** mg**, когда тело покоится или движется равномерно и прямолинейно вверх или вниз.**

2. Тело движется вниз с ускорением $\vec{a}$ **относительно Земли.**



По второму закону Ньютона в проекции на ось OX уравнение движения можно записать: $mg - N = ma$. Отсюда

$$N = m(g - a).$$

По третьему закону Ньютона, сила реакции пружины численно равна силе, с которой тело деформирует пружину – весу тела P. Так как $N = P$, то $P = m(g - a)$, ***вес тела меньше силы тяжести*** $P < mg$. Деформация пружины x меньше, чем x_0 (пружина немного сожмется).

Вес тела, опускающегося вниз с ускорением или поднимающегося равнозамедленно вверх, уменьшается и становится меньше силы тяжести.

Если тело будет свободно падать, то $a = g$. Тогда по второму закону Ньютона в проекции на ось OX уравнение движения можно записать: $mg - N = ma$. Отсюда

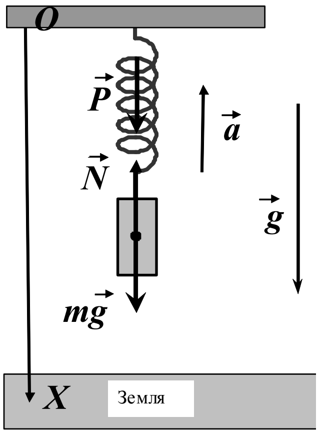
$$N = m(g - a).$$

Так как $N = P$, а $a = g$, то $P = m(g - a)$=0.

Сила реакции и вес тела ***равны нулю*** $N = 0$, $P = 0$. Деформация пружины $x = 0$. Такое состояние (когда вес тела $P = 0$) называется состоянием ***невесомости***. **Невесомость это такое состояние, при котором тело не давит на опору и не растягивает нить.**

Следовательно, вес свободно падающего тела равен нулю.

3. Тело движется вверх с ускорением $\vec{a}$ относительно Земли.



По второму закону Ньютона в проекции на ось OX: $N - mg = ma$. Отсюда $N = m(g + a)$. Пружина растягивается, так как $N > mg$.

Так как $N = P$, то $P = m(g + a)$.

Вес тела, поднимающегося с ускорением или опускающегося равнозамедленно, увеличивается и становится больше силы тяжести. Такое состояние называют перегрузкой.

При любых значениях a ***вес тела больше силы тяжести*** (состояние перегрузки). Перегрузку можно характеризовать числом, показывающим во сколько раз вес тела больше силы тяжести, то есть

$$n = \frac{P}{mg} = \frac{a + g}{g}.$$

Максимальная перегрузка, которую может выдержать тренированный космонавт, равна 8 – 10. Пассажиры самолета при взлете испытывают перегрузку, равную 1,5.

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Слушайте, читайте, повторяйте.*

Деформировать; деформироваться; тело деформируется; деформация; величина деформации; малая деформация; упругая деформация; пластическая деформация; при деформации тела возникает сила.

Исчезать; исчезает; деформация исчезает.

Упругость; сила упругости; коэффициент упругости.

Прекращение; прекращение действия; прекращение действия силы; после прекращения действия силы; после прекращения действия силы упругая деформация исчезает.

Пружина; деформированная пружина; недеформированная пружина; растянутая пружина; нерастянутая пружина; сжатая пружина,

Вес тела; горизонтальная опора; тело действует на опору; тело давит на опору; тело давит на горизонтальную опору; тело растягивает нить; тело растягивает вертикальную нить; сила реакции опоры; сила реакции нити.

Висеть; тело висит на нити; подвесить тело; тело подвешено на нити; подвес; тело действует на подвес; сила натяжения нити; сила натяжения подвеса.

Перегрузка; состояние перегрузки; коэффициент перегрузки.

Невесомость; состояние невесомости; в состоянии невесомости.

Упражнение 2. *Решите задачи.*

1. Чтобы деформировать пружину на 20 см, нужна сила 80 Н. Чему равна жесткость пружины?

2. Чтобы деформировать пружину на 5 см, необходима сила 20 Н. Какую силу нужно приложить, чтобы деформировать пружину на 12 см?

3. Коэффициент упругости пружины равен 49 Н/м. К пружине подвесили тело и она удлинилась на 4 см. Найдите массу тела.

4. Тело массой 50 кг равноускоренно поднимают вверх при помощи веревки в течение 2 с на высоту 10 м. Найдите силу натяжения веревки.

5. На полу лифта лежит груз массой 120 кг. Найдите вес этого груза, если:

а) лифт поднимается вертикально вверх с ускорением 0,6 м/с^2;

б) лифт движется равномерно;

в) лифт опускается вертикально вниз с ускорением 0,5 м/с^2;

г) лифт свободно падает.

6. Космический корабль начинает двигаться с поверхности Земли вертикально вверх с ускорением 15 м/с^2. Чему равен вес космонавта при старте, если масса его равна 80 кг? Какую перегрузку испытывает космонавт?

7. Лифт движется вниз ускоренно с ускорением $a = 2g$. Тело, находящееся в лифте имеет массу 50 кг. Что будет с телом в таком лифте? С какой силой будет давить тело на потолок лифта?

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. **Деформация –** это изменение формы, размеров и объема тела в результате действия силы.
2. **Упругая деформация** – это такая деформация, при которой после прекращения действия силы, тело принимает первоначальные размеры и форму.

   Пластическая (неупругая) деформация – это такая деформация, в результате которой тело сохраняет новую форму или размеры после прекращения действия силы.
3. **Закон Гука**: сила упругости, возникающая при упругой деформации, прямо пропорциональна деформации тела, взятой со знаком минус

   $$\vec{F}_{упр} = -k\Delta\vec{x},$$

   где $\Delta\vec{x}$ – деформация, k – коэффициент упругости (жесткость).
4. **<u>Сила реакции опоры</u>** $\vec{R}$ – сила упругости, действующая на тело со стороны опоры перпендикулярно поверхности**.**
5. **<u>Вес тела</u>** – это сила, с которой тело, покоящееся относительно Земли тело давит на горизонтальную опору или растягивает вертикальную нить (подвес)**.**
6. **<u>Сила реакции нити (пружины)</u>** $\vec{R}$ – сила, действующая на тело со стороны деформированной нити или пружины**.**

3.3. **Силы трения**

Новые слова и словосочетания

трение	трение скольжения
трение качения	соприкасаться
трение покоя	соприкосновение
трущиеся поверхности	давление
скольжение	качение
коэффициент трения	катиться
торможение	смазка
неровность	

При соприкосновении одного тела с другим возникает взаимодействие, которое препятствует их относительному перемещению. Это взаимодействие называется трением. Сила, характеризующая это взаимодействие, называется силой трения. Сила трения зависит от состояния соприкасающихся поверхностей.

Силы трения является проявлением электромагнитных взаимодействий между телами (имеют электромагнитную природу). Причин возникновения сил трения можно указать две:

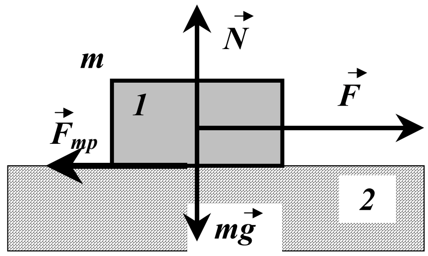
1. Механическая. Каждая поверхность всегда имеет неровности. При попытке сдвинуть тела относительно друг друга неровности поверхностей начинают деформироваться и в них возникают силы упругости, мешающие движению.
2. Электромагнитная. Трение обусловлено образованием и разрывом молекулярных связей в месте соприкосновения тел.

Сила трения – **сила, возникающая при соприкосновении поверхностей тел, препятствующая их относительному перемещению, направленная вдоль поверхности соприкасающихся тел**. Сила трения направлена противоположно относительной скорости перемещения тел. Сила трения не зависит от площади соприкасающихся поверхностей.

При соприкосновении тел возможны три вида трения: трение покоя, трение скольжения и трение качения.

Трение покоя

Сила трения покоя – это сила, которая препятствует началу движения тела. Попробуем сдвинуть тело 1 массой m с места, приложив к нему силу $\vec{F}$. Сила $\vec{F}$ направлена вдоль поверхности соприкосновения тел.



1. Если будем действовать с силой $\vec{F}$, но тело останется в покое ($|\vec{v}| = 0$), значит, вдоль поверхности соприкосновения тел возникает сила, препятствующая движению. **Эта сила – сила трения покоя**. Сила трения покоя – это сила, которая мешает нам сдвинуть тело. Для силы трения покоя в любой момент времени выполняется условие $\vec{F}_{тр\ покоя} = -\vec{F}$.

2. При увеличении внешней силы $\vec{F}$ сила трения покоя возрастает вместе с ней. Так как тело остается в покое $|\vec{v}| = 0$, это означает, что на тело 1 действует сила, равная по модулю внешней силе, но противоположного направления $\vec{F}_{тр\ покоя} = -\vec{F}$.

3. Если внешнюю силу $\vec{F}$ еще увеличить, то начинается относительное движение соприкасающихся тел. Таким образом, сила трения покоя изменяется от 0 до некоторого максимального значения $(F_{тр\ покоя})_{\max}$. В момент начала движения $(\vec{F}_{тр\ покоя})_{\max} = -\vec{F}$. **Говорят, тело начинает скользить по поверхности другого тела.**

Значит, когда сила $(F_{тр\ покоя})_{\max} = F$, тело начинает скользить по поверхности другого тела.

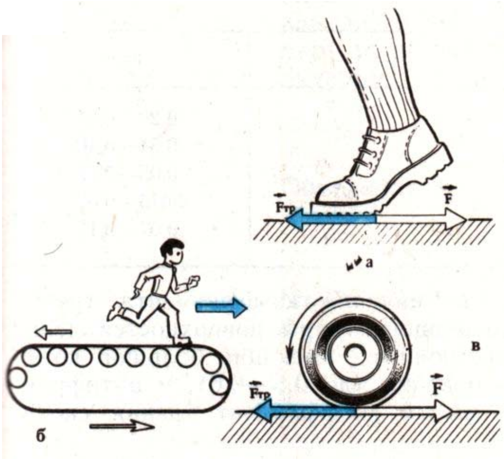
4. Посмотрим, от чего зависит максимальная сила трения покоя.

Для этого положим на тело 1 еще одно такое же тело, то есть увеличим массу тела 1 в 2 раза. Чтобы теперь сдвинуть тело 1 (массой $2m$), нужно силу $\vec{F}$ тоже увеличить в 2 раза. С увеличением массы тела 1 в 2 раза увеличилась в 2 раза сила нормального давления тела 1 на тело 2. Значит, с увеличением силы нормального давления тела 1 на тело 2 увеличилась пропорционально и сила трения покоя. Сила нормального давления действует перпендикулярно поверхности контакта двух тел.

По третьему закону Ньютона сила нормального давления равна по модулю силе реакции опоры N. Тогда максимальная сила трения покоя пропорциональна силе нормального давления

$$(F_{тр\ покоя})_{\max} = \mu_n N,$$

где μ_n – коэффициент трения покоя. Коэффициент трения покоя зависит от состояния поверхности соприкасающихся тел.



Таким образом, сила трения покоя препятствует началу движения, удерживает соприкасающиеся тела в относительном покое.

Однако можно рассмотреть случаи, когда сила трения покоя служит причиной ускоренного движения тела.

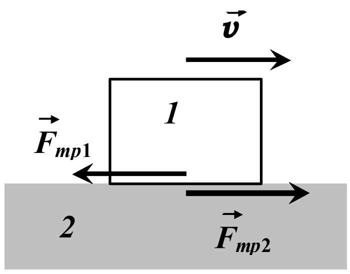
Пример: при ходьбе сила трения $\vec{F}_{тр}$ действует на обувь и сообщает человеку ускорение. Ботинок не скользит по дороге, значит, трение между ботинком и дорогой – трение покоя. Сила $\vec{F}$ по третьему закону Ньютона приложена к опоре (дороге). Рассмотрите внимательно рисунок. Что можно сказать о движении других тел, изображенных на нем?

В жидкостях и газах нет силы трения покоя. Это означает, что любая сила $\vec{F}$, приложенная к телу, в жидкости или газе сообщает ему ускорение.

Трение скольжения

Трение скольжения возникает при относительном перемещении соприкасающихся тел. **Сила трения скольжения – это сила трения, которая возникает, когда одно тело скользит по поверхности другого. Она всегда направлена против движения. Сила трения направлена параллельно поверхности соприкосновения тел.**

Как выяснили ранее, если сила $\vec{F}$ немного больше максимальной силы трения покоя $\left(F_{тр\ покоя}\right)_{\max}$, то тело 1 начинает скользить по поверхности тела 2. В этом случае на тело действует сила трения – сила трения скольжения.



Сила трения скольжения зависит от силы нормального давления $\vec{N}$ тела 1 на тело 2, от материала соприкасающихся (трущихся) тел и состояния их поверхностей. Сила нормального давления всегда направлена перпендикулярно поверхности движения. Модуль силы трения скольжения равен:

$$F_{тр\ скол} \cong \left(F_{тр\ покоя}\right)_{\max} = \mu N,$$

где μ – коэффициент силы трения скольжения, N – сила нормального давления.

Если поверхность горизонтальная, то сила нормального давления равна весу тела, а вес в этом случае равен силе тяжести, тогда $F_{тр\ скол} = \mu N = \mu mg$.

Коэффициент трения скольжения характеризует не тело, которое скользит по поверхности другого тела, а состояние поверхностей соприкасающихся тел. μ всегда меньше единицы.

Сила трения скольжения направлена всегда противоположно относительной скорости движения соприкасающихся тел, и при малых относительных скоростях не зависит от модуля относительной скорости тел.

Трение между соприкасающимися твердыми телами (без смазки) называется **сухим трением.** Если поверхности смазать, то коэффициент трения существенно уменьшится.

При движении твердого тела в жидкости или газе или при движении одного слоя жидкости относительно другого также возникает сила трения, тормозящая движение – **сила жидкого трения или сила сопротивления.**

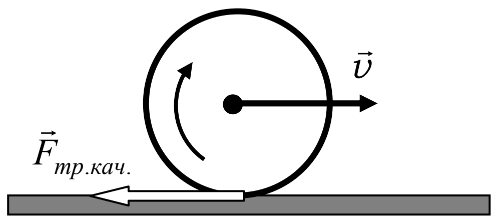
Сила сопротивления направлена параллельно поверхности соприкосновения твердого тела с жидкостью или газом в сторону, противоположную скорости тела относительно среды.

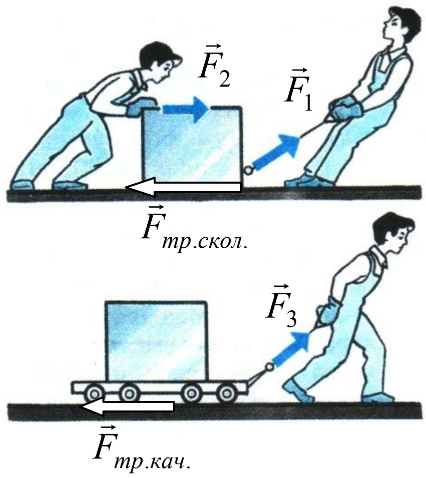
В отличие от силы сухого трения сила сопротивления зависит не только от направления, но и от модуля относительной скорости. При небольших скоростях сила сопротивления пропорциональна скорости, то есть $F_{сопр} = k_1 \upsilon$, где k_1 – коэффициент сопротивления, зависящий от формы, размеров, состояния поверхности тела и свойств жидкости или газа. Коэффициент сопротивления k_1 определяется экспериментально.

При больших скоростях относительного движения сила сопротивления пропорциональна квадрату скорости $F_{сопр} = k_2 \upsilon^2$, где k_2 – коэффициент сопротивления (определяется опытным путем).

Трение качения

Сила трения качения появляется, когда одно тело катится по поверхности другого. Сила трения качения меньше, чем сила трения скольжения при одинаковых условиях.





Сила $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$, затрачиваемая для скольжения тела, гораздо больше силы $\vec{F}_3$, необходимой для того, чтобы его катить. Когда колесо катится (без скольжения) по поверхности, то площадь соприкосновения колеса и поверхности минимальна. А это означает, что нужно меньшее усилие, чтобы сдвинуть его с места.

Сила трения качения пропорциональна силе реакции опоры

$$F_{тр\ кач} = \mu_{кач}\frac{N}{R},$$

где $\mu_{кач}$ – коэффициент трения качения, R – радиус колеса. Коэффициент трения качения много меньше коэффициента трения скольжения $\mu_{кач} << \mu$.

Силы трения играют важную роль в жизни и технике. Трение может быть полезным и вредным. **Приведите примеры полезного и вредного действия сил трения.**

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Слушайте, читайте, повторяйте.*

Сила трения; трение; внешнее трение; внутреннее трение; трение покоя; трение скольжения; трение качения.

Поверхность; поверхность контакта; поверхность контакта двух тел; обработка поверхности; чистота обработки поверхности; шероховатость поверхности; шероховатые поверхности.

Препятствовать; препятствует; препятствует началу движения; сила трения покоя препятствует началу движения.

Скользить; скольжение; при скольжении; при скольжении одного тела по поверхности другого тела; коэффициент трения скольжения.

Качение; трение качения; при качении; при качении одного тела по поверхности другого.

<u>Упражнение 2.</u> *Решите задачи.*

1. Тело массой 0,6 кг равномерно тянут по горизонтальной поверхности при помощи пружины. При этом пружина удлинилась на 3 см. Коэффициент трения между телом и поверхностью равен 0,2. Найдите коэффициент упругости пружины.

2. Автомобиль массой 10^4 кг движется по горизонтальной дороге равномерно. Найти силу тяги автомобиля, если коэффициент трения равен 0,03.

3. Поезд массой $2 \cdot 10^6$ кг отходит от станции. Какую скорость будет иметь поезд на расстоянии 1 км от станции, если сила тяги локомотива поезда равна $3 \cdot 10^5$ Н? За какое время от начала движения поезд достигнет этой скорости? Коэффициент трения равен 0,005.

4. Автобус движется по горизонтальной дороге со скоростью 15 м/с. Перед остановкой водитель выключает двигатель. Через сколько времени после выключения двигателя автобус остановится, если коэффициент трения равен 0,5? Какой путь пройдет автобус с выключенным двигателем?

5. Тело массой 100 кг движется по горизонтальной поверхности с ускорением 1 м/с^2 под действием силы 250 Н, направленной под углом 30° к горизонту. Найдите коэффициент трения.

6. Тело массой 1кг лежит на горизонтальной поверхности. Сверху на нём лежит такое же тело массой 1 кг. Какую силу надо приложить, чтобы вытянуть нижнее тело из-под верхнего? Коэффициент трения на обеих поверхностях нижнего тела равен 0,3.

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. **Сила трения** – сила, возникающая при соприкосновении поверхностей тел, препятствующая их относительному перемещению, направленная вдоль поверхности соприкасающихся тел. Сила трения направлена противоположно относительной скорости перемещения тел. Сила трения не зависит от площади соприкасающихся поверхностей.
2. Сила трения покоя препятствует началу движения, удерживает соприкасающиеся тела в относительном покое.
3. Максимальная сила трения покоя пропорциональна силе нормального давления: $\left(F_{тр\ покоя}\right)_{\max} = \mu_n N$, где μ_n – коэффициент трения покоя. Коэффициент трения покоя зависит от состояния поверхности соприкасающихся тел.
4. **Сила трения скольжения –** это сила трения, которая возникает, когда одно тело скользит по поверхности другого. Она всегда направлена против движения. Сила трения направлена параллельно поверхности соприкосновения тел.
5. Модуль силы трения скольжения равен: $F_{тр\ скол} \cong \left(F_{тр\ покоя}\right)_{\max} = \mu N$, где μ – коэффициент силы трения скольжения, N – сила нормального давления. Если поверхность горизонтальная, то сила нормального давления равна весу тела, а вес в этом случае равен силе тяжести, тогда $F_{тр\ скол} = \mu N = \mu mg$.
6. Сила трения качения появляется, когда одно тело катится по поверхности другого.
7. Сила трения качения пропорциональна силе реакции опоры: $F_{тр\ кач} = \mu_{кач}\dfrac{N}{R}$, где $\mu_{кач}$ – коэффициент трения качения, R – радиус колеса. Коэффициент трения качения много меньше коэффициента трения скольжения $\mu_{кач} << \mu$.

ТЕМА 4. **ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНОВ НЬЮТОНА К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ**
(для самостоятельного изучения)

Новые слова и словосочетания

алгоритм	анализ
условие задачи	расставить
система тел	

Очень часто при решении задач приходится рассматривать движение одного или нескольких тел, которые связаны друг с другом (представляют собой систему тел).

Для решения любой задачи можно предложить общий метод решения задач:

1. Проанализировать условие задачи. Выполнить рисунок. Определить характер движения тел. Выбрать инерциальную систему отсчета и систему координат.
2. Нарисовать и обозначить силы, действующие на каждое тело. Определить виды этих сил.
3. Записать уравнения движения для каждого тела в векторной форме. Перейти к записи уравнений движения в проекциях на оси координат выбранной системы отсчета.
4. Найти решение полученной системы уравнений.

Рассмотрим несколько примеров решения задач на применение законов Ньютона.

Движение одного тела

Задача 1. Тело массой *m* движется по горизонтальной поверхности под действием силы $\vec{F}$, направленной под углом *α* к горизонту. Найти ускорение тела, если коэффициент трения тела о поверхность равен *μ*.

Дано:

$\vec{F}$, m, α, μ

Найти: a – ?

Решение задачи:

На тело действуют: сила $\vec{F}$, сила тяжести $m\vec{g}$, сила реакции опоры $\vec{N}$, сила трения $\vec{F}_{тр}$. Запишем уравнение движения тела в векторной форме:

$$\vec{F} + m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{тр} = m\vec{a}\,.$$

Запишем уравнение движения в проекциях на оси координат OX и OY:

$$\text{на ось } OX: \quad F\cos\alpha - F_{тр} = ma$$

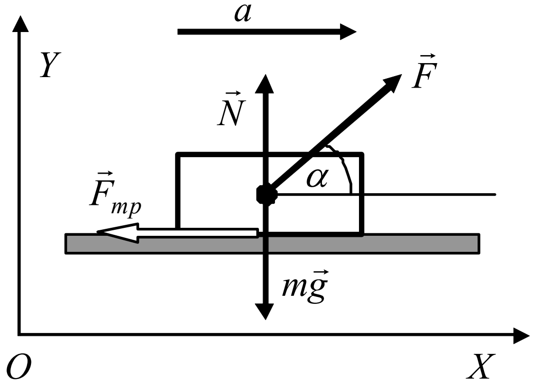
$$\text{на ось } OY: \quad F\sin\alpha - mg + N = 0$$

Решая систему уравнений, получим: $N = mg - F\sin\alpha$, так как $F_{тр} = \mu N$, то

$$F_{тр} = \mu(mg - F\sin\alpha).$$

Подставим значение силы трения в уравнение движения: $F\cos\alpha - \mu(mg - F\sin\alpha) = ma$, отсюда ускорение, с которым движется тело, равно:

$$a = \frac{F\cos\alpha - \mu(mg - F\sin\alpha)}{m}.$$



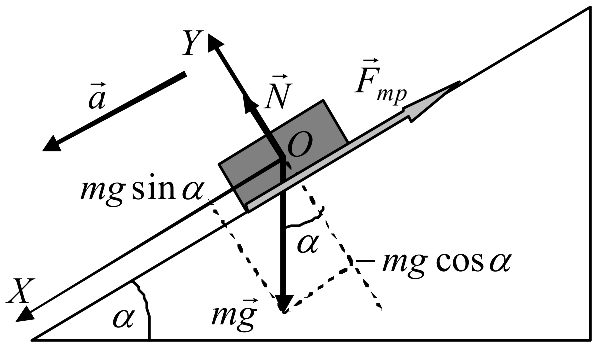
Ответ: $a = \dfrac{F\cos\alpha - \mu(mg - F\sin\alpha)}{m}$.

<u>Задача 2.</u> Тело массой *m* движется вниз по наклонной плоскости с углом наклона α. Коэффициент трения между телом и наклонной плоскостью *μ*. Определить ускорение, с которым движется тело.

Дано:
m, α, μ

Найти: *a–?*

Решение задачи:



На тело действует сила тяжести $m\vec{g}$, сила реакции опоры $\vec{N}$, сила трения $\vec{F}_{тр}$. Запишем уравнение движения тела в векторной форме: $m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{тр} = m\vec{a}$. Направим ось OX вдоль наклонной плоскости вниз, а ось OY перпендикулярно наклонной плоскости вверх.

Запишем уравнение движения в проекциях на оси OX и OY:

$$на \quad ось \quad OX: \quad mg\sin\alpha - F_{тр} = ma$$

$$на \quad ось \quad OY: \quad N - mg\cos\alpha = 0$$

Решая систему уравнений, найдем, что $N = mg\cos\alpha$, а $F_{тр} = \mu N = \mu mg\cos\alpha$. Подставим значение силы трения в уравнение движения, получим:

$$mg\sin\alpha - \mu mg\cos\alpha = ma\text{, отсюда } a = g\sin\alpha - \mu g\cos\alpha .$$

Проанализируем полученную формулу

$$a = g\sin\alpha - \mu g\cos\alpha = g(tg\alpha - \mu)$$

– тело движется вниз с ускорением, если $tg\alpha > \mu$. Если $tg\alpha = \mu$, то тело движется по наклонной плоскости равномерно, то есть с ускорением равным нулю.

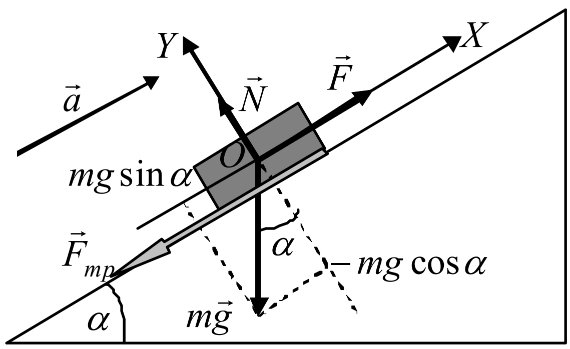
Ответ: $a = g\sin\alpha - \mu g\cos\alpha$.

<u>Задача 3.</u> Тело массой *m* движется вверх по наклонной плоскости с углом наклона α под действием силы $\vec{F}$. Коэффициент трения между телом и наклонной плоскостью *μ*. Определить ускорение, с которым движется тело.

Дано:
$\vec{F}$, *m*, α, μ

Найти: *a–?*

Решение задачи:



На тело действует сила тяжести $m\vec{g}$, сила реакции опоры $\vec{N}$, сила трения $\vec{F}_{тр}$, сила тяги $\vec{F}$. Запишем уравнение движения тела в векторной форме: $m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{тр} + \vec{F} = m\vec{a}$. Направим ось OX вдоль наклонной плоскости вверх, а ось OY перпендикулярно наклонной плоскости вверх.

Запишем уравнение движения в проекциях на оси OX и OY:

$$на \quad ось \quad OX: \quad F - mg\sin\alpha - F_{тр} = ma$$

$$на \quad ось \quad OY: \quad N - mg\cos\alpha = 0$$

Решая систему уравнений, найдем, что $N = mg\cos\alpha$, а $F_{тр} = \mu N = \mu mg\cos\alpha$. Подставим значение силы трения в уравнение движения, получим:

$$F - mg\sin\alpha - \mu mg\cos\alpha = ma, \text{ отсюда } a = \frac{1}{m}(F - mg\sin\alpha - \mu mg\cos\alpha).$$

Проанализируем полученную формулу. Чтобы тело двигалось вверх с ускорением $a > 0$, необходимо, чтобы выполнялось условие $F > mg\sin\alpha + \mu mg\cos\alpha$. Если $F = mg\sin\alpha + \mu mg\cos\alpha$, то тело движется с ускорением $a = 0$ (равномерно).

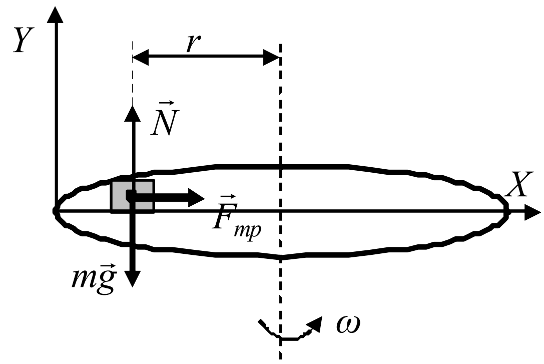
Ответ: $a = \frac{1}{m}(F - mg\sin\alpha - \mu mg\cos\alpha)$.

Задача 4. Диск вращается в горизонтальной плоскости с постоянной угловой скоростью *ω*. На диске лежит тело на расстоянии *r* от оси вращения. Найти максимальную угловую скорость *ω₀*, при которой тело ещё находится в покое относительно диска. Коэффициент трения между телом и диском *μ*.

Дано:
ω, μ, r

Найти: $\boldsymbol{\omega_0}$ = ?

Решение задачи:



На тело действуют сила тяжести $m\vec{g}$. сила реакции опоры $\vec{N}$ и сила трения $\vec{F}_{тр}$, которая сообщает телу нормальное ускорение $\vec{a}_n$. Выберем прямоугольную систему координат XOY и запишем уравнение движения тела в векторной форме: $\vec{F}_{тр} + m\vec{g} + \vec{N} = m\vec{a}_n$. В проекциях на оси координат:

на ось OX: $F_{тр} = ma_n = \frac{m\upsilon^2}{r} = m\omega^2 r$,

на ось OY: $N - mg = 0 \implies N = mg$.

При изменении ω от 0 до ω_0 сила трения покоя изменяется от 0 до F_0, где F_0 – максимальная сила трения покоя.

Если сила трения равна максимальной силе трения покоя F_0, то тело находится в покое относительно диска.

Так как $F_0 = F_{тр} = \mu N$, а то $F_{тр} = \mu N = \mu mg$. Или $\mu mg = m\omega_0^2 r$.

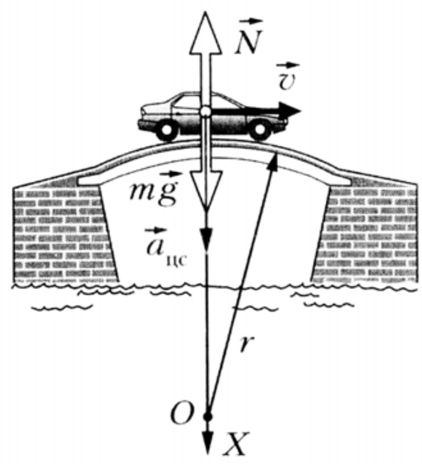
Отсюда $\omega_0 = \sqrt{\dfrac{\mu g}{r}}$.

Ответ: $\omega_0 = \sqrt{\dfrac{\mu g}{r}}$.

<u>Задача 5.</u> Автомобиль массой *m* равномерно движется по выпуклому мосту. Радиус кривизны моста *r*. Скорость автомобиля υ. Определить силу давления автомобиля на середину моста.

Дано:
m, r, υ
$P = ?$

Решение задачи:



Сделаем рисунок, расставим силы, действующие на автомобиль. На автомобиль действуют сила тяжести $m\vec{g}$ и сила реакции моста $\vec{N}$. Запишем уравнение движения автомобиля в векторной форме: $m\vec{g} + \vec{N} = m\vec{a}_n$. В проекциях на ось *OX*:

$$mg - N = ma_n = \frac{m\upsilon^2}{r}.$$

Сила, с которой мост действует на автомобиль, равна $mg - \dfrac{m\upsilon^2}{r} = N$. По третьему закону Ньютона с такой же силой автомобиль действует на мост $P = N$. Таким образом, сила давления автомобиля на середину выпуклого моста $P = mg - \dfrac{m\upsilon^2}{r}$.

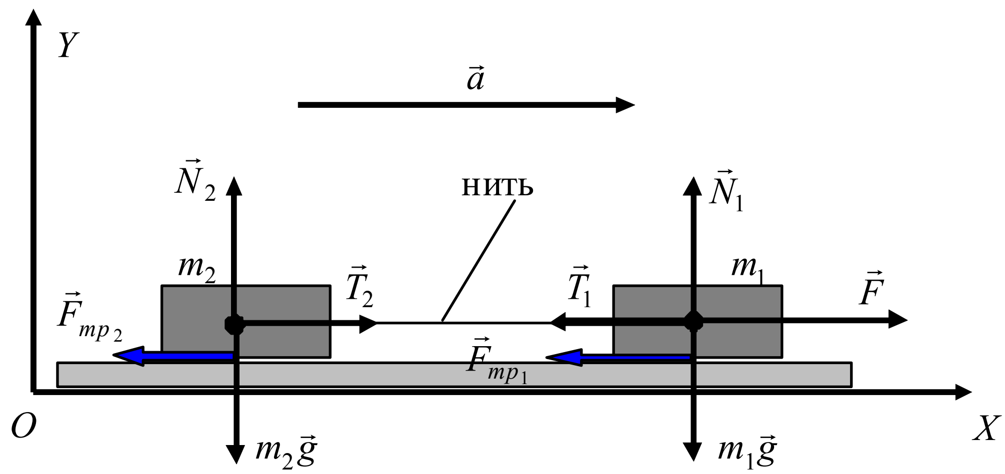
Ответ: $P = mg - \dfrac{m\upsilon^2}{r}$.

<u>Движение системы тел</u>

<u>Задача 1.</u> Два тела массами m_1 и m_2 связаны нитью и движутся по горизонтальной поверхности под действием силы $\vec{F}$. Нить не-

растяжимая невесомая. Найти ускорение системы тел *a* и силу натяжения нити, если известны сила тяги *F*, массы тел m_1 и m_2 и коэффициент трения μ.

Дано:	**Решение задачи**
F, m_1, m_2, μ	
a – ?	Выполним рисунок. Расставим силы, действующие на каждое тело



Рассмотрим силы, действующие на каждое тело.

На первое тело действуют 5 сил: сила тяги $\vec{F}$, сила тяжести $m_1\vec{g}$, сила реакции опоры $\vec{N}_1$, сила натяжения нити $\vec{T}_1$ и сила трения $\vec{F}_{тр1}$

На второе тело действуют 4 силы: сила натяжения нити $\vec{T}_2$, сила тяжести $m_2\vec{g}$, сила реакции опоры $\vec{N}_2$ и сила трения $\vec{F}_{тр\,2}$.

Так как нить невесомая и нерастяжимая, можно считать, что тела движутся с одинаковым ускорением $\vec{a}$ и силы натяжения нити $\vec{T}_1$ и $\vec{T}_2$ равны по величине ($T_1 = T_2 = T$).

Запишем для каждого тела уравнения движения в векторной форме.

$$m_1\vec{g} + \vec{N}_1 + \vec{T} + \vec{F}_{тр1} + \vec{F} = m_1\vec{a},$$

$$m_2\vec{g} + \vec{N}_2 + \vec{T} + \vec{F}_{тр\,2} + \vec{F} = m_2\vec{a}$$

Выберем прямоугольную систему координат и направим ось OX по направлению движения системы тел, ось OY – по вертикали вверх. Запишем уравнения движения тел в проекциях на оси координат:

ось OX: $$F - T - F_{тр1} = m_1 a,$$

$$T - F_{тр2} = m_2 a,$$

ось OY: $N_1 - m_1 g = 0,$

$N_2 - m_2 g = 0.$

Найдем N_1 и N_2: $N_1 = m_1 g,$ $N_2 = m_2 g.$

Силу трения найдем по формуле $F_{тр} = \mu N.$

Тогда $F_{тр1} = \mu m_1 g$ и $F_{тр2} = \mu m_1 g.$

Подставим значение сил трения в уравнения движения

$$F - T - \mu m_1 g = m_1 a,$$

$$T - \mu m_2 g = m_2 a.$$

Сложим почленно эти уравнения:

$$F - \mu g(m_1 + m_2) = (m_1 + m_2)a.$$

Отсюда ускорение, с которым движется система тел, равно

$$a = \frac{F - \mu g(m_1 + m_2)}{m_1 + m_2}$$

Силу натяжения нити между телами найдем, если подставим значение ускорения в уравнения движения любого из тел:

$$T = m_2 a + \mu m_2 g,$$

$$T = m_2\left(\frac{F - \mu g(m_1 + m_2)}{m_1 + m_2}\right) + \mu m_2 g =$$

$$= \frac{m_2 F - \mu g m_1 m_2 - \mu g m_2^2 + \mu g m_1 m_2 + \mu g m_2^2}{m_1 + m_2} = \frac{m_2 F}{m_1 + m_2}$$

$$T = \frac{F}{1 + m_1 / m_2}$$

Ответ: $T = \dfrac{F}{1 + m_1 / m_2}$ $a = \dfrac{F - \mu g(m_1 + m_2)}{m_1 + m_2}$

<u>Задача 2</u>. Два тела массами m_1 и m_2 связаны нитью. Нить перекинута через неподвижный блок. Нить нерастяжимая и невесомая. Массой блока и трением в блоке можно пренебречь. Определить ускорение тел a и силу натяжения нити T между телами.

Дано:

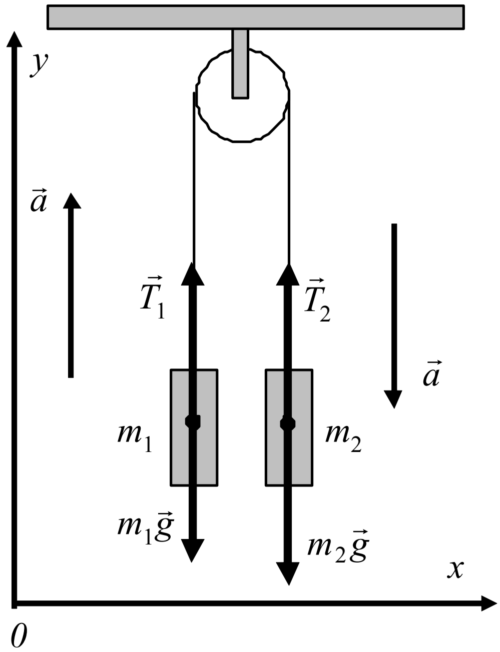
m_1, m_2

a – ? T – ?

Решение задачи:

Рассмотрим силы, действующие на каждое тело. На тело 1 действуют сила натяжения нити $\vec{T}_1$ и сила тяжести $m_1\vec{g}$. На тело 2 действуют сила натяжения нити $\vec{T}_2$, и сила тяжести $m_2\vec{g}$.

Так как нить нерастяжимая и невесомая и трением в блоке и массой блока можно пренебречь, можно считать, что тела движутся с одинаковым по величине и противоположным по направлению ускорением ($|\vec{a}_1| = |\vec{a}_2| = a$) и силы натяжения нити $\vec{T}_1$ и $\vec{T}_2$ равны ($\vec{T}_1 = \vec{T}_2 = \vec{T}$). Запишем уравнения движения для каждого тела в векторной форме:



$$\vec{T} + m_1\vec{g} = m_1\vec{a}_1,$$
$$\vec{T} + m_2\vec{g} = m_2\vec{a}_2.$$

Будем считать, что $m_2 > m_1$, и тело 1 под действием приложенных к нему сил, движется вверх. Выберем прямоугольную систему координат XOY.

Направим ось $0y$ вертикально вверх. Запишем уравнения в проекциях на ось OY:

$$T - m_1 g = m_1 a, \qquad T = m_1 g + m_1 a.$$

$$T - m_2 g = -m_2 a, \quad T = m_2 g - m_2 a.$$

Отсюда $$m_1 g + m_1 a = m_2 g - m_2 a,$$

$$a = \frac{g(m_2 - m_1)}{m_1 + m_2}.$$

Силу натяжения нити между телами найдем, если подставим значение ускорения в любое уравнение системы:

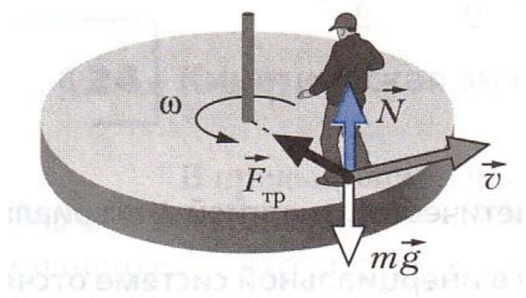
$$T = m_1 g + m_1 a = m_1 g + \frac{m_1 g(m_2 - m_1)}{m_1 + m_2},$$

$$T = \frac{m_1 g(m_1 + m_2) + m_1 g(m_2 - m_1)}{m_1 + m_2} = \frac{2m_1 m_2}{m_1 + m_2} g.$$

Ответ: $a = \dfrac{g(m_2 - m_1)}{m_1 + m_2}$, $T = \dfrac{2m_1 m_2}{m_1 + m_2} g$

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. Творческое задание. *Составьте задачу по рисунку, определите условия и решите*



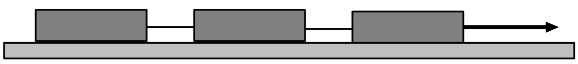
Упражнение 1. *Решите задачи.*

1. На горизонтальной поверхности лежит тело массой 0,5 кг. В некоторый момент времени на него начинает действовать горизонтально направленная сила, модуль которой равен 2 Н. Найдите ускорение, с которым будет двигаться тело, если коэффициент трения между поверхностью и телом равен 0,3.

2. Как изменится ответ в задаче 1, если сила, действующая на тело, будет направлена не горизонтально, а под углом 30° к горизонту: а) вверх; б) вниз.

3. По плоскости, образующей с горизонтом угол 60° , соскальзывает вниз брусок. Найдите ускорение бруска, если коэффициент трения бруска о плоскость равен 0,2.

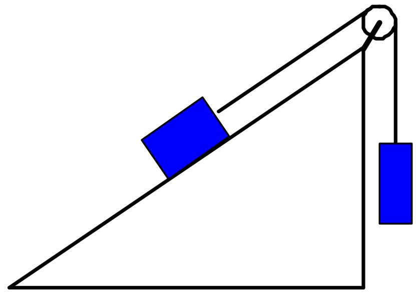
4. На горизонтальной поверхности лежат три бруска, связанные нитями. Масса каждого бруска 1 кг. Нити невесомые, нерастяжимые и все



время натянуты. На первый брусок начинает действовать сила 9 Н, направленная горизонтально. Определить силы натяжения нитей между брусками и ускорение, с которым движутся бруски. Трения нет.

5. Два тела с одинаковыми массами 2 кг соединены невесомой нитью и поднимаются вверх под действием силы F, приложенной к одному из тел. Нить между телами обрывается, если модуль силы натяжения

станет больше 30 Н. При какой минимальной по модулю силе F это произойдёт?



6. Груз массой 3 кг находится на наклонной плоскости с углом наклона 30° и связан с грузом массой 2 кг невесомой и нерастяжимой нитью, переброшенной через невесомый блок. Определить ускорение грузов, силу натяжения нити и силу давления на ось блока. Рассмотреть два случая движения: а) трения между телом и наклонной плоскостью нет; б) коэффициент трения между телом и наклонной плоскостью равен 0,1.

ТЕМА 5. **ИМПУЛЬС. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА**

Новые слова и словосочетания

импульс	количество движения
импульс силы	время действия силы
замкнутый	изолированный
внешний	внутренний
не замкнутый	

Импульс тела. Импульс силы

Важной мерой поступательного движения тела (материальной точки) является импульс или количество движения. **Импульс тела** $\vec{P}$ **равен произведению масса тела и его скорости** $\vec{P} = m\vec{\upsilon}$. Импульс тела является мерой механического движения тела.

Импульс – векторная величина. Импульс направлен по скорости. Единица измерения импульса в СИ: *кг·м/с*.

Если на тело действует сила, то тело получает ускорение. Значит, в результате действия силы изменяется скорость тела, а, значит, изменяется импульс (количество движения) тела. Запишем второй закон Ньютона в виде: $\vec{F} = m\vec{a}$. Однако ускорение $\vec{a} = \dfrac{\Delta\vec{\upsilon}}{\Delta t} = \dfrac{\vec{\upsilon}_k - \vec{\upsilon}_0}{\Delta t}$, где $\Delta\vec{\upsilon}$ – изменение скорости тела за время Δt, $\vec{\upsilon}_k$ – скорость тела в конечном состоянии, $\vec{\upsilon}_0$ – скорость тела в начальном состоянии. Тогда

$$\vec{F} = m\frac{\vec{\upsilon}_k - \vec{\upsilon}_0}{\Delta t} = \frac{m\vec{\upsilon}_k - m\vec{\upsilon}_0}{\Delta t} = \frac{\vec{P}_k - \vec{P}_0}{\Delta t},$$

где $\vec{P}_0$ – импульс в начальном состоянии, $\vec{P}_k$ – импульс в конечном состоянии.

$\Delta\vec{P} = \vec{P}_k - \vec{P}_0$ – изменение импульса тела, а $\dfrac{\Delta\vec{P}}{\Delta t}$ – изменение импульса в единицу времени, скорость изменения импульса.

Значит сила, действующая на тело, численно равна изменению его импульса в единицу времени

$$\vec{F} = \frac{m\vec{\upsilon}_k - m\vec{\upsilon}_0}{\Delta t} = \frac{\vec{P}_k - \vec{P}_0}{\Delta t} = \frac{\Delta\vec{P}}{\Delta t} \quad \text{или} \quad \vec{F} = \frac{\Delta\vec{P}}{\Delta t}$$

– сила, действующая на тело, пропорциональна скорости изменения импульса тела.

С другой стороны, $\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{P}$.

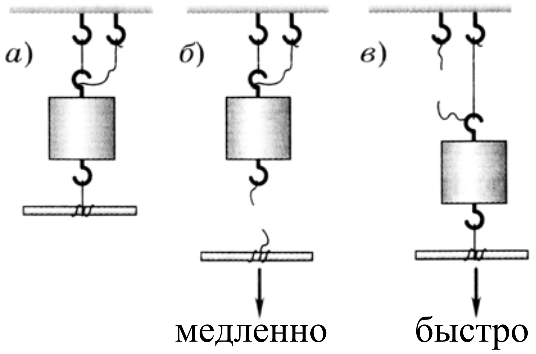
Полученные выражения представляют новую форму записи второго закона Ньютона, согласно которой действие силы прямо пропорционально изменению импульса тела в единицу времени.

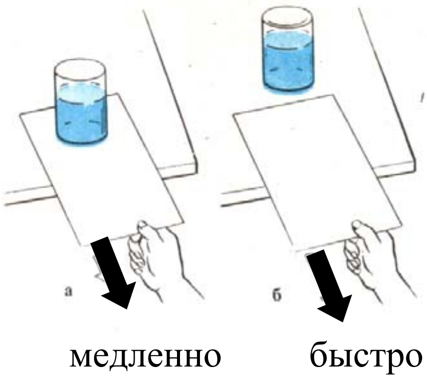
<u>Произведение силы на время её действия</u> $\vec{F}\cdot\Delta t$ **<u>называется импульсом силы</u>**. Импульс силы – это физическая величина, которая является мерой действия силы за промежуток времени Δt, то есть временная характеристика действия силы. Импульс силы – величина векторная. По направлению импульс силы совпадает с направлением вектора силы. Поэтому **<u>второй закон Ньютона</u>** можно сформулировать так:

$\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{P}$ – **изменение импульса тела (материальной точки) пропорционально приложенной к нему силе и имеет такое же направление, как и сила.**

или

$\vec{F}\Delta t = m\Delta\vec{v}$; $\vec{F}\Delta t = m\vec{v}_k - m\vec{v}_0$ – **изменение импульса тела в результате действия силы равно импульсу этой силы.**





Импульс силы характеризуется произведением силы на время её действия. Следовательно, небольшая по величине сила, действующая длительный промежуток времени может также изменить импульс тела, как и большая по величине сила, действующая в течение малого промежутка времени. Рассмотрите внимательно рисунок.

Закон сохранения импульса материальной точки

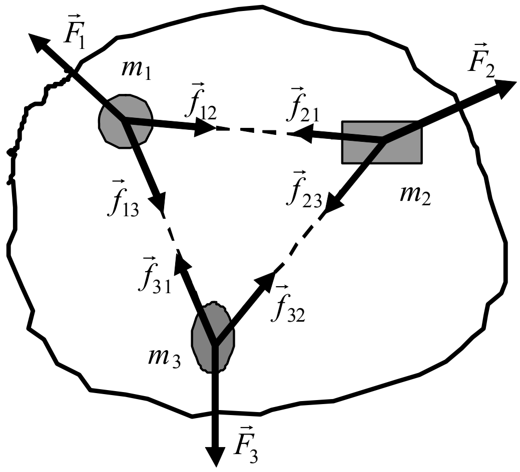
Если на тело (материальную точку) действуют силы, то согласно уравнению $\vec{F} = \frac{\Delta \vec{P}}{\Delta t}$, равнодействующая всех сил $\vec{F}$ равна быстроте изменения импульса тела (материальной точки).

Если на тело (материальную точку) не действуют силы или их действие скомпенсировано, то равнодействующая сила $\vec{F}$ равна нулю. Тогда согласно уравнению $\vec{F} = \frac{\Delta \vec{P}}{\Delta t}$, скорость изменения импульса $\frac{\Delta \vec{P}}{\Delta t} = 0$. Значит, импульс тела (материальной точки) $\vec{P}$ при этом не изменяется $\vec{P} = const$.

Закон сохранения импульса тела (материальной точки): если на тело (материальную точку) не действуют силы или действие сил компенсировано, то его импульс сохраняется.

Система тел. Закон сохранения импульса для изолированной системы тел (системы материальных точек)

Система тел – это несколько тел (несколько материальных точек). Тела, которые входят в систему могут взаимодействовать друг с другом и взаимодействовать с телами, не входящими в систему. Поэтому в физике силы взаимодействия тел, находящихся в системе называют **внутренними силами,** а силы взаимодействия с телами, не входящими в систему, называют **внешними силами.**



Внутренние силы – это силы, с которыми взаимодействуют тела одной системы.

Внешние силы – это силы, с которыми другие тела действуют на тела данной системы.

Рассмотрим **систему,** состоящую из тел массами m_1 и m_2 и m_3, которые можно принять за материальные точки. На тела системы действуют **внутренние** силы: $\vec{f}_{12}$ и $\vec{f}_{13}$ – силы, действующие на тело массой m_1 со стороны второго и третьего тела; $\vec{f}_{21}$ и $\vec{f}_{23}$ – силы, действующие на тело массой m_2 со стороны первого и третьего тела; $\vec{f}_{31}$ и $\vec{f}_{32}$ – силы, действующие на тело массой m_3 со стороны первого и второго тела. На тела системы кроме внутренних сил действуют ещё **внешние** силы: на первое тело – сила $\vec{F}_1$, на второе тело – сила $\vec{F}_2$, на третье тело – сила $\vec{F}_3$.

Напишем основное уравнение динамики для каждого тела системы.

$$\begin{cases} \vec{F}_1 + \vec{f}_{12} + \vec{f}_{13} = \dfrac{\Delta \vec{P}_1}{\Delta t} \\ \vec{F}_2 + \vec{f}_{21} + \vec{f}_{23} = \dfrac{\Delta \vec{P}_2}{\Delta t} \\ \vec{F}_3 + \vec{f}_{31} + \vec{f}_{32} = \dfrac{\Delta \vec{P}_3}{\Delta t} \end{cases}$$

Сложим левые и правые части этих уравнений:

$$\vec{F}_1 + \vec{f}_{12} + \vec{f}_{13} + \vec{F}_2 + \vec{f}_{21} + \vec{f}_{23} + \vec{F}_3 + \vec{f}_{31} + \vec{f}_{32} = \frac{\Delta \vec{P}_1}{\Delta t} + \frac{\Delta \vec{P}_2}{\Delta t} + \frac{\Delta \vec{P}_3}{\Delta t}.$$

По третьему закону Ньютона $\vec{f}_{12} = -\vec{f}_{21}$; $\vec{f}_{13} = -\vec{f}_{31}$; $\vec{f}_{23} = -\vec{f}_{32}$, следовательно, $\vec{f}_{12} + \vec{f}_{21} = 0$; $\vec{f}_{13} + \vec{f}_{31} = 0$; $\vec{f}_{23} + \vec{f}_{32} = 0$.

Тогда $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = \dfrac{\Delta \vec{P}_1}{\Delta t} + \dfrac{\Delta \vec{P}_2}{\Delta t} + \dfrac{\Delta \vec{P}_3}{\Delta t} = \dfrac{\Delta(\vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \vec{P}_3)}{\Delta t} = \dfrac{\Delta \vec{P}}{\Delta t}$, где $\vec{P} = \vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \vec{P}_3$ – **импульс всей системы, суммарный импульс системы материальных точек.**

Если на систему действуют внешние силы, то равнодействующая этих сил равна $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3$, тогда **для изменения импульса всей системы необходимо действие на эту систему внешних сил** $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = \dfrac{\Delta \vec{P}}{\Delta t}$**.**

Так как сумма всех внутренних сил равна нулю, значит, они не могут изменить импульс всей системы. Внутренние силы могут изменить импульс только отдельных тел, входящих в систему.

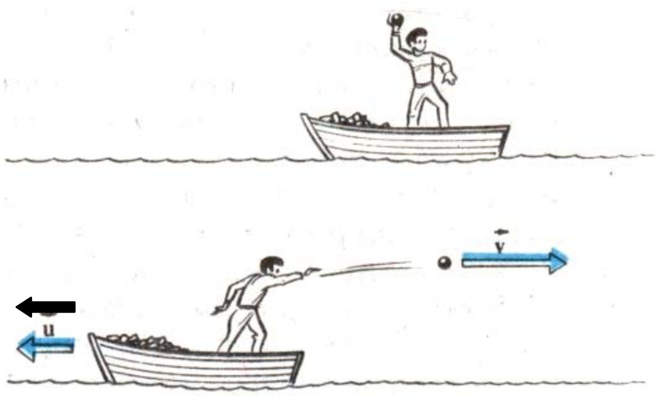
Система тел, на которую внешние силы не действуют (или равнодействующая внешних сил равна нулю), – это **замкнутая,** или **изолированная система тел**.

Если система замкнута, то есть $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = 0$, то скорость изменения суммарного импульса системы $\dfrac{\Delta\vec{P}}{\Delta t} = 0$, значит, изменение импульса системы тоже равно нулю, то есть **импульс такой системы не изменяется** $\vec{P} = const$ **.**

Закон сохранения импульса системы тел: суммарный импульс замкнутой системы тел сохраняется при всех изменениях внутри системы.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Закон сохранения импульса выполняется и в незамкнутых системах. Если сумма проекций внешних сил на некоторое направление движения тел равна нулю, то суммарный импульс системы по этому направлению сохраняется.



Рассмотрите внимательно рисунок. Почему после броска лодка пришла в движение?

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Слушайте, читайте, повторяйте.*

Импульс; импульс тела; импульс силы; количество движения; количество движения – это мера движения; количество движения – это произведение массы на скорость; импульс силы; импульс силы – это произведение силы на время её действия; изменение импульса тела; изменение импульса тела пропорционально.

Система; система тел; система материальных тел; система материальных точек; замкнутая система; замкнутая система тел; изолированная система; изолированная система тел; система тел замкнутая, если;

система тел не замкнутая, если; внешние силы; внутренние силы; силы компенсированы; силы не действуют.

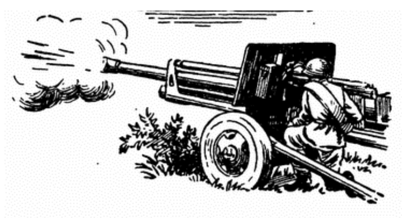
Сохранение; сохраняться; сохраняется; постоянный; не изменяется; суммарный; суммарный импульс; сумма импульсов; суммарный импульс системы тел; сумма импульсов тел, входящих в систему; суммарный импульс системы сохраняется; суммарный импульс системы постоянный.

Упражнение 2. *Решите задачи.*

1. Тело массой 5 кг падает с высоты 8 м без начальной скорости. После удара о Землю оно поднимается на высоту 3 м. Чему равен импульс удара (импульс силы, изменившей направление движения)?

2. Мяч массой 150 г летит со скоростью 10 м/с, ударяется о гладкую стенку под углом 30° к ней и отскакивает от неё со скоростью 10 м/с. Найдите среднюю силу, с которой стенка действует на мяч. Продолжительность удара 0,1 с.

3. Пушка массой 200 кг стреляет в горизонтальном направлении. Масса снаряда 20 кг, скорость снаряда 800 м/с. С какой скоростью будет двигаться пушка после выстрела?



4. Снаряд массой 20 кг летит горизонтально вдоль железной дороги со скоростью 500 м/с и попадает в неподвижный вагон с песком массой 10 т и застревает в нём. С какой скоростью начнет двигаться вагон?

5. Движение материальной точки массой 2кг описывается уравнением $x = 5 - 8t + 4t^2$ (м). Найдите импульс точки через 2 с и 4 с после начала движения. Найдите силу, которая вызвала это изменение импульса.

6. Пушка массой 500 кг стреляет под углом 30° к горизонту. Масса снаряда 10 кг, скорость снаряда 300 м/с. С какой скоростью будет двигаться пушка после выстрела?

7. Человек массой 70 кг бежит навстречу тележке со скоростью 5 м/с. Тележка массой 50 кг движется со скоростью 15 м/с. С какой скоростью будет двигаться тележка, если человек прыгнет на неё?

8. Снаряд массой 20 кг летел горизонтально со скоростью 300 м/с. Он разорвался на два осколка. С какой скоростью и в каком направлении будет двигаться второй осколок, если первый осколок начал двигаться в обратном направлении со скоростью 100 м/с? Если первый осколок остановился? Если первый осколок движется в том же направлении, что и снаряд со скоростью 200 м/с?

9. Летящий снаряд разорвался на два осколка с одинаковыми массами. Модули скоростей осколков 300 м/с и 400 м/с, угол между векторами скоростей равен 90°. Найти скорость снаряда до разрыва.

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. **Импульс тела** $\vec{P}$ равен произведению масса тела и его скорости $\vec{P} = m\vec{v}$. Импульс тела является мерой механического движения тела. Импульс – векторная величина. Импульс направлен по вектору скорости.
2. $\vec{F} = \dfrac{\Delta\vec{P}}{\Delta t}$ – сила, действующая на тело, пропорциональна скорости изменения импульса тела – второй закон Ньютона.
3. Произведение силы на время её действия $\vec{F} \cdot \Delta t$ называется **импульсом силы**.
4. $\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{P}$ – **изменение импульса тела (материальной точки) пропорционально приложенной к нему силе и имеет такое же направление, как и сила.**
5. Закон сохранения импульса тела (материальной точки): если на тело (материальную точку) не действуют силы или действие сил компенсировано, то его импульс сохраняется.
6. **Внутренние силы** – это силы, с которыми взаимодействуют тела одной системы.

Внешние силы – это силы, с которыми другие тела действуют на тела данной системы**.**

7. **Система тел, на которую внешние силы не действуют** (или равнодействующая внешних сил равна нулю), – это **замкнутая,** или **изолированная система тел**.
8. **Закон сохранения импульса системы тел:** суммарный импульс замкнутой системы тел сохраняется при всех изменениях внутри системы.

ТЕМА 6. **МЕХАНИЧЕСКАЯ РАБОТА. МОЩНОСТЬ**

Новые слова и словосочетания

работа	мощность
полезная работа	полная работа
численно	скалярное произведение
потеря	сопротивление
эффективность	движущая
частный случай	представить
представление	графический

6.1. **Работа силы**

В результате взаимодействия тел их координаты и скорости могут непрерывно изменяться. Могут изменяться и силы, действующие между телами.

Пространственной характеристикой действия силы является произведение силы на перемещение $\vec{F} \cdot \Delta\vec{r}$, а временной характеристикой действия силы является произведение силы на время её действия (импульс силы) $\vec{F} \cdot \Delta t$.

Если под действием силы тело совершает перемещение, то сила совершает работу (механическую работу). **Работа – это процесс изменения состояния тела под действием силы.**

Термин «работа» был введен в физику в 1826 г. французским ученым Ж. Понселе.

Механическая работа служит мерой действия механической силы, приложенной к телу.

Чтобы сдвинуть тело с места, нужно приложить силу и изменить скорость тела в направлении перемещения $\Delta\vec{r}$.

Работой (элементарной работой) силы $\vec{F}$ на перемещении $\Delta\vec{r}$ называется физическая величина, равная скалярному произведению силы на перемещение.

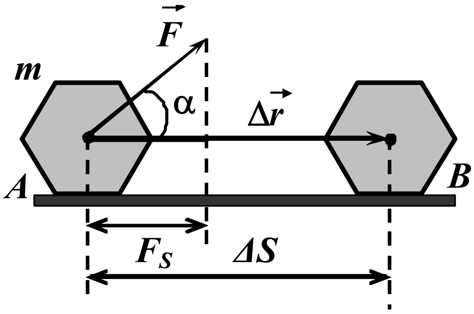
Работа обозначается буквой ΔA, **работа – скалярная величина, равная** $\Delta A = \left(\vec{F} \cdot \Delta\vec{r}\right)$.

Или работа равна произведению модуля силы на модуль вектора перемещения и на косинус угла между направлением силы и направлением перемещения $\Delta A = F \cdot \Delta r \cdot \cos\alpha$. Обозначим $F \cdot \cos\alpha = F_r$ – проекция вектора силы на направление перемещения, тогда $\Delta A = F_r \cdot \Delta r$.

Работа может быть положительной и отрицательной. Знак работы определяется знаком косинуса угла между силой и перемещением (или от знака проекции силы на направление перемещения F_r).

Единица измерения работы в СИ – джоуль (Дж): 1 Дж = 1 Н·м. Джоуль – это работа, которую совершает сила (1 *Н*) на перемещении (1 *м*), если направление силы и направление перемещения совпадают.

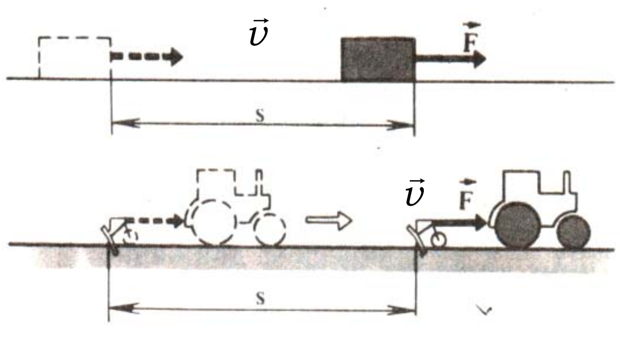
Если тело массой m перемещается прямолинейно из точки A в точку B под действием постоянной силы $\vec{F}$, то модуль вектора перемещения равен пройденному пути $|\Delta\vec{r}| = \Delta S$, тогда $\Delta A = F \cdot \Delta S \cos\alpha$. Или $\Delta A = F_S \cdot \Delta S$, где $F_S = F \cdot \cos\alpha$ – проекция силы на направление перемещения.

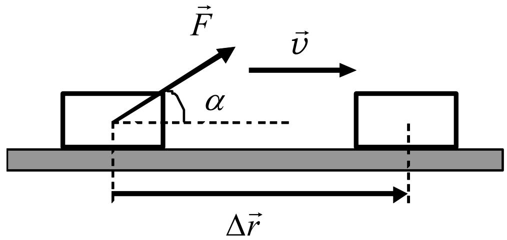


Рассмотрим **частные случаи прямолинейного движения тел под действием постоянной силы:**

1. Направление силы совпадает с направлением перемещения, $|\Delta\vec{r}| = S$, угол α = 0°, $\cos\alpha = 1$, тогда

$$\Delta A = F \cdot S\cos\alpha = F \cdot S \cdot \cos 0^0 = F \cdot S.$$

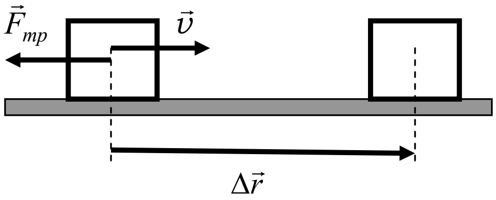


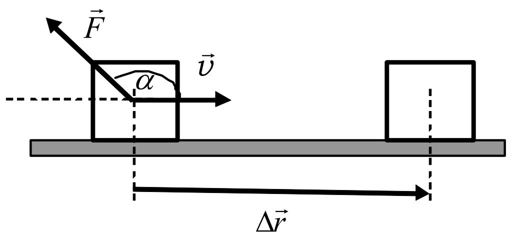


Сила совершает положительную работу.

Если угол $\alpha < 90°$, то работа силы также положительная ($\Delta A > 0$), так как косинус острых углов положителен. **Сила, совершающая положительную работу, называется движущей силой.**

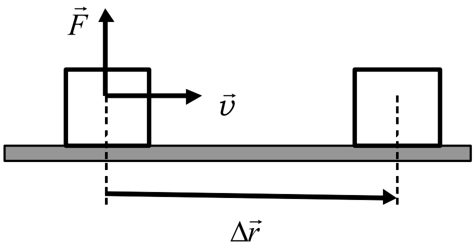
2. Направление силы противоположно перемещению $|\Delta\vec{r}| = S$, угол α = 180°, $\cos\alpha = -1$, тогда $\Delta A = F \cdot S\cos\alpha = F \cdot S \cdot \cos 180^0 = -F \cdot S$. Работа силы отрицательная величина.





При $\alpha > 90°$ работа отрицательна, так как косинус тупых углов отрицателен.

Сила, совершающая отрицательную работу, называется силой сопротивления. Примером такой силы может служить сила трения.



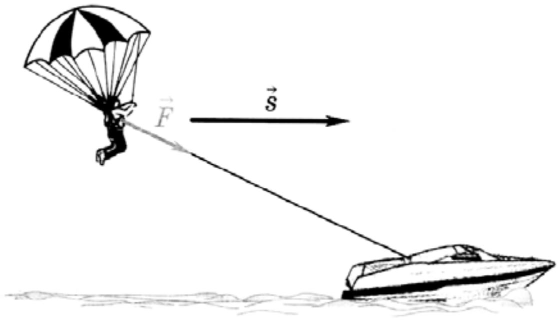
3. Направление силы перпендикулярно направлению перемещения $\left|\Delta\vec{r}\right| = S$, угол $\alpha = 90°$, $\cos\alpha = 0$, тогда

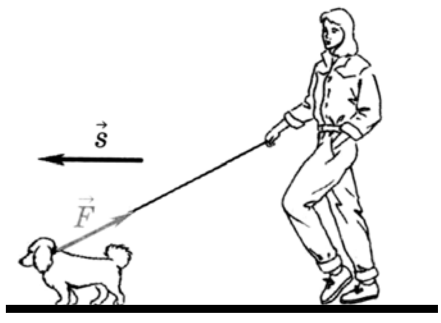
$$\Delta A = F \cdot S\cos\alpha = F \cdot S \cdot \cos 90^0 = 0.$$

Сила перпендикулярная перемещению работы не совершает.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Работа движущей силы всегда положительная величина.
Работа силы сопротивления всегда отрицательная величина.
Работа силы, перпендикулярной перемещению всегда равна нулю.





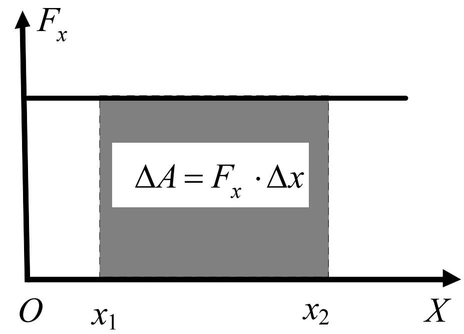
Рассмотрите внимательно рисунки. В каком случае работа силы отрицательна? Почему?

Графическое представление работы

1. **Работа постоянной силы**

Пусть тело движется вдоль оси *OX* под действием постоянной силы $\vec{F} = const$.

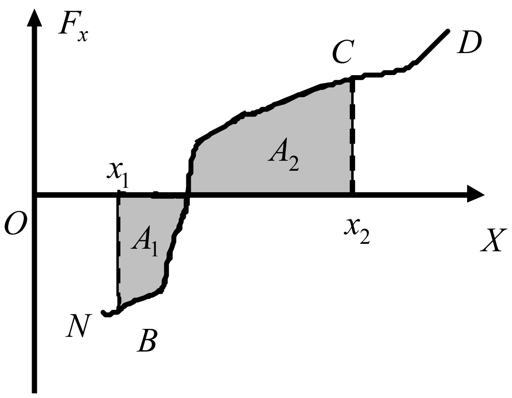
Тогда работа силы на участке пути $\Delta x = x_2 - x_1$ равна $\Delta A = F_x \cdot \Delta x$, где F_x – проекция силы на ось *OX*.



Работа силы численно равна площади под кривой $F_x = f(x)$.

Если F_x>0, то работа $\Delta A>0$, следовательно площадь под кривой $F_x = f(x)$ выше оси абсцисс – необходимо считать с положительным знаком.

Если F_x<0, то работа $\Delta A<0$, следовательно площадь под кривой $F_x = f(x)$ ниже оси абсцисс – необходимо считать с отрицательным знаком.



2. **Работа переменной силы**

Если тело движется вдоль оси *OX* под действием переменной силы $\vec{F} \neq const$. Тогда проекция силы F_x на направление перемещения также переменная величина.

Если дан график зависимости проекции силы $F_x = F \cdot \cos\alpha$ на направление перемещения от перемещения, то работа силы численно равна площади под кривой $F_x = f(x)$.

Работа силы *A* на отрезке пути $\Delta x = x_2 - x_1$ равна площади фигуры, ограниченной кривой *NBCD* и прямыми Bx_1 и Cx_2. При этом площадь фигуры, расположенной над осью *OX* (работа A_2) – величина положительная, а площадь фигуры, расположенной ниже оси *OX* (работа A_1) – величина отрицательная. Тогда $A = A_2 – A_1$.

3. **Если на тело действует несколько сил,** то проекция результирующей силы на перемещение равна сумме проекций отдельных сил

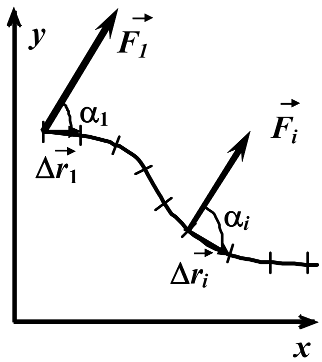
$$F_r = F_{1r} + F_{2r} + F_{3r} + \ldots$$

Поэтому работа результирующей силы равна

$$\Delta A = F_r |\Delta \vec{r}| = F_{1r}|\Delta \vec{r}| + F_{2r}|\Delta \vec{r}| + F_{3r}|\Delta \vec{r}| + \ldots$$

Итак, ***если на тело действует несколько сил, то полная работа (работа всех сил) равна работе результирующей силы***.

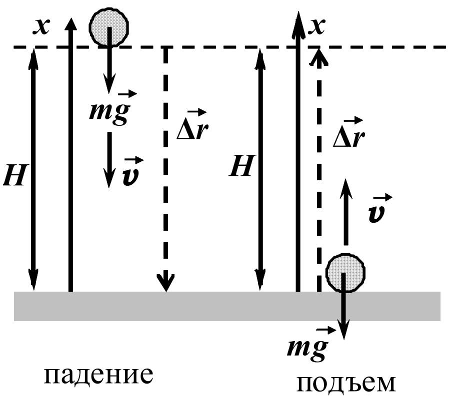
4. Работа переменной силы при движении тела по криволинейной траектории.



Если тело движется по криволинейной траектории под действием переменной силы $\vec{F}$, то работу этой силы можно найти, используя следующий способ. Разделим криволинейную траекторию на большое количество маленьких (элементарных) прямолинейных участков $\Delta\vec{r}_i$ так, что силу $\vec{F}_i$ на каждом отрезке перемещения можно считать постоянной по модулю и направлению. Работа на любом i–том прямолинейном участке – это элементарная работа $\Delta A_i = F_i \cdot \Delta r_i \cos\alpha_i$. Полная работа силы на всем пути равна сумме элементарных работ

$$A = F_1 \cdot \Delta r_1 \cos\alpha_1 + F_2 \cdot \Delta r_2 \cos\alpha_2 + \ldots =$$
$$= \Delta A_1 + \Delta A_2 + \ldots = \sum_i \Delta A_i .$$

6.2. <u>Работа силы тяжести</u>



Рассмотрим движение тела под действием силы тяжести вблизи поверхности Земли. В этом случае сила тяжести не меняется $\vec{F} = m\vec{g} = const$.

- **Тело падает с высоты *H*.** Если тело падает с высоты H, то направление силы тяжести и вектора перемещения совпадают, тогда $\Delta A = A = (\vec{F} \cdot \Delta\vec{r}) = F \cdot \Delta r \cdot \cos\alpha = mg \cdot H$, так как $|\Delta\vec{r}| = H$, а $\cos\alpha = 1$.

- **Тело брошено вертикально вверх и поднимается на высоту *H*.** Если тело брошено вертикально вверх, то сила тяжести совершает отрицательную работу, так как направление силы и направление вектора перемещения противоположны. Тогда, если тело поднялось на высоту H, то работа силы тяжести равна

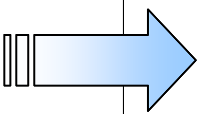
$$\Delta A = A = (\vec{F} \cdot \Delta\vec{r}) = F \cdot \Delta r \cdot \cos\alpha = -mg \cdot H,$$

так как $|\Delta\vec{r}| = H$, а $\cos\alpha = -1$.

- **Тело брошено вертикально вверх, поднялось на высоту *H* и упало (вернулось) на Землю.** Если тело брошено вертикально вверх, а затем вернулось на Землю (упало на Землю), то тело движется по замкнутому пути. Работа силы тяжести по замкнутому пути равна сумме работ: работы силы тяжести при подъёме тела и работы силы тяжести при падении тела $A = -mgH + mgH = 0$.

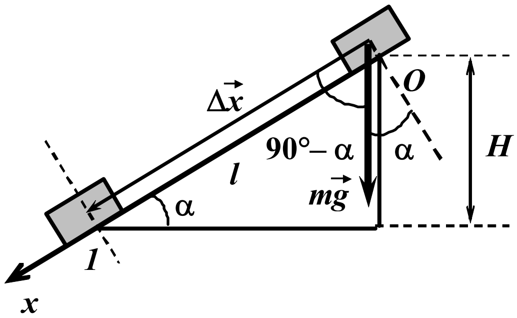
Значит, работа силы тяжести по замкнутому пути равна нулю.

ЗАПОМНИТЕ!



Работа силы тяжести по замкнутому пути равна нулю.

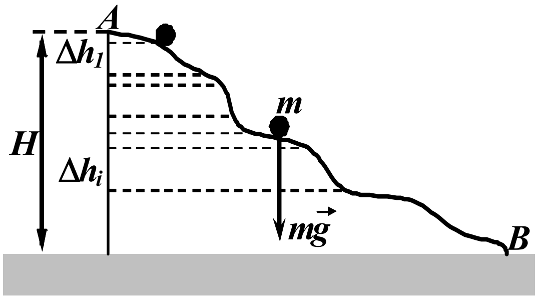
- **Тело движется по наклонной плоскости под действием силы тяжести.** Тело массой m движется по наклонной плоскости. Угол наклона плоскости к горизонту равен α, ее высота равна H, коэффициент трения $-\mu$, длина наклонной плоскости $-l$.



Сила тяжести $m\vec{g}$ составляет с перемещением $\Delta\vec{x}$ угол ($90° - \alpha$), поэтому ее работа

$$A_{тяж} = mg \cdot l\cos(90° - \alpha) = mg \cdot l\sin\alpha = mgH.$$

<u>Работа силы тяжести зависит от высоты наклонной плоскости и не зависит от угла наклонной плоскости</u>.



Если тело движется по наклонной плоскости сложной конфигурации, то сила тяжести совершает такую же работу $A_{тяж} = mgH$. Так как движение не прямолинейное (AB – кривая линия), то весь путь

AB можно разделить на маленькие наклонные плоскости с высотой Δh_1, Δh_2, …:

$$H = \Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 + \ldots$$

Работа силы тяжести на каждой плоскости равна $mg\Delta h_1$, $mg\Delta h_2$, $mg\Delta h_3 \ldots$ Полная работа силы тяжести

$$A_{тяж} = mg(\Delta h_1 + \Delta h_2 + \ldots) = mgH .$$

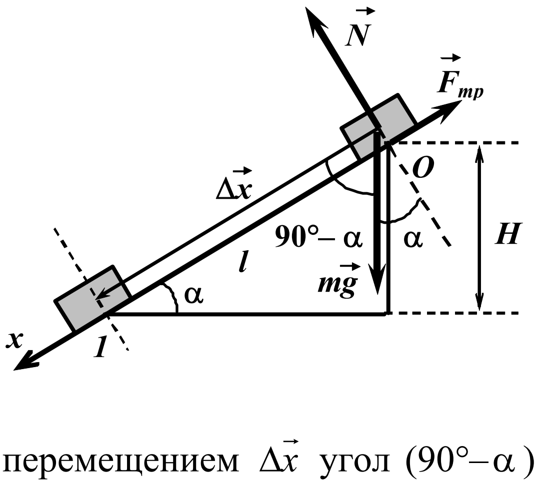
<u>Работа силы тяжести не зависит от формы траектории, а зависит только от положения начальной и конечной точек траектории.</u>

ЗАПОМНИТЕ!

Работа силы тяжести не зависит от формы траектории, а определяется только положениями начальной и конечной точек траектории.

6.3. <u>Работа сил, действующих на тело, движущееся по наклонной плоскости</u>

Тело массой m движется по наклонной плоскости. Угол наклона плоскости к горизонту равен α, ее высота равна H, коэффициент трения $-\mu$, длина наклонной плоскости $-l$.



На тело, находящееся на наклонной плоскости действуют силы: тяжести $m\vec{g}$, сила реакции $\vec{N}$ и сила трения $\vec{F}_{тр}$.

1. Сила тяжести $m\vec{g}$ составляет с перемещением $\Delta\vec{x}$ угол $(90° - \alpha)$, поэтому ее работа

$$A_{тяж} = mg \cdot l \cos(90° - \alpha) = mg \cdot l \sin\alpha = mgH .$$

<u>Работа силы тяжести зависит от высоты наклонной плоскости и не зависит от угла наклонной плоскости</u>.

2. Работа силы реакции $\vec{N}$, перпендикулярной перемещению $\Delta\vec{x}$, ***равна нулю***.

3. Сила трения $\vec{F}_{тр}$, направленная противоположно перемещению, составляет с ним угол 180°, поэтому работа силы трения ***отрицательная***.

$$A_{тр} = F_{тр}\Delta x \cdot \cos 180° = -F_{тр}\Delta x = -F_{тр} l .$$

Так как $F_{тр} = \mu N$; а $N = mg\cos\alpha$ и $\Delta x = l = \dfrac{H}{\sin\alpha}$, то

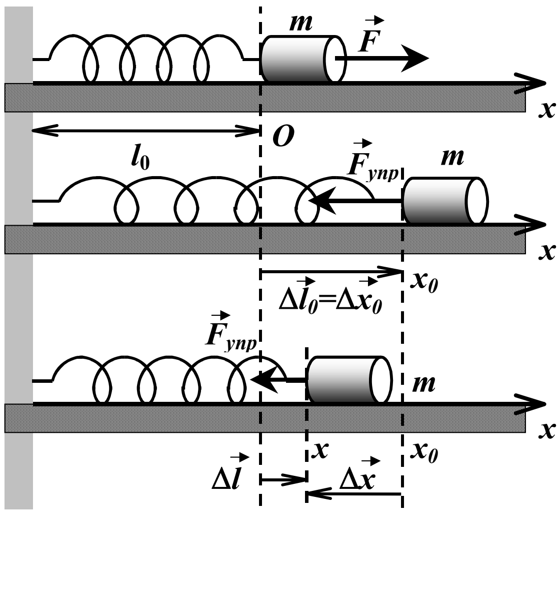
$$A_{тр} = -\mu mgH \operatorname{ctg}\alpha .$$

ЗАПОМНИТЕ!

Работа силы трения зависит от длины и формы траектории.

6.4. Работа силы упругости

Рассчитаем работу силы упругости пружины. Пусть на нерастянутую пружину длиной l_0 действует внешняя сила $\vec{F}$. После того, как удлинение Δl пружины станет равно x_0, сила прекращает свое действие. В результате действия силы упругости $\vec{F}_{упр} = -k\vec{x}_0$, направленной к положению равновесия O, пружина сжимается.



Найдем работу силы упругости при изменении координаты тела m от x_0 до x. Модуль перемещения тела m равен $\Delta x = x_0 - x$. Так как сила упругости при изменении деформации пружины от x_0 до x изменилась от $F_{упр_0} = kx_0$ до $F_{упр} = kx$, то можно использовать ее среднее значение

$$F_{упр\ ср} = \frac{kx_0 + kx}{2} = \frac{k}{2}(x_0 + x) .$$

Так как направление средней силы упругости $\vec{F}_{упр\ ср}$ и перемещения $\Delta\vec{x}$ совпадают, то работа силы упругости

$$A_{упр} = F_{упр\ ср}\Delta x = \frac{k}{2}(x_0 + x)(x_0 - x) = \frac{kx_0^2}{2} - \frac{kx^2}{2}.$$

Работа силы упругости зависит только от начального и конечного удлинения пружины.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Работа силы упругости зависит только от начального и конечного удлинения пружины.

Сила, работа которой не зависит от формы траектории, а зависит только от положения начальной и конечной точек траектории, называется консервативной силой.

Значит **сила тяжести и сила упругости – это консервативные силы**.

6.5. Мощность. Коэффициент полезного действия

Разные силы могут совершать одинаковую работу за разное время Δt. **Мощность характеризует быстроту совершения работы.**

Средняя мощность $N_{ср}$ – это физическая величина, которая равна отношению работы к промежутку времени Δt, за который эта работа совершена.

Мощность – это работа, которую совершает сила за единицу времени:

$$N_{ср} = \frac{\Delta A}{\Delta t},$$

где $N_{ср}$ – средняя мощность, ΔA – работа силы за время Δt.

Мгновенная мощность – это мощность в данный момент времени.

$$N = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta A}{\Delta t}.$$

Элементарная работа $\Delta A = \left(\vec{F} \cdot \Delta\vec{r}\right)$, тогда $N = \lim\limits_{\Delta t \to 0} \dfrac{\Delta A}{\Delta t} = \lim\limits_{\Delta t \to 0} \dfrac{(\vec{F} \cdot \Delta\vec{r})}{\Delta t} = (\vec{F} \cdot \vec{\upsilon}) = |\vec{F}| \cdot |\vec{\upsilon}| \cos\alpha$, где $\vec{\upsilon} = \lim\limits_{\Delta t \to 0} \dfrac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$ – мгновенная скорость.

Мгновенная мощность равна скалярному произведению силы на скорость движения тела.

Единицы измерения мощности в системе СИ: 1 ватт (*Вт*); 1 *Вт* = 1 *Дж /с*.

Для характеристики эффективности использования работы введена специальная величина – **коэффициент полезного действия (КПД).**

При движении одного тела относительно другого действуют силы сопротивления. Поэтому чтобы изменить положение тела, нужно совершить работу на изменение положения (полезная работа) и работу против сил сопротивления (работа потерь).

Работа, которую совершают силы при отсутствии сил сопротивления, называется полезной работой.

Полная работа A, которую совершает сила, равна сумме полезной работы $A_{пол}$ и работы потерь $A_{пот}$

$$A = A_{пол} + A_{пот}.$$

Отношение полезной работы к полной работе называется коэффициентом полезного действия (КПД)

$$КПД = \eta = \frac{\text{полезная работа}}{\text{полная работа}} = \frac{A_{пол}}{A}$$

(η – греческая буква «этта»).

КПД всегда меньше единицы ($КПД < 1$), так как полная работа всегда больше полезной. Коэффициент полезного действия обычно выражают в процентах

$$\eta = \frac{A_{пол}}{A} \cdot 100\%.$$

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Слушайте, читайте, повторяйте.*

Работа; работа силы; сила совершает работу; работа, совершенная силой; работа силы положительная величина; скалярная величина; работа положительная; работа отрицательная; работа равна нулю.

Работа силы тяжести; работа силы упругости; работа силы реакции; работа силы трения; полная работа; полезная работа; коэффициент полезного действия; мощность; полезная мощность; средняя мощность; мгновенная мощность.

Работа силы не зависит от формы траектории; работа силы зависит от формы пути; работа силы зависит только от положения начальной и конечной точек пути.

Упражнение 2. *Решите задачи.*

1. Тело массой 10 кг поднимают вверх при помощи каната на высоту 10 м за 5 с. Определить работу, совершенную силой натяжения каната, если движение: а) равномерное; б) равноускоренное.

2. Груз массой 50 кг свободно падает из состояния покоя в течение 10 с. Какую работу совершает сила тяжести за это время?

3. Тело двигается равнозамедленно по горизонтальной поверхности. Начальная скорость тела 10 м/с, коэффициент трения 0,2. Какую работу совершит сила трения за время движения тела?

4. Тело массой 10 кг перемещается по горизонтальной поверхности равномерно под действием силы, направленной под углом 30° к горизонту. Коэффициент трения равен 0,5. Определить работу силы на пути 200 м.

5. Тело массой 3 кг поднимают вверх по наклонной плоскости на высоту 8 м. Угол наклона плоскости к горизонту равен 30°. Коэффициент трения равен 0,2. Определить работу силы и коэффициент полезного действия.

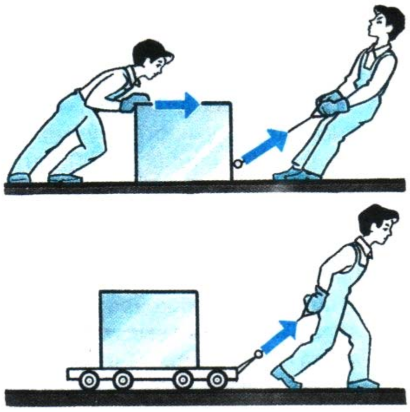
6. Пружину сжимают на 8 см. Коэффициент жесткости пружины 200 Н/м. Определить работу сжатия.

7. Чтобы деформировать пружину на 10 см, необходима сила 50 Н. Какая при этом совершается работа?

8. На горизонтальном участке пути длиной 2 км скорость поезда увеличилась с 54 км/час до 72 км/час. Определить работу и среднюю мощность, развиваемую паровозом. Масса поезда 800 т, коэффициент трения 0,05.

9. Моторы электропоезда потребляют мощность 900 кВт. Скорость поезда 54 км/час, КПД моторов 80 %. Определить силу тяги моторов.

10. К лежащему на горизонтальной поверхности бруску массой 8 кг прикреплена пружина жесткостью 200 Н/м. Коэффициент трения 0,4. К свободному концу пружины приложена сила под углом 30° к горизонту, под действием которой груз равномерно перемещается на расстояние 5 м. Определить совершенную при этом работу.



*<u>**Упражнение 3.**</u> Составить и решить задачу по рисунку. Найти коэффициент полезного действия.*

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. **Работа** – это процесс изменения состояния тела под действием силы.
2. **Работой (элементарной работой) силы $\vec{F}$ на перемещении** $\Delta\vec{r}$ называется физическая величина, равная скалярному произведению силы на перемещение.
   Работа обозначается буквой ΔA, работа – скалярная величина, равная $\Delta A = \left(\vec{F} \cdot \Delta\vec{r}\right)$.
3. Сила, совершающая положительную работу, называется движущей силой. Сила, совершающая отрицательную работу, называется силой сопротивления. Сила перпендикулярная перемещению работы не совершает.
4. Работа движущей силы всегда положительная величина.
   Работа силы сопротивления всегда отрицательная величина.
   Работа силы, перпендикулярной перемещению всегда равна нулю.
5. *Если на тело действует несколько сил, то полная работа (работа всех сил) равна работе результирующей силы*.

6. Сила, работа которой не зависит от формы траектории, а зависит только от положения начальной и конечной точек траектории, называется ***консервативной силой***.
7. **Работа силы тяжести по замкнутому пути равна нулю.** Работа силы тяжести не зависит от формы траектории, а зависит только от положения начальной и конечной точек траектории. Сила тяжести – это консервативная сила.
8. ***Работа силы упругости*** зависит только от начального и конечного удлинения пружины***. Сила упругости – это консервативная сила.***
9. Мощность характеризует быстроту совершения работы. ***Мощность*** – это работа, которую совершает сила за единицу времени***:***

$$N_{cp} = \frac{\Delta A}{\Delta t},$$

где N_{cp} – средняя мощность, ΔA – работа силы за время Δt.

10. **Мгновенная мощность** – это мощность в данный момент времени.

$$N = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta A}{\Delta t}.$$

Элементарная работа $\Delta A = \left(\vec{F} \cdot \Delta\vec{r}\right)$,

тогда $N = \lim\limits_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta A}{\Delta t} = \lim\limits_{\Delta t \to 0} \frac{(\vec{F} \cdot \Delta\vec{r})}{\Delta t} = (\vec{F} \cdot \vec{v}) = \left|\vec{F}\right| \cdot \left|\vec{v}\right| \cos\alpha$, где

$\vec{v} = \lim\limits_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$ – мгновенная скорость.

Мгновенная мощность равна скалярному произведению силы на скорость движения тела.

11. Работа, которую совершают силы при отсутствии сил сопротивления, называется ***полезной работой***.
12. Отношение полезной работы к полной работе называется ***коэффициентом полезного действия (КПД)***

$$КПД = \eta = \frac{\text{полезная работа}}{\text{полная работа}} = \frac{A_{пол}}{A}$$

(η – греческая буква «этта»).

ТЕМА 7. **КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ**

Новые слова и словосочетания	
энергия	кинетическая
количественная мера	способность
внешние силы	теорема

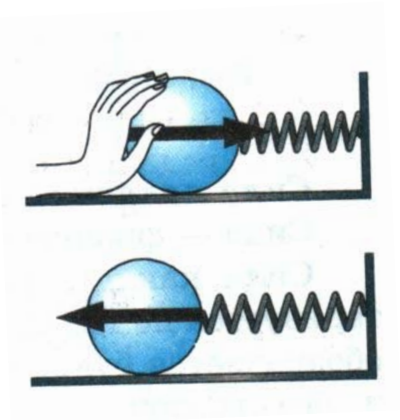
Основным свойством материи является движение. Для количественной характеристики любых форм движения в физике введено понятие ***энергия***.

Энергия – это общая количественная мера движения материи и взаимодействия всех ее видов.

Запас энергии, которой обладает тело, определяется максимальной работой, которую может совершить тело, если израсходует свою энергию полностью. Поэтому, энергия тела численно равна максимальной работе, которую тело может совершить, полностью израсходовав свою энергию.

Если тело в данных условиях способно совершать механическую работу, значит, оно обладает механической энергией.

Например, сжатая (растянутая) пружина может изменить положение тела, прикрепленного к ней. Значит, сжатая пружина обладает способностью совершать механическую работу. Если тело (или система тел) может совершать работу, то это тело обладает энергией. Сжатая пружина обладает энергией.



Совершая механическую работу, пружина переходит из одного состояния в другое. Например, пружина распрямляется, движущееся тело останавливается. При совершении работы энергия пружины изменяется. Чтобы пружина снова получила способность совершать работу, нужно изменить её состояние: деформировать пружину. Для этого внешние силы должны над пружиной (системой тел) совершить положительную работу.

Таким образом, изменение энергии тела (или системы тел) численно равно работе, которую совершают силы, приложенные к телу (или системе тел): $A = \pm\Delta E$ или $A = \pm(E - E_0)$, где E_0 – начальная энергия тела (или системы тел) до совершения работы, E – конечная энергия тела (или системы тел) после совершения работы, A – работа сил, приложенных к телу (или системе тел).

<u>Изменение энергии при переходе системы из одного состояния в другое равно работе, совершаемой за это время силой, действующей на тело.</u>

Механическая энергия – физическая величина, которая характеризует способность тела или системы тел совершать механическую работу. Различают два вида механической энергии: потенциальную энергию (энергию взаимодействия) и кинетическую энергию (энергию движения).

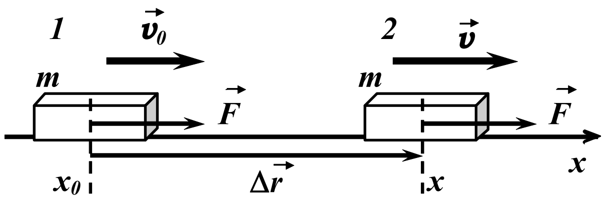
Кинетическая энергия и ее изменение

Кинетическая энергия – это энергия, которой обладает тело (или система тел) при механическом движении.

Кинетическая энергия – это энергия движения. Тело, которое движется, обладает кинетической энергией и способно совершить работу.

Если тело массой m движется прямолинейно под действием равнодействующей постоянной силы $\vec{F}$, то сила совершает работу. Тело в начальный момент времени двигалось со скоростью $\vec{\upsilon}_0$ и имело начальную кинетическую энергию E_{k_1}. Так как на тело действует сила $\vec{F}$, то скорость тела меняется, поэтому кинетическая энергия тела тоже меняется. Кинетическая энергия в конечном состоянии E_{k_2}. Работа любой силы ведет к изменению кинетической энергии тела $A = E_{k2} - E_{k1} = \Delta E_k$.

Тело движется прямолинейно, поэтому направление силы $\vec{F}$ и перемещения $\Delta\vec{r}$ совпадают. При перемещении тела на $\Delta\vec{r}$ его скорость меняется от $\vec{\upsilon}_0$ до $\vec{\upsilon}$. Пусть ось x направлена так, чтобы векторы $\vec{F}$, $\vec{\upsilon}_0$, $\vec{\upsilon}$ и $\Delta\vec{r}$ были направлены по ней. Тогда



работа силы $\vec{F}$ равна $A = F\left|\Delta\vec{r}\right| = F\Delta x$, $\Delta x = x - x_0$. Под действием постоянной силы тело перемещалось с постоянным ускорением $\vec{a}$. По второму закону Ньютона $a = \dfrac{F}{m}$. Причем в нашем случае $\left|\vec{a}\right| = a_x = a$. Из уравнений кинематики

$$S = \Delta x = \frac{\upsilon^2 - \upsilon_0^2}{2a}.$$

Тогда
$$A = F\Delta x = F\frac{\upsilon^2 - \upsilon_0^2}{2a} = \frac{m\upsilon^2}{2} - \frac{m\upsilon_0^2}{2}.$$

Величину, равную половине произведения массы тела на квадрат его скорости, называют кинетической энергией. Обозначим кинетическую энергию E_k

$$E_k = \frac{m\upsilon^2}{2}.$$

Учитывая определение кинетической энергии, выражение для работы можно записать

$$A = E_{k2} - E_{k1} = \Delta E_k,$$

где ΔE_k – изменение кинетической энергии, E_{k_2} – кинетическая энергия тела в состоянии 2, E_{k_1} – кинетическая энергия в состоянии 1.

Таким образом, ***изменение кинетической энергии тела за некоторый промежуток времени равно работе, совершаемой за это время силой, действующей на тело*** (**теорема об изменении кинетической энергии, теорема о кинетической энергии**).

Увеличение кинетической энергии происходит за счет положительной работы сил, действующих на тело. Положительная работа сил всегда приводит к увеличению кинетической энергии тела.

Уменьшение кинетической энергии свидетельствует о том, что совершается работа против сил, действующих на тело.

Из теоремы о кинетической энергии, при $\vec{\upsilon}_0 = 0$, получим $A = E_k = \dfrac{m\upsilon^2}{2}$.

Кинетическая энергия определяется массой тела и его скоростью, она не зависит от того, взаимодействует ли тело с другими телами. Кинетическая энергия не зависит от вида траектории тела.

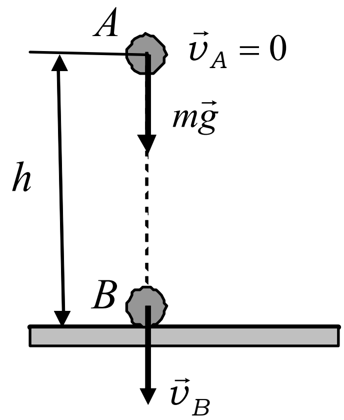
Кинетическая энергия тела массой m, движущегося со скоростью $\vec{\upsilon}$, равна работе, которую нужно совершить, чтобы сообщить телу эту скорость. Тело, движущееся со скоростью $\vec{\upsilon}$, обладает кинетической энергией $E_k = \dfrac{m\upsilon^2}{2}$ и способно совершить работу, равную изменению кинетической энергии $E_{k2} - E_{k1} = \Delta E_k = A$.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Кинетической энергией тело может обладать и тогда, когда силы на него или не действуют, или силы скомпенсированы. Если тело движется равномерно и прямолинейно, оно обладает кинетической энергией.

Теорему о кинетической энергии можно использовать для определения скорости тела.

Пример. Применим теорему о кинетической энергии к определению скорости свободно падающего тела в момент его падения на Землю.



Тело массой m свободно падает с высоты h под действием силы тяжести $\vec{F} = m\vec{g}$. По теореме о кинетической энергии, работа силы тяжести равна изменению кинетической энергии $A = E_{k2} - E_{k1} = \Delta E_k$. С другой стороны работа силы тяжести равна $A = |m\vec{g}| \cdot |\Delta\vec{r}| \cdot \cos\alpha = mgh$. Изменение кинетической энергии тела при падении на Землю равно

$$\Delta E_k = E_{kB} - E_{kA} = \frac{m\upsilon_B^2}{2} - 0 = \frac{m\upsilon_B^2}{2}.$$

Тогда $mgh = \dfrac{m\upsilon_B^2}{2}$ и $\upsilon_B = \sqrt{2gh}$.

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Слушайте, читайте, повторяйте.*

Энергия; кинетическая энергия; тело имеет энергию; тело обладает энергией; тело способно совершить работу; сила совершает работу по изменению энергии тела.

Кинетическая энергия; энергия движения; движущееся тело способно совершить работу; начальная энергия; энергия в начальный момент времени; энергия в конечный момент времени; теорема о кинетической энергии; теорема об изменении кинетической энергии тела.

Упражнение 2. *Решите задачи.*

1. Тело массой 3 кг двигается равнозамедленно по горизонтальной плоскости. Начальная скорость тела 10 м/с, коэффициент трения 0,2. Какую работу совершает сила трения за время движения тела? Каково изменение кинетической энергии тела?

2. На тело массой 2 кг начала действовать постоянная сила F = 5 Н. Начальная скорость тела равна нулю. Определить кинетическую энергию тела через 2 с движения.

3. Тело массой 10 кг свободно падает с высоты 80 м. Определить кинетическую энергию тела на высоте 20 м над Землей и в момент падения на Землю. Доказать, что изменение кинетической энергии при движении равно работе силы, действующей на тело.

4. Тело массой 5 кг брошено вертикально вверх со скоростью 20 м/с. Чему равна кинетическая энергия тела в момент времени 1 с и в верхней точке траектории? Доказать, что изменение кинетической энергии при движении равно работе силы, действующей на тело.

5. Тело массой 0,5 кг, брошенное вертикально вверх, упало на Землю через 8 с. Определить кинетическую энергию в момент бросания. Сопротивление воздуха не учитывать.

6. Шарик массой 100 г, подвешенный на нити длиной 40 см, описывает в горизонтальной плоскости окружность. Какова кинетическая энергия шарика, если во время движения нить образует с вертикалью угол 60°?

7. Камень массой 200 г брошен с горизонтальной поверхности под некоторым углом к горизонту и через 1,2 с упал на неё на расстоянии 5 м . Найти работу, совершенную при бросании.

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. ***Энергия*** – это общая количественная мера движения материи и взаимодействия всех ее видов.
2. **Механическая энергия** – физическая величина, которая характеризует способность тела или системы тел совершать механическую работу. Она характеризует механическое движение и взаимодействие тел.
3. Изменение энергии при переходе системы из одного состояния в другое равно работе внешних сил. $A = \pm\Delta E$ или $A = \pm(E - E_0)$, где E_0 – начальная энергия тела (или системы тел) до совершения работы, E – конечная энергия тела (или системы тел) после совершения работы, A – работа сил, приложенных к телу (или системе тел).
4. **Кинетическая энергия** – это энергия, которой обладает тело (или система тел) при механическом движении.
   Кинетическая энергия – это энергия движения. Тело, которое движется, обладает кинетической энергией и способно совершить работу.
5. Изменение кинетической энергии тела за некоторый промежуток времени равно работе, совершаемой за это время силой, действующей на тело (теорема об изменении кинетической энергии). $A = E_{k_1} - E_{k_2} = \Delta E_k$,
   где ΔE_k – изменение кинетической энергии, E_{k_2} – кинетическая энергия тела в состоянии 2, E_{k_1} – кинетическая энергия в состоянии 1.
6. Кинетическая энергия тела массой m, движущегося со скоростью $\vec{\upsilon}$, равна работе, которую нужно совершить, чтобы сообщить телу эту скорость. Тело, движущееся со скоростью $\vec{\upsilon}$, обладает кинетической энергией $E_k = \dfrac{m\upsilon^2}{2}$ и способно совершить работу, равную изменению кинетической энергии.

ТЕМА 8. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

Новые слова и словосочетания	
потенциальный	консервативный
взаимодействие	утверждать
утверждение	доказывать
уровень	убыль

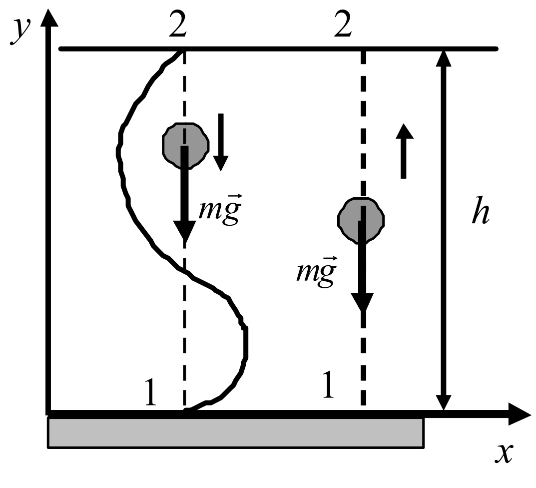
Потенциальная энергия – это энергия, которой обладает тело вследствие того, что оно находится в силовом поле, или вследствие взаимодействия с другими телами. Понятие потенциальной энергии вводится только для силовых полей консервативных сил.

Работа консервативной силы не зависит от формы пути, а определяется только положениями начальной и конечной точек пути в данном силовом поле. Поэтому каждую точку поля можно характеризовать потенциальной энергией. Тогда работа консервативной силы определяется изменением потенциальной энергии.

А изменение энергии при переходе тела (системы те) из одного положения (состояния) в другое равно работе, совершаемой за это время силой, действующей на тело.

Таким образом, потенциальная энергия зависит от положения тел друг относительно друга или частей тела относительно друг друга. Потенциальной энергией обладают тела, которые взаимодействуют с силами, зависящими от положения тел или частей тела относительно друг друга. К таким силам относятся сила тяжести, сила упругости, сила гравитации. Сила тяжести, сила упругости, сила гравитации – это консервативные силы.

В зависимости от характера сил, действующих на тело, выражение, определяющее потенциальную энергию, может быть разным.



8.1. Работа силы тяжести и потенциальная энергия тела, поднятого над Землей

1. Силы, работа которых не зависит от траектории, а зависит только от начального и конечного положения тела, называют консерватив-

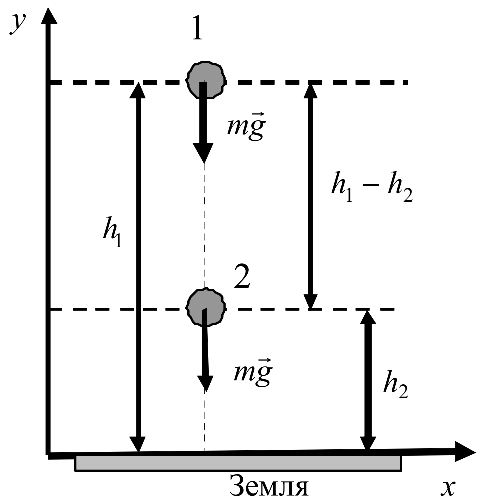
ными.

Сила тяжести – консервативная сила. Докажем это утверждение.

Пусть тело массой m перемещается из точки 1 в точку 2 вертикально вверх: работа силы тяжести в этом случае $A_{1\to 2} = |m\vec{g}| \cdot |\Delta\vec{r}| \cdot \cos\alpha = -mgh$. Затем тело перемещается по криволинейной траектории из точки 2 в точку 1. Работа силы тяжести в этом случае $A_{2\to 1} = |m\vec{g}| \cdot |\Delta\vec{r}| \cdot \cos\alpha = mgh$. Таким образом, величина работы силы тяжести не зависит от формы траектории.

Работа силы тяжести по замкнутой траектории 1–2–1 равна сумме работ на пути 1–2 и 2–1: $A_{1\to 2\to 1} = (-mgh) + mgh = 0$ – это ещё один признак того, что в данном силовом поле действует консервативная сила.

Силы, работа которых на замкнутой траектории равна нулю и не зависит от формы траектории, называются консервативными.



2. Работа консервативной силы не зависит от формы пути, а определяется только положениями начальной и конечной точек пути в данном силовом поле. Поэтому каждую точку поля можно характеризовать потенциальной энергией. Тогда работа консервативной силы определяется изменением потенциальной энергии. Найдем связь между работой силы тяжести и изменением потенциальной энергии тела.

Пусть тело массой m движется в поле силы тяжести из точки 1 в точку 2. Работа силы тяжести при этом равна:

$$A = F|\Delta\vec{r}|\cos\alpha = mg|\Delta\vec{r}|\cos\alpha = mg(h_1 - h_2) \text{ или}$$

$$A = mg(h_1 - h_2) = -(mgh_2 - mgh_1)$$

– работа консервативной силы определяется изменением потенциальной энергии.

Правая часть полученного выражения представляет собой изменение величины mgh при перемещении тела под действием силы тяжести из точки с координатой h_1 в точку с координатой h_2. **Величину** mgh **называют потенциальной энергией тела, поднятого на высоту *h* над нулевым уровнем или потенциальной энергией в поле силы тяжести.** *Нулевой уровень энергии* $E_{p0} = const = 0$ – это уровень, который выбирается как начало отсчета потенциальной энергии (в данном случае

– высоты тела). *Нулевой уровень выбирают произвольно.* Тогда $E_p = mgh + E_{p0}$; $E_{p0} = const = 0$.

Выберем нулевой уровень потенциальной энергии на поверхности Земли.

Тогда потенциальная энергия тела в точке 1 равна: $E_{p1} = mgh_1 + E_{p0}$, а потенциальная энергия тела в точке 2 равна: $E_{p2} = mgh_2 + E_{p0}$. Работа силы тяжести при перемещении тела под действием силы тяжести из точки 1 в точку 2 равна:

$$A = mg(h_1 - h_2) = -(mgh_2 - mgh_1) = -(E_{p2} - E_{p1}) = -\Delta E_p.$$

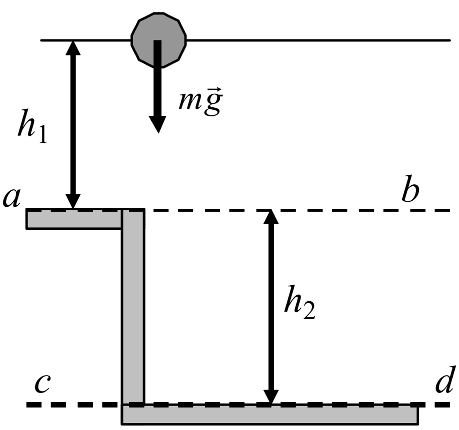
Работа силы тяжести (консервативной силы) равна минус изменению (приращению) потенциальной энергии.

Изменение энергии тела (или системы тел) численно равно работе, которую совершают силы, приложенные к телу (или системе тел): $A = -\Delta E_p$ или $A = -(E_{p2} - E_{p1})$, где E_{p1} – начальная энергия тела (до совершения работы), E_{p2} – конечная энергия тела (после совершения работы), A – работа консервативных сил, приложенных к телу.

Если работа силы тяжести отрицательна, потенциальная энергия увеличивается $E_{p_2} > E_{p_1}$, при совершении положительной работы потенциальная энергия уменьшается $E_{p_2} < E_{p_1}$. Или работа силы тяжести совершается за счет **убыли** потенциальной энергии.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

В зависимости от выбора нулевого уровня значение потенциальной энергии тела может быть разным.

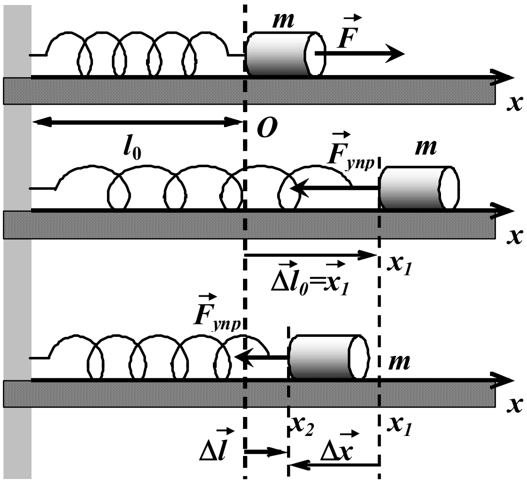


Пример 1. Тело массой m обладает потенциальной энергией $E_p = mgh_1$, если за нулевой уровень потенциальной энергии выбрана поверхность *ab*. Это же тело имеет потенциальную энергию $E_p = mg(h_1 + h_2)$, если за нулевой уровень потенциальной энергии выбрана поверхность *cd*.

Пример 2. Если за нулевой уровень потенциальной энергии выберем поверхность *ab*, то тело, находящееся на высоте h_1 имеет потенциальную энергию $E_p = mgh_1$ (потенциальная энергия положительная величина). Если тело опустить на поверхность *cd*, то его потенциальная энергия относительно поверхности *ab* станет равна $E_p = -mgh_2$ (потенциальная энергия величина отрицательная).

Таким образом, **потенциальная энергия тела в поле силы тяжести зависит от его положения относительно тела отсчета (от выбора нулевого уровня отсчета). Поэтому потенциальная энергия – относительная величина. Она может быть положительной и отрицательной.**

8.2. Работа силы упругости. Потенциальная энергия упругой деформации



Рассчитаем работу силы упругости пружины. Пусть на нерастянутую пружину длиной l_0 действует внешняя сила $\vec{F}$. После того, как удлинение Δl пружины станет равно x_1, сила прекращает свое действие. В результате действия силы упругости $\vec{F}_{упр} = -k\vec{x}_1$, направленной к положению равновесия O, пружина сжимается.

Найдем работу силы упругости при изменении координаты тела m от x_1 до x_2. Модуль перемещения тела m равен $\Delta x = x_1 - x_2$. Так как сила упругости при изменении деформации пружины от x_1 до x_2 изменилась от $F_{упр_0} = kx_1$ до $F_{упр} = kx_2$, то можно использовать ее среднее значение

$$F_{упр\ ср} = \frac{kx_1 + kx_2}{2} = \frac{k}{2}(x_1 + x_2).$$

Так как направление средней силы упругости $\vec{F}_{упр\ ср}$ и перемещения $\Delta\vec{x}$ совпадают, то работа силы упругости

$$A_{упр} = F_{упр\ ср}\Delta x = \frac{k}{2}(x_1 + x_2)(x_1 - x_2) = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}.$$

Работа силы упругости зависит только от начального и конечного удлинения пружины. Работа силы упругости по замкнутому пути будет равна нулю, если пружина вернется в начальное состояние:

$$A_{сжатие} + A_{растяжение} = (\frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}) + (\frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}) = 0$$

Сила упругости – консервативная сила.

> ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!
>
> Работа силы упругости зависит только от начального и конечного удлинения пружины.

Правая часть полученного выражения $A_{упр} = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}$ представляет собой изменение величины $\frac{kx^2}{2}$ при перемещении тела под действием силы упругости из точки с координатой x_1 в точку с координатой x_2. **Величину $\frac{kx^2}{2}$ называют потенциальной энергией упруго деформированной пружины, относительно нулевого уровня или потенциальной энергией упругой деформации.** *Нулевой уровень энергии* $E_{p0} = const = 0$ – это уровень, который выбирается как начало отсчета потенциальной энергии (в данном случае – деформации пружины). *Нулевой уровень выбирают произвольно.* Тогда $E_p = \frac{kx^2}{2} + E_{p0}$; $E_{p0} = const = 0$.

Выберем нулевой уровень потенциальной энергии в точке 0 (когда пружина не деформирована).

Тогда потенциальная энергия тела в точке 1 равна: $E_{p1} = \frac{kx_1^2}{2} + E_{p0}$, а потенциальная энергия тела в точке 2 равна: $E_{p2} = \frac{kx_2^2}{2} + E_{p0}$. Работа силы упругости при перемещении тела из точки 1 в точку 2 равна:

$$A_{упр} = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2} = -\left(\frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}\right) = -(E_{p2} - E_{p1}) = -\Delta E_p.$$

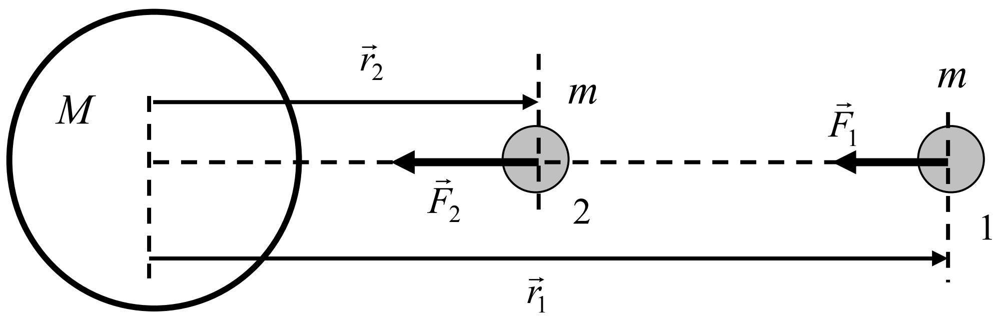
Работа силы упругости (консервативной силы) равна минус изменению (приращению) потенциальной энергии.

Изменение энергии тела (или системы тел) численно равно работе, которую совершают силы, приложенные к телу (или системе тел): $A = -\Delta E_p$ или $A = -(E_{p2} - E_{p1})$, где E_{p1} – начальная энергия тела (до совершения работы), E_{p2} – конечная энергия тела (после совершения работы), A – работа консервативных сил, приложенных к телу.

Если работа силы упругости отрицательна (растяжение пружины), потенциальная энергия увеличивается $E_{p_2} > E_{p_1}$, при совершении силой упругости положительной работы (сжатие пружины) потенциальная энергия уменьшается $E_{p_2} < E_{p_1}$. Или работа силы упругости совершается за счет **убыли** потенциальной энергии.

8.3. Работа гравитационной силы. Потенциальная энергия тела в поле гравитационных сил

Гравитационное поле (поле тяготения) – это пространство, в каждой точке которого действует сила гравитации. Если тело массой M создает гравитационное поле, то на любое тело, помещенное в это поле, действует сила тяготения.



Взаимодействие двух материальных тел массами M и m, находящихся на расстоянии r друг от друга, подчиняется закону всемирного тяготения $\vec{F} = -\gamma \dfrac{Mm}{r^3}\vec{r}$, где γ – гравитационная постоянная ($\gamma = 6{,}67\cdot 10^{-11}$ $Н\cdot м^2/кг^2$). Знак минус в этой формуле указывает на то, что направление силы $\vec{F}$ и радиус-вектора $\vec{r}$ противоположны.

Работа гравитационной силы при перемещении тела из положения 1 в положение 2 равна:

$$A = \int_1^2 \left(\vec{F}\cdot d\vec{r}\right) = \int_{r_1}^{r_2} F\cdot dr = -\int_{r_1}^{r_2} \gamma \frac{Mm}{r^2}dr = -\gamma Mm\int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r^2}dr = -\gamma Mm\left(-\frac{1}{r_2}+\frac{1}{r_1}\right).$$

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Работа гравитационной силы не зависит от формы пути, а зависит только от положения начальной и конечной точек в гравитационном поле. **Гравитационная сила – консервативная сила, значит можно гравитационное поле характеризовать потенциальной энергией.**

Полученное выражение можно переписать в виде:

$$A = -\gamma \frac{Mm}{r_1} - \left(-\gamma \frac{Mm}{r_2} \right) = E_{p1} - E_{p2} = -(E_{p2} - E_{p1}) = -\Delta E_p .$$

Таким образом, потенциальная энергия тела массой m, находящееся на расстоянии r в гравитационном поле, созданном телом массой M, равна $E_p = -\gamma \dfrac{Mm}{r} + E_{p0}$, где E_{p0} – нулевой уровень потенциальной энергии.

Работа гравитационной силы равна убыли потенциальной энергии.

Потенциальную энергию гравитационного взаимодействия двух материальных точек, разнесённых на бесконечность, принято считать равной нулю. В таком случае говорят, что выбран нулевой уровень отсчета потенциальной энергии. Если нулевой уровень определен, то потенциальная энергия определена однозначно. При выбранном уровне ($E_p(\infty) = 0$) гравитационная потенциальная энергия материальной точки величина отрицательная: $E_p = -\gamma \dfrac{Mm}{r}$.

Итак, мы показали, что сила тяжести, сила гравитации и сила упругости – это консервативные силы. Для полей этих сил можно ввести понятие потенциальной энергии. **Работа консервативных сил равна убыли потенциальной энергии** $A_{конс} = -\Delta E_p$.

Потенциальная энергия определяется силой, действующей на тело со стороны другого тела. Но взаимодействующие тела равноправны. Поэтому потенциальной энергией обладают только взаимодействующие тела.

Потенциальная энергия – это энергия взаимодействия тел.

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Слушайте, читайте, повторяйте.*

Сила; силовое поле; консервативная сила; неконсервативная сила; диссипативная сила. Сила взаимодействия; сила, действующая со стороны другого тела; сила притяжения; сила отталкивания.

Работа силы не зависит от формы траектории; работа силы зависит от формы пути; работа силы зависит только от положения начальной и конечной точек пути.

Поле консервативных сил; поле консервативных сил можно характеризовать потенциальной энергией.

Потенциальная энергия – энергия взаимодействия.

Нулевой уровень энергии; потенциальная энергия – относительная величина. Потенциальная энергия может быть положительной; потенциальная энергия может быть отрицательной; потенциальная энергия может быть равной нулю.

Упражнение 2. *Решите задачи.*

1. Для сжатия пружины на 3 см приложили силу, равную 20 Н. Найти потенциальную энергию сжатой пружины. На сколько увеличится её энергия при увеличении сжатия до 6 см?

2. Тело, брошенное вертикально вверх, вернулось на Землю через 8 с. Определить потенциальную энергию тела в точке наибольшего подъёма. Масса тела 0,5 кг.

3. Тело массой 1 кг имеет потенциальную энергию 9,8 Дж. На какую высоту над Землей поднято тело, если нулевой уровень потенциальной энергии находится на поверхности Земли?

4. Какую работу против силы тяжести совершает штангист, поднимая штангу массой 200 кг на высоту 2 м?

5. Землекоп, выкапывая яму глубиной 1 м, длиной 2 м и шириной 1м, выбрасывает землю на уровень земли. Считая плотность земли равной $2 \cdot 10^3$ кг/м^3, найдите изменение потенциальной энергии выброшенной из ямы земли и минимальную работу, совершенную землекопом.

6. Найти работу, которую нужно совершить, чтобы положить друг на друга в одну стопку пять книг, лежащих отдельно на столе высотой 1 м. Масса каждой книги 2 кг, толщина 10 см.

7. В цилиндрической бочке находится 200 л воды. Высота столба воды в бочке 1 м. Найдите изменение потенциальной энергии воды после её вытекания из бочки на поверхность Земли.

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. **Потенциальная энергия** – это энергия, которой обладает тело вследствие того, что оно находится в силовом поле, или вследствие взаимодействия с другими телами.
2. Понятие потенциальной энергии вводится только для силовых полей консервативных сил.
3. Силы, работа которых на замкнутой траектории равна нулю и не зависит от формы траектории, называются **консервативными.**
4. Работа силы тяжести (консервативной силы) равна минус изменению (приращению) потенциальной энергии.
$$A = mg(h_1 - h_2) = -(mgh_2 - mgh_1) = -(E_{p2} - E_{p1}) = -\Delta E_p .$$
5. Величину mgh называют потенциальной энергией тела, поднятого на высоту h над нулевым уровнем или потенциальной энергией в поле силы тяжести. *Нулевой уровень энергии* $E_{p0} = const = 0$ – это уровень, который выбирается как начало отсчета потенциальной энергии (в данном случае – высоты тела). *Нулевой уровень выбирают произвольно.* Тогда $E_p = mgh + E_{p0}$; $E_{p0} = const = 0$.
6. Потенциальная энергия тела в поле силы тяжести зависит от его положения относительно тела отсчета (от выбора нулевого уровня отсчета). Поэтому потенциальная энергия – относительная величина. Она может быть положительной и отрицательной.
7. Сила упругости – консервативная сила.

8. Работа силы упругости (консервативной силы) равна минус изменению (приращению) потенциальной энергии.

$$A_{упр}=\frac{kx_1^2}{2}-\frac{kx_2^2}{2}=-\left(\frac{kx_2^2}{2}-\frac{kx_1^2}{2}\right)=-(E_{p2}-E_{p1})=-\Delta E_p$$

9. Гравитационная сила – консервативная сила. Работа гравитационной силы равна минус изменению потенциальной энергии. $A=-\gamma\frac{Mm}{r_1}-\left(-\gamma\frac{Mm}{r_2}\right)=E_{p1}-E_{p2}=-(E_{p2}-E_{p1})=-\Delta E_p$

10. **Работа консервативных сил равна убыли потенциальной энергии** $A_{конс}=-\Delta E_p$.

ТЕМА 9. **<u>ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ</u>**

Новые слова и словосочетания

убыль	уменьшение
замкнутая система	диссипативные силы
сторонние силы	внутренние силы
внешние силы	

Закон сохранения механической энергии материальной точки

Силы, работа которых не зависит от формы траектории, а зависит только от начального и конечного положения тела, называются консервативными. При перемещении материальной точки или тела *по замкнутой траектории работа консервативных сил равна нулю.*

Силы, работа которых зависит от формы траектории, называют неконсервативными. При перемещении материальной точки или тела *по замкнутой траектории работа неконсервативной силы не равна нулю.* К неконсервативным силам относятся диссипативные силы – это силы трения и силы сопротивления. Пример: работа силы трения: $A_{тр} = \left|\vec{F}_{тр}\right| \cdot \left|\Delta\vec{r}\right| \cdot \cos\alpha = -F_{тр} \cdot S$; работа силы трения тем больше, чем длиннее траектория.

Закон сохранения и изменения механической энергии материальной точки

Если на материальную точку действуют силы, то для результирующей силы можно записать: $\vec{F} = \vec{F}_{конс} + \vec{F}_{стор}$, где $\vec{F}_{конс}$ – консервативные силы, $\vec{F}_{стор}$ – сторонние силы (любые другие силы). Сторонние силы могут быть неконсервативными. (Важно, что для сторонних сил нельзя ввести понятие потенциальной энергии).

Согласно теореме о кинетической энергии, работа всех сил, действующих на материальную точку, равна приращению кинетической энергии материальной точки: $\Delta E_k = A$, где ΔE_k – приращение кинетической энергии $\Delta E_k = E_{k2} - E_{k1}$, A – работа всех сил, которые действуют на материальную точку.

Для результирующей силы можно записать: $\vec{F} = \vec{F}_{конс} + \vec{F}_{стор}$. Работа всех сил равна сумме работ консервативных и сторонних сил: $A = A_{конс} + A_{стор}$. Тогда $\Delta E_k = A = A_{конс} + A_{стор}$.

Так как работа консервативных сил равна убыли потенциальной энергии, то можно записать $A_{конс} = -\Delta E_p = E_{p1} - E_{p2}$.

Тогда $\Delta E_k = -\Delta E_p + A_{стор}$. Или $\Delta(E_k + E_p) = A_{стор}$. Значит работа сторонних сил (неконсервативных) идет на приращение величины $E_k + E_p$. **Эту величину называют полной механической энергией материальной точки** и обозначают буквой *E*.

Сумма кинетической и потенциальной энергии материальной точки – это полная механическая энергии точки $E = E_k + E_p$.

Изменение механической энергии материальной точки равно работе сторонних сил: $\Delta E = A_{стор}$**. Это уравнение выражает закон изменения механической энергии.**

Если сторонних сил нет или работа сторонних сил равна нулю, то механическая энергия материальной точки сохраняется: $\Delta E = 0$ **или** $E = const$ **– закон сохранения механической энергии.**

Закон сохранения и изменения полной механической энергии системы материальных точек (тел)

Рассмотрим систему тел. На тела системы могут действовать внутренние и внешние силы. **Внутренние силы** – это силы взаимодействия между телами системы. **Внешние силы** – это силы, действующие со стороны тел, не входящих в систему.

Система тел, на которую не действуют внешние силы, называется замкнутой.

Внутренние и внешние силы могут быть консервативными и неконсервативными.

Работа консервативных сил связана с изменением потенциальной энергии. Если силы консервативны, то поле этих сил потенциально.

Работа внутренних консервативных сил равна убыли потенциальной энергии системы. Эта энергия зависит от взаимодействия тел внутри системы и называется собственной энергией системы.

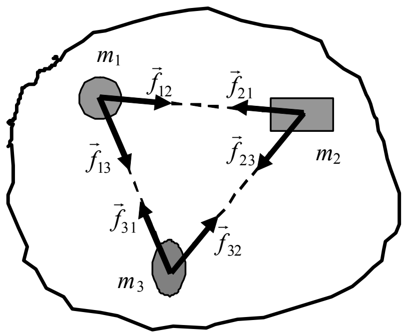
$$A_{внутр.конс} = -(\Delta E_p)_{собств.}$$

Работа внешних консервативных сил равна убыли потенциальной энергии системы в поле внешних консервативных сил:

$$A_{внеш.конс} = -(\Delta E_p)_{внеш.}.$$

Кинетическая энергия системы тел равна сумме кинетических энергий всех тел системы: $E_k = \sum E_{ki}$.

1. Рассмотрим **замкнутую систему,** состоящую из тел массами m_1 и m_2 и m_3, которые можно принять за материальные точки. На тела системы действуют только **внутренние** силы: $\vec{f}_{12}$ и $\vec{f}_{13}$ – силы, действующие на тело массой m_1 со стороны второго и третьего тела; $\vec{f}_{21}$ и $\vec{f}_{23}$ – силы, действующие на тело массой m_2 со стороны первого и третьего тела; $\vec{f}_{31}$ и $\vec{f}_{32}$ – силы, действующие на тело массой m_3 со стороны первого и второго тела.



Разделим внутренние силы на консервативные и диссипативные (силы трения и сопротивления). Работа внутренних сил тогда равна $A_{внутр} = A_{внутр.конс} + A_{внутр.дисс.}$. Приращение кинетической энергии системы равно работе, которую совершают все силы, действующие на систему тел: $\Delta E_k = A$. Представим работу всех сил в виде: $A = A_{внутр.конс} + A_{внутр.дисс.}$.

Для приращения кинетической энергии запишем:

$$\Delta E_k = A_{внутр.конс} + A_{внутр.дисс.},$$

так как $A_{внутр.конс} = -(\Delta E_p)_{собств.}$, то $\Delta E_k = -(\Delta E_p)_{собств.} + A_{внутр.дисс.}$, или $\Delta\left[E_k + (E_p)_{собств}\right] = A_{внутр.дисс.}$, где E_k – кинетическая энергия системы, $(E_p)_{собств}$ – собственная потенциальная энергия системы, $A_{внутр.дисс.}$ – работа внутренних диссипативных сил.

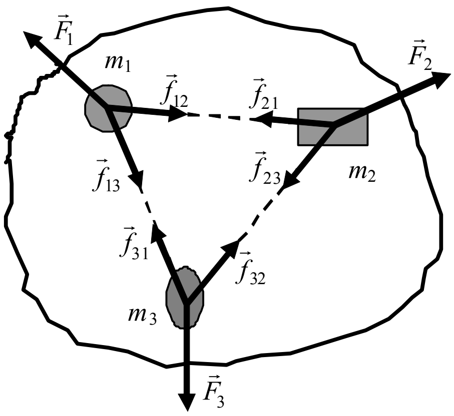
Обозначим $\left[E_k + (E_p)_{собств}\right] = E$ – полная механическая энергия системы, равная сумме кинетической и собственной потенциальной энергии системы.

Тогда **приращение полной механической энергии замкнутой системы равно алгебраической сумме работ всех внутренних диссипативных сил:** $\Delta E = A_{внутр.дисс.}$.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Изменение механической энергии замкнутой системы происходит только при действии в системе диссипативных сил.

Если в замкнутой системе действуют только консервативные силы, то $\Delta E = 0$, а $E = const$. ***Полная механическая энергия замкнутой системы, в которой действуют только консервативные силы, сохраняется.*** **(Закон сохранения полной механической энергии).**



2. Рассмотрим <u>**незамкнутую систему,**</u> состоящую из тел массами m_1 и m_2 и m_3, которые можно принять за материальные точки. На тела системы действуют <u>**внутренние**</u> силы: $\vec{f}_{12}$ и $\vec{f}_{13}$ – силы, действующие на тело массой m_1 со стороны второго и третьего тела; $\vec{f}_{21}$ и $\vec{f}_{23}$ – силы, действующие на тело массой m_2 со стороны первого и третьего тела; $\vec{f}_{31}$ и $\vec{f}_{32}$ – силы, действующие на тело массой m_3 со стороны первого и второго тела. На тела системы кроме внутренних сил действуют ещё <u>**внешние**</u> силы: на первое тело – сила $\vec{F}_1$, на второе тело – сила $\vec{F}_2$, на третье тело – сила $\vec{F}_3$.

Разделим **внутренние силы на консервативные и диссипативные** (силы трения и сопротивления). Работа внутренних сил тогда равна $A_{внутр} = A_{внутр.конс} + A_{внутр.дисс.}$. Приращение кинетической энергии системы равно работе, которую совершают все силы, действующие на систему тел: $\Delta E_k = A$. Представим работу всех сил в виде: $A = A_{внутр.конс} + A_{внутр.дисс.} + A_{внеш}$.

Для приращения кинетической энергии запишем:

$\Delta E_k = A_{внутр.конс} + A_{внутр.дисс.} + A_{внеш}$, так как $A_{внутр.конс} = -(\Delta E_p)_{собств.}$, то

$$\Delta E_k = -(\Delta E_p)_{собств.} + A_{внутр.дисс.} + A_{внеш},$$

или $\Delta\left[E_k + (E_p)_{собств}\right] = A_{внутр.дисс.} + A_{внеш}$, где E_k – кинетическая энергия системы, $(E_p)_{собств}$ – собственная потенциальная энергия системы,

$A_{внутр.дисс.}$ – работа внутренних диссипативных сил, $A_{внеш}$ – работа внешних сил.

Обозначим $E_k + (E_p)_{собств} = E$, тогда $\Delta E = A_{внутр.дисс.} + A_{внеш}$.

Разделим теперь **внешние силы на консервативные и неконсервативные** (сторонние, все остальные). Тогда

$$\Delta E = A_{внутр.дисс.} + A_{внеш.конс} + A_{внеш.дисс.},$$

где $A_{внеш.конс}$ – работа внешних консервативных сил; $A_{внеш.дисс.}$ – работа внешних неконсервативных (сторонних) сил. **Работа внешних консервативных сил равна убыли потенциальной энергии системы в поле внешних консервативных сил**: $A_{внеш.конс} = -(\Delta E_p)_{внеш.}$, где $(\Delta E_p)_{внеш.}$ – приращение потенциальной энергии системы во внешнем, консервативном поле сил. Тогда

$$\Delta E = A_{внутр.дисс.} - (\Delta E_p)_{внеш} + A_{внеш.дисс.}, \text{ или}$$

$$\Delta E + (\Delta E_p)_{внеш} = \Delta[E + (E_p)_{внеш}] = A_{внутр.дисс.} + A_{внеш.дисс.}.$$

Если обозначить $E + (E_p)_{внеш} = E'$ – полная механическая энергия системы во внешнем поле консервативных сил, то $\Delta E' = A_{внутр.дисс.} + A_{внеш.дисс.}$. **Изменение полной механической энергии системы равно работе внешних и внутренних диссипативных сил системы.**

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Механическую энергию работа консервативных сил не меняет.
Изменение механической энергии системы происходит только в результате действия внешних и внутренних диссипативных сил.

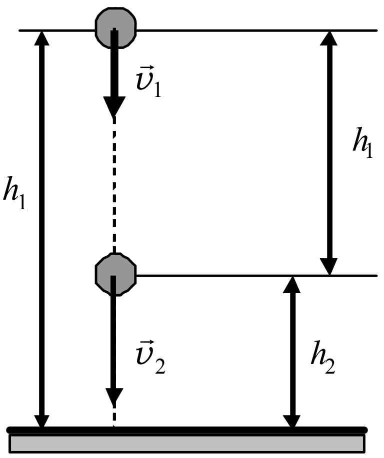
Если на систему тел не действуют внешние диссипативные (сторонние) силы и нет внутренних диссипативных сил, то полная механическая энергия системы сохраняется $\Delta E' = 0$ или $E' = const$

Закон сохранения полной механической энергии справедлив во всех инерциальных системах отсчета.

Пример 1. **Замкнутая система тел.** Пусть тело массой m свободно падает в потенциальном поле консервативных сил тяжести. На высоте

h_1 его скорость υ_1, а на высоте h_2 она стала υ_2. На тело действует только консервативная сила, сторонних сил нет. **Система тело – Земля замкнутая.**

Движение тела является равноускоренным с ускорением g. На пути $h_1 - h_2$ скорость тела увеличилась от υ_1 до υ_2. Тогда



$$\upsilon_2^2 - \upsilon_1^2 = 2g(h_1 - h_2) \text{ или}$$

$$h_1 - h_2 = \frac{\upsilon_2^2}{2g} - \frac{\upsilon_1^2}{2g}.$$

Умножим левую и правую части этого уравнения на mg, получим:

$$mgh_1 - mgh_2 = \frac{mg\upsilon_2^2}{2g} - \frac{mg\upsilon_1^2}{2g} \quad \text{или}$$

$$-(mgh_2 - mgh_1) = \frac{m\upsilon_2^2}{2} - \frac{m\upsilon_1^2}{2}.$$

Правая часть полученного уравнения представляет собой изменение кинетической энергии тела, а левая – изменение потенциальной энергии (её уменьшение). На сколько кинетическая энергия тела увеличилась на пути $h_1 - h_2$, настолько же потенциальная энергия тела уменьшилась.

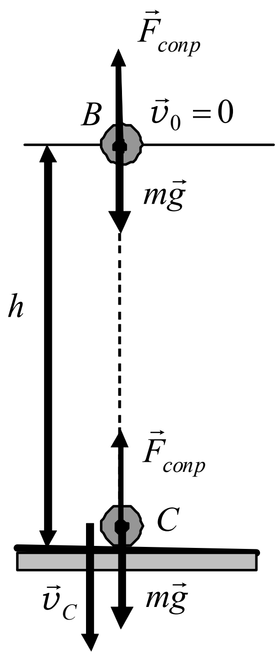
Запишем полученное выражение иначе: $\dfrac{m\upsilon_2^2}{2} + mgh_2 = \dfrac{m\upsilon_1^2}{2} + mgh_1$ или $E_{k2} + E_{p2} = E_{k1} + E_{p1}$; так как $E_k + E_p = E$, то $E_2 = E_1 = E = const$.

В замкнутой системе тел полная механическая энергия – величина постоянная.

Пример 2. **Незамкнутая система**. Тело падает без начальной скорости с высоты h, на него действует внешняя сила сопротивления воздуха $\vec{F}_{сопр}$. Будем считать силу сопротивления воздуха постоянной величиной. На пути h сила сопротивления воздуха совершает работу: $A_{сопр} = F_{сопр} \cdot h \cdot \cos\alpha = -F_{сопр}h$.

Полная энергия тела в точке B равна $E_B = mgh$, так как скорость тела в этот момент времени $\upsilon_0 = 0$. Полная энергия тела у поверхности Земли в точке C будет равна $E_C = \dfrac{m\upsilon_C^2}{2}$. Определим скорость тела в точке C: $\upsilon_C^2 = \upsilon_0^2 + 2ah = 2ah$, так как $\upsilon_0 = 0$. По второму закону Ньютона, ускорение, с которым движется тело, равно: $m\vec{g} + \vec{F}_{сопр} = m\vec{a}$ или

$$mg - F_{сопр} = ma;\ a = g - \frac{F_{сопр}}{m}.$$



Тогда $\upsilon_C^2 = 2ah = 2h\left(g - \frac{F_{сопр}}{m}\right)$. Подставим значение скорости в формулу энергии:

$$E_C = \frac{m\upsilon_C^2}{2} = \frac{m}{2}2h\left(g - \frac{F_{сопр}}{m}\right) = mgh - F_{сопр}h.$$

Из полученного выражения видно, что полная энергия в точке C меньше, чем в точке B. Определим изменение полной механической энергии: $\Delta E = E_C - E_B = -F_{сопр}h = A_{сопр}$,

$\Delta E = A_{сопр}$ – **изменение полной механической энергии незамкнутой системы тел равно работе внешних сил.**

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Слушайте, читайте, повторяйте.*

Силы; консервативные силы; неконсервативные силы; диссипативные силы; силы трения; силы сопротивления; внутренние силы; внешние силы; сторонние силы.

Энергия; кинетическая энергия; потенциальная энергия; полная энергия; полная энергия замкнутой системы; закон сохранения; закон изменения энергии; закон сохранения и превращения энергии.

Система замкнутая; система не замкнутая; система тел находится во внешнем консервативном поле; действие всех внешних сил компенсировано; внешние неконсервативные силы работу не совершают.

Упражнение 2. *Решите задачи.*

1. Лифт массой 300 кг равноускоренно поднимают вверх на высоту 10 м за 4 с. Найти работу, которую совершает мотор лифта. Трение и сопротивление при движении не учитывать.

2. Камень массой 2 кг падает с высоты 20 м из состояния покоя и в момент удара о Землю имеет скорость 15 м/с. Чему равна работа силы сопротивления воздуха?

3. Тело массой 0,5 кг брошенное вертикально вверх со скоростью 20 м/с. вернулось на Землю со скоростью 10 м/с. Определить работу силы сопротивления воздуха.

4. Тело начинает двигаться по наклонной плоскости без начальной скорости. Угол наклона плоскости к горизонту равен 30°, длина наклонной плоскости 2 м. Определить скорость тела в конце наклонной плоскости для случая движения без трения и при наличии трения. Коэффициент трения скольжения 0,2.

5. Тело начинает двигаться по наклонной плоскости высотой 2 м без начальной скорости и дальше проходит по горизонтальной плоскости путь 5 м и останавливается. Определить коэффициент трения, если считать его постоянным на всем пути движения.

6. Два тела движутся навстречу друг другу и испытывают неупругий удар. Скорости первого и второго тел до удара равны 2 м/с и 4 м/с. После удара скорость тел равна 1 м/с и направлена в ту же сторону, что и скорость первого тела до удара. Найти отношение кинетических энергий тел до удара.

7. Пуля массой 10 г со скоростью 400 м/с попадает в доску толщиной 10 см. Пробив доску, пуля вылетела со скоростью 200 м/с. Определить среднюю силу сопротивления, действовавшую на пулю.

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. Силы, работа которых не зависит от формы траектории, а зависит только от начального и конечного положения тела, называются **консервативными.** При перемещении материаль-

ной точки или тела *по замкнутой траектории работа консервативных сил равна нулю.*

2. Силы, работа которых зависит от формы траектории, называют **неконсервативными.** При перемещении материальной точки или тела *по замкнутой траектории работа неконсервативной силы не равна нулю.*
3. *Сумма кинетической и потенциальной энергии материальной точки – это полная механическая энергии точки* $E = E_k + E_p$.
4. Изменение механической энергии материальной точки равно работе сторонних сил: $\Delta E = A_{стор}$. Это уравнение выражает закон изменения механической энергии.
5. Если сторонних сил нет или работа сторонних сил равна нулю, то механическая энергия материальной точки сохраняется: $\Delta E = 0$ или $E = const$ – закон сохранения механической энергии.
6. Система тел, на которую не действуют внешние силы, называется **замкнутой.**
7. Работа внутренних консервативных сил равна убыли потенциальной энергии системы. Эта энергия зависит от взаимодействия тел внутри системы и называется собственной энергией системы. $A_{внутр.конс} = -(\Delta E_p)_{собств.}$
8. Работа внешних консервативных сил равна убыли потенциальной энергии системы в поле внешних консервативных сил:
$$A_{внеш.конс} = -(\Delta E_p)_{внеш.}.$$
9. Кинетическая энергия системы тел равна сумме кинетических энергий всех тел системы: $E_k = \sum E_{ki}$.
10. Приращение полной механической энергии замкнутой системы равно алгебраической сумме работ всех внутренних диссипативных сил: $\Delta E = A_{внутр.дисс.}$.
11. Если в замкнутой системе действуют только консервативные силы, то $\Delta E = 0$, а $E = const$. *Полная механическая энергия замкнутой системы, в которой действуют только консервативные силы, сохраняется.* **(Закон сохранения полной механической энергии).**
12. Изменение полной механической энергии системы равно работе внешних и внутренних диссипативных сил системы.
13. Если на систему тел не действуют внешние диссипативные (сторонние) силы и нет внутренних диссипативных сил, то

полная механическая энергия системы сохраняется $\Delta E' = 0$ или $E' = const$

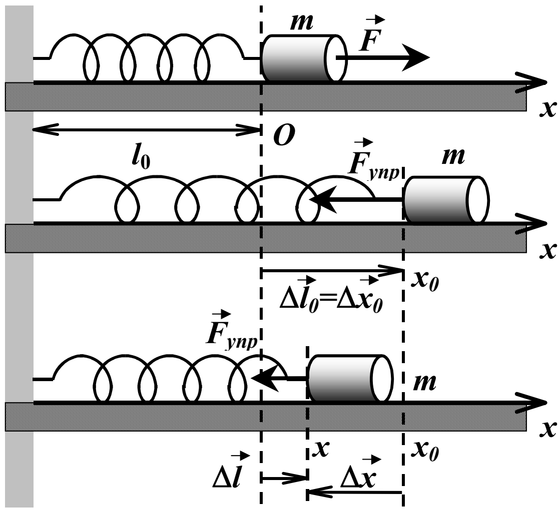
14. Если система не замкнута, то полная механическая энергия не сохраняется. Изменение полной механической энергии незамкнутой системы тел равно работе внешних сил. При этом механическая энергия не исчезает, а переходит в другие виды энергии (например, в тепловую).

ТЕМА 10. <u>**ДИНАМИКА КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ**</u>

Новые слова и словосочетания

маятник	упругий маятник
пружина	пружинный маятник
нерастяжимый	нерастяжимая нить
нить	математический маятник
возвращаться	возвращающая сила
упругая сила	квазиупругая сила

Колебательное движение характеризуется повторяемостью во времени всех физических величин, определяющих это движение. **Колебания в системе, обусловленные действием только внутренних сил, называют свободными**. *Системы тел, в которых возможны свободные колебания называют колебательными системами.* Основным свойством колебательной системы является наличие у неё *положения устойчивого равновесия.* При выводе системы из состояния устойчивого равновесия в системе появляются силы, стремящиеся вернуть её в это положение. Эти силы называются **возвращающими.**

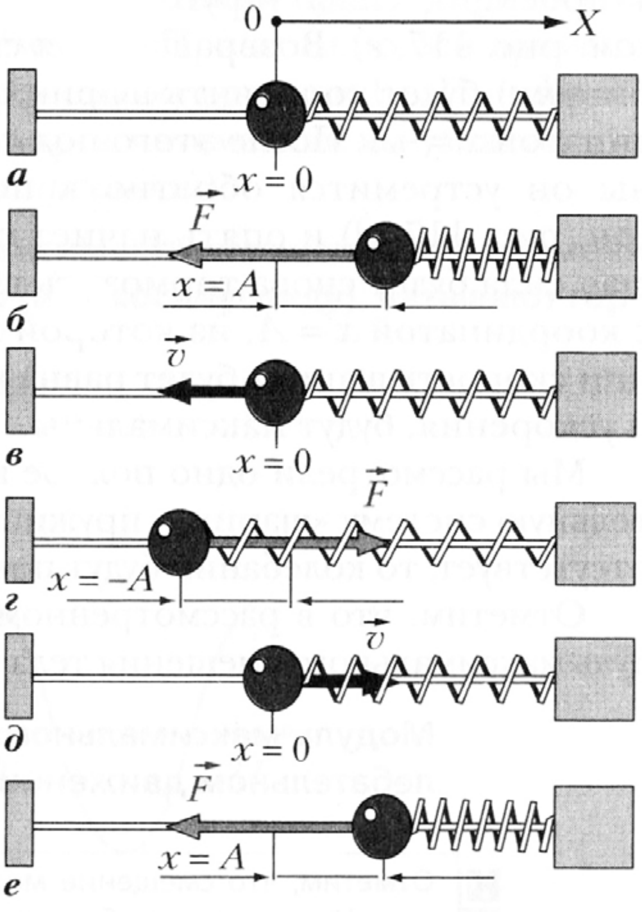


Колебания, для которых зависимость смещения от времени представляет собой синусоиду (косинусоиду), называют гармоническими. Колебания будут гармоническими, если они происходят под действием только возвращающей силы, которая имеет следующие свойства: 1) модуль возвращающей силы пропорционален смещению тела от положения равновесия; 2) возвращающая сила всегда направлена к положению равновесия или в сторону противоположную смещению.

10.1. <u>**Пружинный маятник**</u>

Пружинный маятник – это массивное тело, укрепленное на невесомой упругой пружине и совершающее колебания.

Рассмотрим пример колебательной системы, состоящей из шарика массой m, прикреплённого к вертикальной стенке пружиной жесткостью k. Шарик может без трения перемещаться по горизонтальному стержню (поверхности). При любом положении шарика сила тяжести $m\vec{g}$ и сила реакции стержня $\vec{N}$ уравновешивают друг друга. На рисунке представлены свободные колебания пружинного маятника:



а) шарик находится в положении равновесия (пружина не растянута; сила тяжести и сила реакции стержня компенсируют друг друга);

б) начальное смещение шарика от положения равновесия (максимальное сжатие пружины, начальная скорость равна нулю);

в) возвращение шарика в положение равновесия (пружина не деформирована, максимальная скорость шарика); шарик по инерции проходит положение равновесия и начинает растягивать пружину;

г) остановка шарика – точка поворота (максимальное смещение шарика относительно положения равновесия, максимальное растяжение пружины, скорость равна нулю);

д) возвращение шарика в положение равновесия (пружина не деформирована, максимальная скорость шарика;

е) возвращение шарика в начальное положение (максимальное сжатие пружины, скорость равна нулю).

Запишем уравнение движения шарика. Шарик совершает колебательное движение только под действием упругих сил. При деформации пружины на величину x на шарик начинает действовать сила упругости, направленная к положению равновесия (противоположно смещению). По закону Гука $\vec{F}_{упр} = -k\vec{x}$; сила упругости – **возвращающая сила.**

По второму закону Ньютона сила упругости сообщает шарику ускорение $\vec{F}_{упр} = m\vec{a}$. Тогда уравнение движения шарика: $-k\vec{x} = m\vec{a}$, в проекции на ось *x* (направление движения) $ma_x = -kx$ или $a_x = -\frac{k}{m}x$.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Из кинематики колебательного движения: если материальная точка (тело) совершает колебательное движение по закону

$$x = A\cos(\omega_0 t + \varphi_0) \text{ **или** } x = A\sin(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где *A* – амплитуда колебаний, ω_0 – циклическая частота, $\omega_0 t + \varphi_0$ – фаза колебаний, φ_0 – начальная фаза, то $a_x = -\omega_0^2 \cdot x$.

Из сравнения следует, что $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$ или период колебаний пружинного маятника $T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Пружинный маятник совершает гармонические колебания с периодом $T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$.

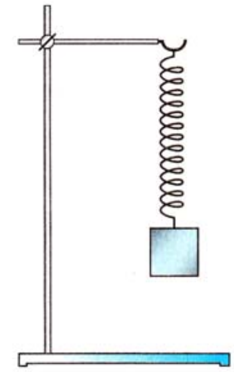
Проанализируем, как изменяется *x* со временем. На рисунке в начальный момент времени $t = 0$ смещение шарика относительно положения равновесия максимально и $x = A$, тогда:

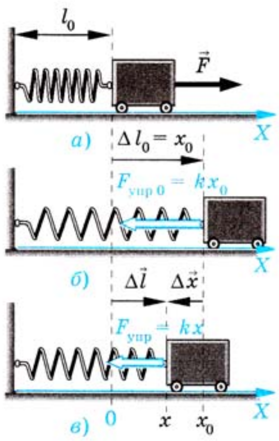
1) если уравнение колебаний $x = A\cos(\omega_0 t + \varphi_0) = A\cos\varphi$, **то при** $t = 0$ $x = A = A\cos\varphi$. Следовательно, $\cos\varphi = 1$ **или при** $t = 0$ $\cos\varphi_0 = 1$, значит $\varphi_0 = 0$. Тогда уравнение колебаний $x = A\cos\omega_0 t$.

2) если уравнение колебаний представить как $x = A\sin(\omega_0 t + \varphi_0) = A\sin\varphi$, **то при** $t = 0$ $x = A = A\sin\varphi$. Следовательно, $\sin\varphi = 1$ **или при** $t = 0$ $\sin\varphi_0 = 1$, значит $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$. Тогда уравнение колебаний $x = A\sin(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}) = A\cos\omega_0 t$.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Уравнение колебаний пружинного маятника, представленного на рисунке $x = A\cos\omega_0 t$.



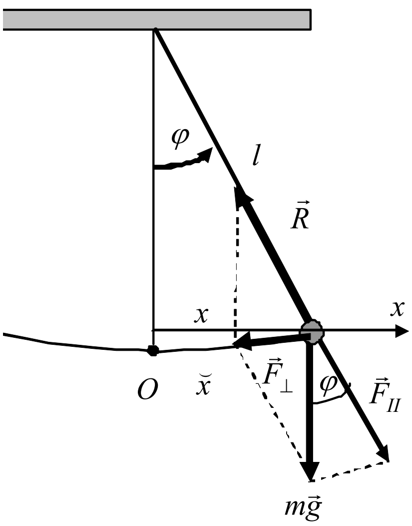


Пружинный маятник часто называют упругим маятником, подчеркивая, что система совершает колебания под действием упругой силы. Пример упругого маятника.

Упругий маятник – это небольшое тело массой m прикреплённое к пружине с коэффициентом упругости k, совершающее колебания под действием упругой силы.

10.2. <u>Математический маятник</u>

Математический маятник – это тело (материальная точка), подвешенное на невесомой нерастяжимой нити, способное под действием приложенных к нему сил совершать колебания относительно положения равновесия. Обычно маятник совершает колебания под действием силы тяжести. В положении равновесия тела (точка *O*) нить вертикальна. Реальное тело можно считать математическим маятником, если его размеры малы по сравнению с длиной нити.



Выведем маятник, масса которого *m* и длина нити *l* из положения равновесия, отклонив нить от вертикали на некоторый малый угол φ, и затем отпустим её. Смещение тела от положения равновесия $\breve{x}$ – измеренное вдоль траектории от положения равновесия. Тогда $\breve{x}$ – дуговая координата тела при отклонении маятника вправо от положения равновесия имеет направление от точки *O вправо*. На тело действует сила тяжести $m\vec{g}$ и сила реакции нити $\vec{R}$. Разложим силу тяжести на две составляющие: $\vec{F}_{II}$ – направленную вдоль нити и $\vec{F}_{\perp}$ – перпендикулярно нити (по касательной к траектории). Составляющая $\vec{F}_{II}$ вместе с силой натяжения $\vec{R}$ вызывает изменение скорости тела по направлению и определяет величину центростремительного ускорения. Составляющая $\vec{F}_{\perp}$ определяет изменение скорости по модулю и характеризует тангенциальное ускорение. **При этом $\vec{F}_{\perp}$ – составляющая силы тяжести направлена против смещения тела $\breve{x}$ от положения равновесия, она стремится вернуть тело в положение равновесия.** Модуль составляющей силы тяжести из рисунка

$$F_{\perp} = mg\sin\varphi.$$

При отклонении маятника от положения равновесия на малый угол φ, такой, чтобы выполнялось условие $\sin\varphi \cong \varphi$, на тело будет действовать сила $F_{\perp} = mg\sin\varphi = mg\varphi$. Если угол φ мал, то дугу $\breve{x}$ можно заменить хордой *x,* тогда $\sin\varphi \cong \varphi = \dfrac{x}{l}$ и $F_{\perp} = mg\sin\varphi = mg\varphi = mg\dfrac{x}{l}$.

Сила, действующая на колеблющееся тело пропорциональна смещению *x*. Направление смещения $\vec{x}$ и силы противоположны (тело поворачивается вправо, а сила $\vec{F}_{\perp}$ направлена влево). Тогда $F_{\perp} = F_x = -mg\sin\varphi = -mg\varphi = -mg\dfrac{x}{l}$. **Знак минус указывает, что сила направлена в сторону противоположную смещению.** Сила $F_{\perp}$ называется квазиупругой силой, так как $F_{\perp}$ имеет такие же свойства, что и сила упругости $F_{\perp} = F_x = -mg\dfrac{x}{l} = -kx$, где $k = \dfrac{mg}{l}$.

По второму закону Ньютона сила $F_{\perp}$ сообщает телу ускорение $ma_x = -mg\dfrac{x}{l}$ или $a_x = -g\dfrac{x}{l} = -\dfrac{g}{l}x$.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Из кинематики колебательного движения: если материальная точка (тело) совершает колебательное движение по закону

$x = A\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ **или** $x = A\sin(\omega_0 t + \varphi_0)$,

где *A* – амплитуда колебаний, ω_0 – циклическая частота, $\omega_0 t + \varphi_0$ – фаза колебаний, φ_0 – начальная фаза, то

$a_x = -\omega_0^2 \cdot x$.

Из сравнения, следует, что $\omega_0^2 = \frac{g}{l}$, а период колебаний $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ – период колебаний математического маятника.

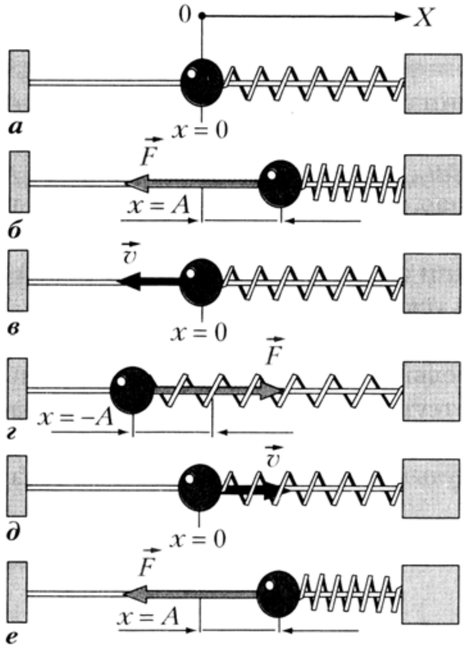
Таким образом, математический маятник совершает колебательное движение с периодом $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, а координата маятника изменяется со временем по закону $x = A\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ **или** $x = A\sin(\omega_0 t + \varphi_0)$**, где *A* – амплитуда колебаний, ω₀ – циклическая частота,** $\omega_0 t + \varphi_0$ **– фаза колебаний, φ₀ – начальная фаза в зависимости от начальных условий.**

ВЫВОД: система совершает свободные гармонические колебания под действием упругой или квазиупругой силы, модуль которой пропорционален смещению, а направление силы противоположно смещению. Динамическое уравнение колебаний имеет вид: $ma_x = -kx$ **или** $a_x = -\omega_0^2 \cdot x$**. Это уравнение можно записать в дифференциальной форме:** $a_x = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega_0^2 x$**. Решением этого уравнения является функция вида** $x = A\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ **или** $x = A\sin(\omega_0 t + \varphi_0)$**, где *A* – амплитуда колебаний, ω_0 – циклическая частота,** $\omega_0 t + \varphi_0$ **– фаза колебаний, φ_0 – начальная фаза в зависимости от начальных условий.**

10.3. Энергия гармонических колебаний

Свободные гармонические колебания системы происходят благодаря начальному запасу механической энергии системы. Применим к колебательной системе закон сохранения механической энергии. В отсутствие внешних сил колебательная система является замкнутой, тогда полная механическая энергия системы не меняется. Рассмотрим колебательную систему – пружинный маятник.

В начальный момент времени кинетическая энергия маятника, отклоненного на расстояние $x_0 = A$ и отпущенного со скоростью $\upsilon_0 = 0$ равна нулю, $E_{k_0} = 0$. Система обладает только потенциальной энергией упруго сжатой пружины: $E_{p_0} = \frac{kx_0^2}{2} = \frac{kA^2}{2}$. Полная механическая энергия в начальный момент времени равна: $E_0 = E_{k_0} + E_{p_0} = 0 + \frac{kA^2}{2}$. В любой момент времени, сумма кинетической и потенциальной энергии замкнутой системы равна полной механической энергии: $E_k + E_p = E = E_0$.



Если тело совершает гармонические колебания по закону $x = A\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$, то потенциальная энергия упруго сжатой пружины в любой момент времени определяется уравнением $E_p = \frac{kx^2}{2} = \frac{kA^2}{2}\cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)$, а кинетическая энергия

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{mA^2\omega_0^2}{2}\sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) = \frac{kA^2}{2}\sin^2(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Максимальное значение кинетической и потенциальной энергии системы равно $\frac{kA^2}{2}$.

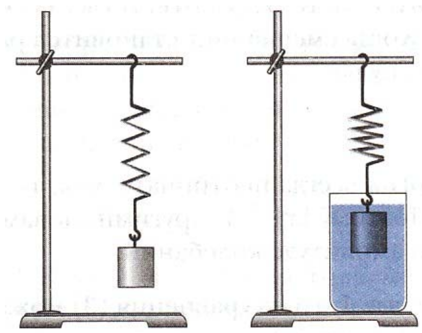
При постоянной величине полной энергии системы происходит непрерывное превращение потенциальной энергии в кинетическую энергию и обратно.

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Прочитайте текст и ответьте на вопросы.*

ТЕКСТ

Мы рассмотрели случай гармонических колебаний, когда на систему не действуют внешние силы и силы трения. Такие колебания называются свободными незатухающими. В реальных системах механическое движение всегда сопровождается трением.



Силы трения, направленные противоположно перемещению, совершают отрицательную работу, уменьшая механическую энергию системы. Постоянное уменьшение энергии системы приводит к непрерывному уменьшению амплитуды колебаний. Колебания становятся затухающими. Затухающие колебания – колебания, амплитуда которых уменьшается с течением времени.

Если на систему действуют внешние периодические силы, то система совершает вынужденные колебания. Вынужденные колебания – колебания, происходящие под действием периодической внешней силы. Частота вынужденных колебаний равна частоте внешней силы. Так как в системе действуют силы трения и на систему действуют внешние силы, то полная механическая энергия системы изменяется со временем.

Изменение полной механической энергии системы равно работе сил трения и внешних сил. Если суммарная работа сил трения и внешних сил за каждый период равна нулю, то механическая энергия системы за период не изменяется. Система совершает колебания с постоянной амплитудой, так как работа внешних сил компенсирует потери энергии, связанные с трением. Такие колебания называются установившимися вынужденными колебаниями.

Если работа внешних сил и сил трения за период колебаний отрицательна, то колебания в системе будут затухающими. Если работа внешних сил и сил трения за период колебаний положительная величина, то амплитуда колебаний системы будет увеличиваться.

Амплитуда вынужденных колебаний зависит от частоты внешней периодической силы. Если частота внешней периодической силы совпадает с частотой свободных колебаний системы, то амплитуда колебаний становится максимальной. Явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты внешней силы с частотой свободных колебаний системы, называется резонансом.

Вопросы.

1. Какие колебания называются свободными?
2. Какие колебания называются затухающими?
3. Какие колебания называются вынужденными?
4. Приведите примеры колебательных систем, в которых могут возникать свободные, затухающие, вынужденные колебания.

Упражнение 2. *Решите задачи.*

1. Упругий маятник массой 200 г за 10 с совершает 20 колебаний. Чему равна жесткость пружины?

2. Найти массу груза, подвешенного на пружине жесткостью 250 Н/м. Груз совершает 20 колебаний за 16 с.

3. Груз массой 1 кг, подвешенный на пружине жесткостью 100 Н/м. совершает колебания с амплитудой 10 см. Напишите формулу. Выражающую зависимость силы упругости от времени. Найдите наибольшую величину силы упругости.

4. Во сколько раз период колебаний математического маятника на Луне отличается от периода колебаний этого же маятника на Земле? Масса Луны в 81 раз меньше массы Земли, а радиус Земли в 3,7 раза больше радиуса Луны.

5. Амплитуда колебаний математического маятника равна 20 см, масса маятника 1 кг, длина нити 2 м. Чему равна полная энергия маятника? С какой скоростью тело проходит положение равновесия?

6. Маятник колеблется по закону $x = 0{,}1\sin 0{,}628t$ (м). Чему равна амплитуда колебаний, частота и период колебаний? Чему равны максимальное значение скорости и ускорения? Чему равна полная энергия маятника?

7. Маятник колеблется по закону $x = 0{,}1\sin 0{,}628t$ (м). Найдите кинетическую, потенциальную и полную энергию маятника в момент времени $t = \frac{T}{4}$ с.

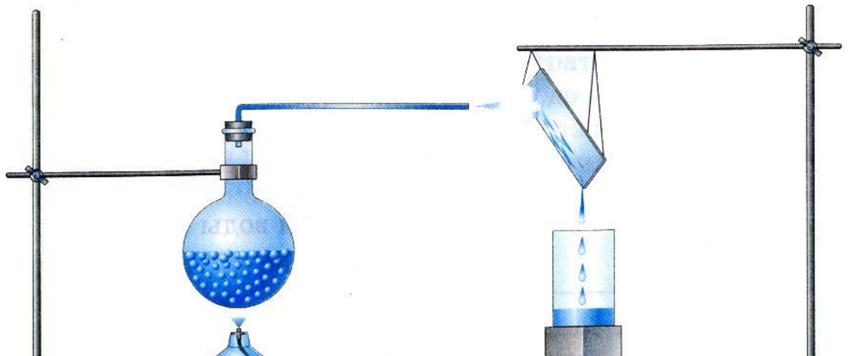
ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. *Системы тел, в которых возможны свободные колебания называют колебательными системами.* Основным свойством колебательной системы является наличие у неё *положения устойчивого равновесия.*
2. Колебания в системе, обусловленные действием только внутренних сил, называют **свободными**.
3. Колебания, для которых зависимость смещения от времени представляет собой синусоиду (косинусоиду), называют **гармоническими.**

4. Колебания будут гармоническими, если они происходят под действием только возвращающей силы, которая имеет следующие свойства: 1) модуль возвращающей силы пропорционален смещению тела от положения равновесия; 2) возвращающая сила всегда направлена к положению равновесия или в сторону противоположную смещению.
5. ***Упругий маятник*** *– это небольшое тело массой m прикреплённое к пружине с коэффициентом упругости k, совершающее колебания под действием упругой силы.*
6. Уравнение колебаний пружинного маятника $x = A\cos\omega_0 t$, период колебаний $T = \dfrac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\dfrac{m}{k}}$; $\omega_0^2 = \dfrac{k}{m}$.
7. **Математический маятник** – это тело (материальная точка), подвешенное на невесомой нерастяжимой нити, способное под действием приложенных к нему сил совершать колебания относительно положения равновесия. Обычно маятник совершает колебания под действием силы тяжести.
8. Уравнение колебаний маятника $x = A\cos\omega_0 t$, $\omega_0^2 = \dfrac{g}{l}$, а период колебаний $T = 2\pi\sqrt{\dfrac{l}{g}}$.
9. Полная механическая энергия в начальный момент времени равна: $E_0 = \dfrac{kA^2}{2} = \dfrac{m\omega_0^2 A^2}{2}$.
10. Если тело совершает гармонические колебания по закону $x = A\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$, то потенциальная энергия упруго сжатой пружины в любой момент времени определяется уравнением $E_p = \dfrac{kx^2}{2} = \dfrac{kA^2}{2}\cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)$, а кинетическая энергия $E_k = \dfrac{m\upsilon^2}{2} = \dfrac{mA^2\omega_0^2}{2}\sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) = \dfrac{kA^2}{2}\sin^2(\omega_0 t + \varphi_0)$. Максимальное значение кинетической и потенциальной энергии системы равно $\dfrac{kA^2}{2}$.

Глава 4.
СТАТИКА. МЕХАНИКА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ



ТЕМА 1. **СТАТИЧЕСКОЕ РАВНОВЕСИЕ ТЕЛ (СИСТЕМЫ ТЕЛ)**

Новые слова и словосочетания

равновесие	статический
динамический	статическое равновесие
равнодействующий	уравновешивающий
составляющая	пересечение
эквивалентный	неустойчивый
отклонение	удалять
устойчивый	безразличный
возвращать	выводить
минимальный	

Раздел механики, в котором изучается равновесие абсолютно твердых тел, называется ***статикой***. Статика – это часть механики, которая изучает условия и виды равновесия тел. Статика отвечает на вопрос: почему тело не движется поступательно и не вращается?

Абсолютно твердое тело – это тело, расстояние между любыми двумя точками которого не изменяется.

Из законов Ньютона известно, что под действием приложенных сил тело получает ускорение $\vec{a} = \frac{\sum_i \vec{F}_i}{m}$.

В динамике мы рассматривали различные движения тел, их различные виды взаимодействий. Результат взаимодействия тел характеризуется суммой сил, приложенных к телу. Под действием приложенных сил тело может двигаться поступательно, вращаться или находиться в покое. Сумма сил, приложенных к телу, может быть равной нулю и не равной нулю. В зависимости от этого скорость тела остается постоянной или изменяется.

Если скорость тела не изменяется, то тело находится в покое или движется равномерно и прямолинейно.

Если ***тело, к которому приложены силы, покоится или движется равномерно и прямолинейно***, то оно находится ***в равновесии***.

Равновесие – это такое состояние тела (системы тел), когда под действием приложенных сил оно не получает ускорения.

Различают два вида равновесия: статическое и динамическое.

Динамическое равновесие – это такое равновесие, когда под действием приложенных сил тело не изменяет вид движения.

Статическое равновесие – это такое равновесие, когда под действием приложенных сил тело находится в состоянии покоя.

Произвольное движение твердого тела можно рассматривать в виде суммы двух движений: поступательного движения и вращательного движения вокруг некоторой оси. Например, движение колеса можно представить как сумму поступательного движения вместе с центром масс колеса и одновременного вращения вокруг оси, проходящей через центр масс колеса.

1.1. Условие равновесия не вращающегося тела

Поступательное движение твердого тела это такое движение, при котором за равные промежутки времени все точки твердого тела совершают одинаковые перемещения, имеют одинаковые скорости и ускорения. Поэтому при поступательном движении твердое тело можно рассматривать как материальную точку (центр масс тела) с массой, равной массе твердого тела.

В случае поступательного движения условия движения и покоя твердого тела такие же, как для материальной точки.

Если тело находится в состоянии статического равновесия, то скорость тела в любой момент времени равна нулю. Если тело находится в состоянии динамического равновесия, то тело движется с постоянной скоростью.

Из второго закона Ньютона следует, что ускорение тела равно нулю, если векторная сумма всех сил, действующих на тело равна нулю.

$$\vec{a} = \frac{\sum_i \vec{F}_i}{m}; \text{ если } \sum_i \vec{F}_i = 0, \text{ то } \vec{a} = 0.$$

Тело будет находиться в покое или двигаться равномерно и прямолинейно, если сумма сил, действующих на тело равна нулю: $\sum_i \vec{F}_i = 0$.

Действие нескольких сил на тело можно заменить одной силой. Такая сила называется равнодействующей. *Равнодействующей называют силу, которая равна векторной сумме всех сил, действующих на тело* $\vec{R} = \sum_i \vec{F}_i$.

Равнодействующая сила $\vec{R}$ – это сила, которая действует на тело так же как несколько сил вместе:

$$\vec{R} = \sum_i \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \ldots + \vec{F}_n.$$

При этом силы $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, $\vec{F}_3$, … $\vec{F}_n$, действующие вместе как сила $\vec{R}$, называются ***составляющими силы*** $\vec{R}$.

Значит, **тело будет находиться в статическом или динамическом равновесии (в покое или двигаться равномерно и прямолинейно), если равнодействующая сила равна нулю:** $\vec{R} = \sum_i \vec{F}_i = 0.$

Если геометрическая сумма сил равна нулю, то и сумма проекций векторов сил на любую ось тоже равна нулю.

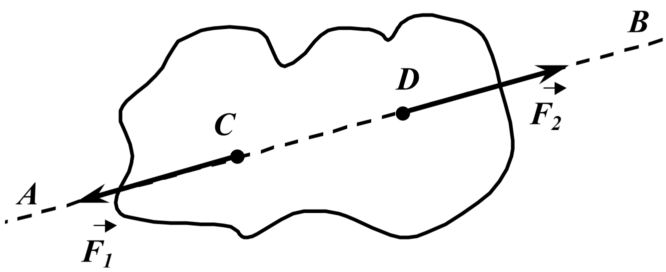
Таким образом, чтобы ***не вращающееся тело находилось в равновесии, необходимо, чтобы сумма проекций приложенных к нему сил на любую ось была равна нулю***.

Если на тело действуют силы $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, $\vec{F}_3$, … $\vec{F}_n$ и тело находится в равновесии, то

$$\sum_i \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \ldots + \vec{F}_n = 0,$$

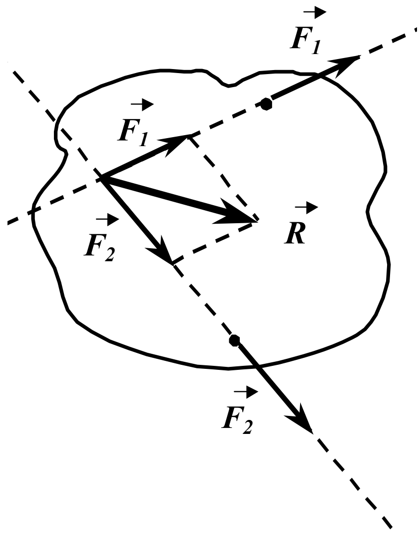
или

$$\begin{cases} \sum_i F_{i_x} = F_{1_x} + F_{2_x} + F_{3_x} + \ldots + F_{n_x} = 0; \\ \sum_i F_{i_y} = F_{1_y} + F_{2_y} + F_{3_y} + \ldots + F_{n_y} = 0; \\ \sum_i F_{i_z} = F_{1_z} + F_{2_z} + F_{3_z} + \ldots + F_{n_z} = 0. \end{cases}$$



Пример 1. Тело, изображенное на рисунке, находится в статическом или динамическом равновесии. К телу приложены две равные силы, действующие вдоль одной прямой, и направленные в противоположные стороны. Равнодействующая сил, действующих на тело равна: $\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$.

Если тело находится в покое, или движется с постоянной скоростью, то результирующая сила $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = 0$ (равнодействующая $\vec{R} = 0$). Это означает, что совместное действие сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ не изменяет состояние тела или действие на тело силы $\vec{F}_1$ уравновешивается действием силы $\vec{F}_2$. **Действующие на тело силы уравновешивают друг друга, если в результате их совместного действия тело не получает ускорения:** $\sum_i \vec{F}_i = 0$**.**



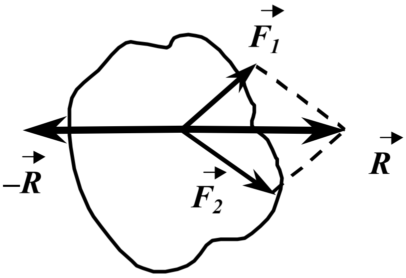
Пример 2. На тело, изображенное на рисунке, действуют силы, направленные произвольным образом. Найти равнодействующую силу – означает геометрически сложить силы, действующие на тело и найти точку приложения равнодействующей силы. Складывать силы, действующие на тело необходимо по правилу сложения векторов (правилу треугольника или параллелограмма).

Мы знаем, что сила – векторная величина. Она характеризуется величиной (модулем), направлением и точкой приложения.

Прямая, вдоль которой действует сила, называется линией действия силы.

Точку приложения силы можно переносить по линии действия силы. Перенос точки приложения силы вдоль линии ее действия не изменяет состояние абсолютно твердого тела (состояния покоя или равномерного прямолинейного движения). Точка приложения равнодействующей силы совпадает с точкой пересечения линий действия сил, действующих на тело. Если тело не вращается, то равнодействующую силу можно перенести в точку, совпадающую с центром тяжести твердого тела.

Если равнодействующая сил $\sum_i \vec{F}_i = 0$**, приложенных к телу, равна нулю, то тело может двигаться равномерно и прямолинейно или покоиться. При таком движении тело находится в статическом или динамическом равновесии.**



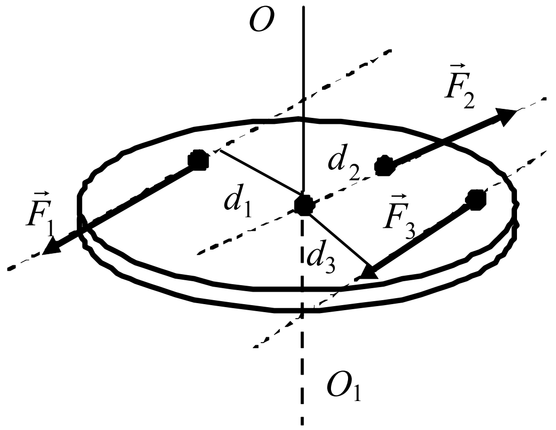
Пример 3. Рассмотрим случай, когда равнодействующая сил, приложенных к телу, не равна нулю. Чтобы привести тело в состояние равновесия, надо к телу приложить уравновешивающую силу ($-\vec{R}$).

Уравновешивающая сила – это сила, по величине равная равнодействующей, приложенная к той же точке и направленная по линии действия равнодейст-

вующей силы в противоположную сторону.

Равнодействующая и уравновешивающая силы – это силы, взаимно уравновешивающие друг друга. ***Взаимно уравновешивающие силы – это силы, в результате совместного действия которых тело не получает ускорения***: $\vec{R} + (-\vec{R}) = 0$. Значит, если на тело действует уравновешивающая сила, тело находится в состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения. Тело находится в равновесии.

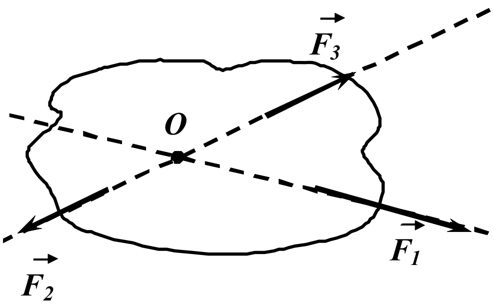
1.2. Условие равновесия тела, имеющего неподвижную ось вращения



Рассмотрим тело, которое не может совершать поступательного движения, а может поворачиваться или вращаться. Чтобы исключить поступательное движение, достаточно тело закрепить в одной точке. Относительно этой точки тело может поворачиваться.

Сила может вызвать вращение тела вокруг оси только тогда, когда линия действия этой силы не проходит через ось вращения. На рисунке силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_3$ оказывают вращательное действие на диск. Сила $\vec{F}_2$ не вызывает вращение диска, так как линия её действия проходит через ось вращения диска.

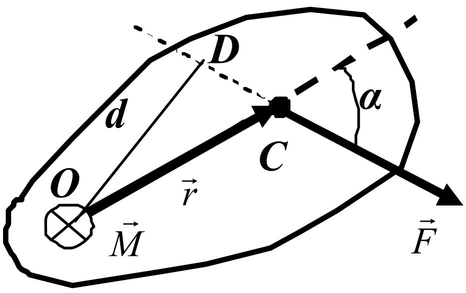
На рисунке показано тело, которое может вращаться относительно оси, проходящей через точку O перпендикулярно чертежу. Силы $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, $\vec{F}_3$, указанные на рисунке не вызывают поворота тела. Линия действия этих сил проходит через ось вращения. Любая из таких сил будет уравновешиваться силой реакции закрепленной оси. Такое тело будет находиться в равновесии.



Поворот тела может вызвать только та сила, линия действия которой не проходит через ось вращения.

Опыт показывает, что вращающее действие силы определяется не только ее модулем, но и положением точки приложения силы относительно оси вращения.

Для характеристики вращающего действия силы вводится понятие момента силы. **Момент силы относительно оси вращения – это физическая величина, равная векторному произведению радиус-вектора, проведенного из оси вращения к точке приложения вращающей силы, и вектора силы:** $\vec{M} = \left[\vec{r} \cdot \vec{F}\right]$**.** Момент силы относительно оси вращения характеризует способность силы вращать тело вокруг этой оси.



На рисунке изображено тело произвольной формы, способное вращаться вокруг оси, проходящей через точку O перпендикулярно плоскости чертежа, под действием силы $\vec{F}$. Точка приложения силы – точка C. Положение точки приложения силы относительно оси вращения определяется радиус-вектором $\vec{r}$, угол α – угол между направлением силы $\vec{F}$ и радиус-вектором $\vec{r}$.

Момент силы $\vec{M}$ – векторная величина. **Направление момента силы определяется по правилу буравчика: если вращать головку буравчика по направлению вращающего действия силы (от вектора $\vec{r}$ к вектору $\vec{F}$), то поступательное движение буравчика совпадает с вектором момента силы.** На рисунке вектор момента силы направлен вдоль оси , проходящей через точку O «от нас», за чертеж.

Модуль момента силы $M = r \cdot F \cdot \sin\alpha$. Однако, величина $r \cdot \sin\alpha = d$ – это длина перпендикуляра, опущенного из оси вращения на линию действия силы. Величина d называется плечом силы.

Тогда $M = r \cdot F \cdot \sin\alpha = F \cdot d$.

Плечо силы – кратчайшее расстояние от оси вращения до линии действия силы (длина перпендикуляра от оси вращения до линии действия силы).

На рисунке:

плечо силы $\vec{F}_2$ – это расстояние d_2;

плечо силы $\vec{F}_3$ – это расстояние d_3;

плечо силы $\vec{F}_1$ равно нулю $d_1 = 0$.

Вращающее действие силы определяется произведением модуля силы на плечо силы. Величина, равная произведению модуля силы $\vec{F}$ на ее плечо d, называется ***вращающим моментом*** или ***моментом силы относительно оси вращения***:

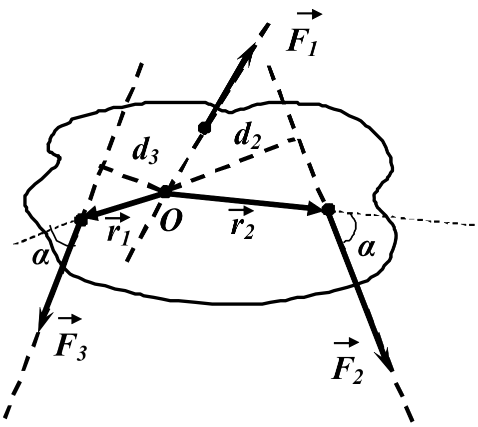
$$M = F \cdot d\ .$$

Момент силы $\vec{F}_2$ равен: $M_2 = F_2 \cdot d_2$.

Момент силы $\vec{F}_3$ равен: $M_3 = F_3 \cdot d_3$.

Момент силы $\vec{F}_1$ равен: $M_1 = F_1 \cdot d_1 = 0$.

Момент силы направлен вдоль оси вращения. Проекция момента силы на ось вращения может быть положительной и отрицательной в зависимости от направления вектора момента силы.



Момент силы, вращающий тело ***по часовой стрелке***, считается ***положительным***. Момент силы, вращающий тело ***против часовой стрелки***, считается ***отрицательным***.

Сила $\vec{F}_2$, приложенная к телу на рисунке, вызывает поворот тела по часовой стрелке, сила $\vec{F}_3$ вызывает поворот тела против часовой стрелки. Сила $\vec{F}_1$ не вызывает поворота тела. Значит, момент силы $\vec{F}_3$ отрицателен, а момент силы $\vec{F}_2$ – положителен.

Если тело, имеющее ось вращения, находится в равновесии, то сумма проекций моментов всех приложенных сил на ось вращения равна нулю

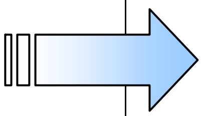
$$\sum_i M_i = 0 \text{ (правило моментов).}$$

Для тела на рисунке:

$$M_2 - M_3 = 0 \text{ или } M_2 = M_3 .$$

$$F_2 \cdot d_2 = F_3 \cdot d_3 .$$

Таким образом, условие равновесия тела, имеющего ось вращения: ***тело, имеющее закреплённую ось вращения, находится в равновесии, если алгебраическая сумма моментов всех вращающих сил равна нулю***.



ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

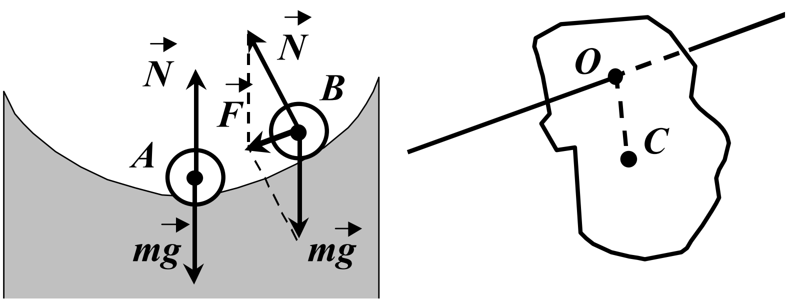
Общее условие статического равновесия твердого тела: твердое тело находится в равновесии, если векторная сумма приложенных к телу сил равна нулю и алгебраическая сумма моментов этих сил относительно оси вращения равна нулю: $\sum\limits_i \vec{F}_i = 0$, и $\sum\limits_i M_i = 0$.

1.3. **Виды статического равновесия**

Если тело находится в равновесии, то это значит, что сумма приложенных к нему сил равна нулю и сумма моментов этих сил относительно оси вращения тоже равна нулю.

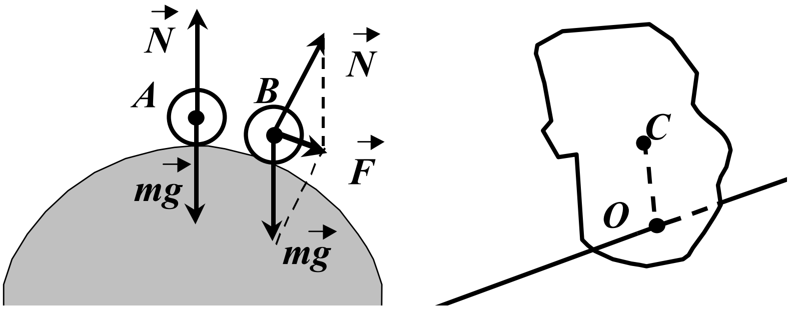
Равновесие бывает устойчивое, неустойчивое и безразличное.

Устойчивое равновесие. Равновесие называется устойчивым, если при малом отклонении тела от положения равновесия появляется сила $\vec{F}$, которая возвращает тело в положение равновесия (сила $\vec{F}$ возвращает тело в точку *A*). Положение центра тяжести тела в положении *B* выше, чем в положении *A*. Потенциальная энергия тела относительно Земли в точке *A* меньше. Следовательно, ***в положении устойчивого равновесия тело обладает минимальной потенциальной энергией***.



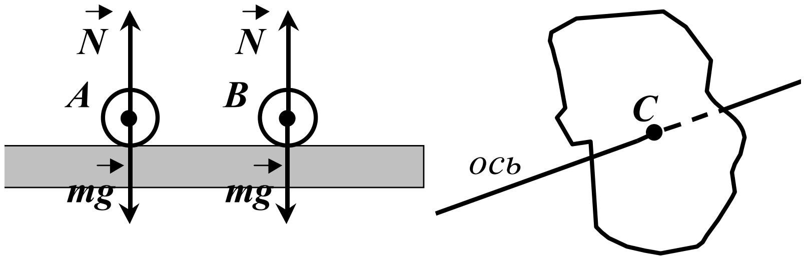
Если тело имеет ось вращения, то устойчивое равновесие будет в том случае, если центр тяжести тела (C) расположен ниже оси вращения O.

Неустойчивое равновесие. Равновесие называется неустойчивым, если при малом отклонении тела от положения равновесия появляется сила $\vec{F}$, которая удаляет его от положения равновесия. В точке *B* сила $\vec{F}$ стремится удалить тело от точки *A*. В точке *B* потенциальная энергия тела относительно Земли меньше, чем в точке *A*. Следовательно, если потенциальная энергия при малом отклонении тела от положения равновесия уменьшается, то это положение равновесия неустойчивое.

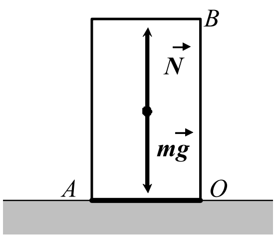


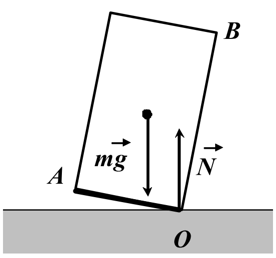
Если тело имеет ось вращения, то неустойчивое положение равновесия будет в том случае, когда центр тяжести тела *C* расположен выше оси вращения.

Безразличное равновесие. Равновесие называется безразличным, если при малом отклонении тела от положения равновесия состояние тела не изменяется. При этом потенциальная энергия тела в точке *A* и в точке *B* одинакова.



Безразличное состояние равновесия тела, имеющего ось вращения, наблюдается в том случае, когда ось вращения проходит через центр тяжести тела.

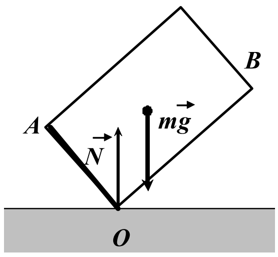


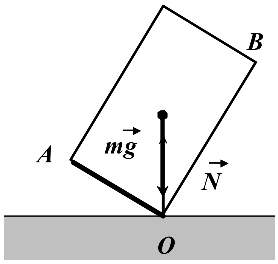


Равновесие тела, имеющего точку опоры. Тело, имеющее площадь опоры (находящиеся на подставке, опоре) находится в состоянии устойчивого равновесия, так как действуют уравновешивающие друг друга сила тяжести и сила реакции опоры. Силы тяжести и реакции опоры направлены по одной прямой, линия действия сил проходит через площадь опоры (на рисунке линия *AO*).

Если тело отклонить, как показано на рисунке, то тело вернется в состояние устойчивого равновесия, если линия действия силы тяжести проходит через площадь опоры тела (на рисунке линия *AO*). Относительно точки *O* возникает вращающий момент силы тяжести, стремящийся повернуть тело против часовой стрелки. Тело возвращается в состояние устойчивого равновесия.

Пусть тело, имеющее площадь опоры, отклонили так, что линия действия силы тяжести не проходит через площадь опоры (на рисунке линия *AO*). Если линия действия силы тяжести не проходит через основание тела, то тело находится в неустойчивом положении. Возникающий при этом вращающий момент силы тяжести стремится повернуть тело по часовой стрелке. Тело будет стремиться занять положение с минимальной потенциальной энергией (примет горизонтальное положение).





Если тело отклонили так, что линия действия силы тяжести проходит через точку опоры (линию опоры), то тело находится в состоянии неустойчивого равновесия. Небольшое отклонение вправо или влево приводит к появлению вращающего момента силы тяжести, и тело перейдет в устойчивое положение равновесия (примет вертикальное или горизонтальное положение).

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Слушайте, читайте, повторяйте.*

Сила; точка приложения силы; линия действия силы; результирующая сила; суммарная сила; уравновешивающая сила.

Действие силы; сила сообщает телу ускорение; совместное действие сил; сила оказывает действие; под действием силы тело движется. Движение равномерное; неравномерное; прямолинейное; криволинейное; вращательное; поступательное.

Момент силы; плечо силы; направление момента силы; момент силы – это вектор; направление момента силы определяется правилом буравчика; правило винта; правило правого винта; правило векторного произведения.

Равновесие; устойчивое равновесие; неустойчивое равновесие; безразличное равновесие; состояние равновесия.

Упражнение 2. *Решите задачи.*

1. С какой минимальной силой, направленной горизонтально, нужно прижать плоский брусок массой 5 кг к вертикальной стене, чтобы он не начал двигаться вниз? Коэффициент трения между бруском и стеной 0,1.

2. Маятник массой 100 г и длиной 50 см отклонили от положения равновесия на угол 30°. Чему равен момент силы тяжести, действующий на маятник относительно точки подвеса?

3. Два человека несут трубу массой 80 кг и длиной 5 м. Первый человек поддерживает трубу на расстоянии 1 м от её конца, а второй держит противоположный конец трубы. Найти силу давления трубы на каждого человека.

4. Лестница опирается на вертикальную стену и пол. При каких значениях угла между лестницей и полом она может стоять, если коэффициент трения между лестницей и полом μ_1, а коэффициент трения между лестницей и стеной μ_2.

5. Деревянный брусок массой 2 кг лежит на наклонной плоскости. Угол наклона плоскости к горизонту равен 60°. С какой силой, направленной перпендикулярно к плоскости, нужно прижать брусок, чтобы он не начал двигаться? Коэффициент трения между бруском и наклонной плоскостью 0,4.

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. Чтобы ***не вращающееся тело находилось в равновесии, необходимо, чтобы сумма проекций приложенных к нему сил на любую ось была равна нулю***.
2. Если равнодействующая сил, приложенных к телу, равна нулю, то тело может двигаться равномерно и прямолинейно или

покоиться. При таком движении **тело находится в равновесии.**

3. ***Уравновешивающая сила*** – это сила, по величине равная равнодействующей, приложенная к той же точке и направленная по линии действия равнодействующей силы в противоположную сторону**.**
4. **Момент силы относительно оси вращения** – это физическая величина, равная векторному произведению радиус-вектора, проведенного из оси вращения к точке приложения вращающей силы, и вектора силы: $\vec{M} = \left[\vec{r} \cdot \vec{F}\right]$.
5. ***Тело, имеющее ось вращения, находится в равновесии, если алгебраическая сумма моментов всех вращающих сил равна нулю***.
6. Общее условие статического равновесия твердого тела: твердое тело находится в равновесии, если векторная сумма приложенных к телу сил равна нулю и алгебраическая сумма моментов этих сил относительно оси вращения равна нулю:

$$\sum_i \vec{F}_i = 0, \quad \text{и} \quad \sum_i M_i = 0.$$

7. Равновесие бывает устойчивое, неустойчивое и безразличное. ***В положении устойчивого равновесия тело обладает минимальной потенциальной энергией***.

ТЕМА 2. **РАВНОДЕЙСТВУЮЩАЯ СИЛА (для самостоятельного изучения)**

Новые слова и словосочетания

равнодействующая	уравновешивающая
параллельные	антипараллельные
пара сил	момент пары сил
закреплённый	не закреплённый
свободный	теорема
произвольный	рычаг

Если тело движется поступательно или покоится, то все точки тела имеют одинаковые скорости и описывают при своём движении одинаковые траектории. Тело будет находиться в покое или двигаться равномерно и прямолинейно, если сумма внешних сил, действующих на тело равна нулю: $\sum_i \vec{F}_i = 0$.

Значит, **тело будет находиться в статическом или динамическом равновесии (в покое или двигаться равномерно и прямолинейно), если равнодействующая сила равна нулю:** $\vec{R} = \sum_i \vec{F}_i = 0.$

Равенство нулю суммы внешних сил, действующих на тело, необходимо для равновесия, но недостаточно. При выполнении этого условия центр масс тела будет покоиться или двигаться с постоянной скоростью, но тело может вращаться относительно оси.

Если **тело, имеющее ось вращения, находится в равновесии, то сумма проекций моментов всех приложенных сил на ось вращения равна нулю**

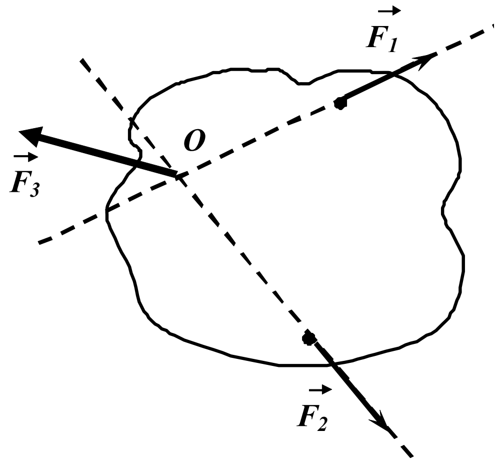
$$\sum_i M_i = 0.$$

Эти условия необходимы и достаточны для равновесия любого твердого тела.

Условие статического равновесия твердого тела: твердое тело находится в равновесии, если векторная сумма приложенных к телу сил равна нулю и алгебраическая сумма моментов этих сил относительно любой оси вращения равна нулю:

$$\sum_i \vec{F}_i = 0, \quad \text{и} \quad \sum_i M_i = 0.$$

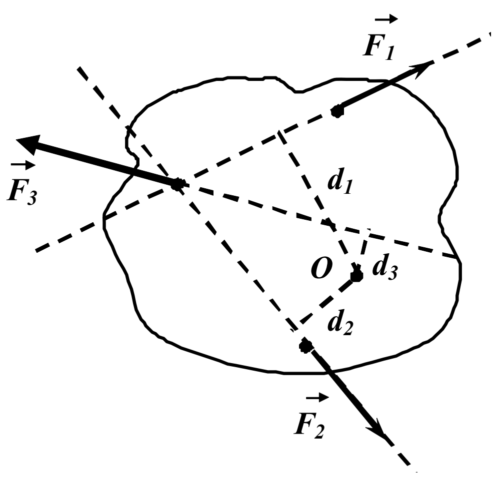
Теорема о трех силах. Если под действием трех сил $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, $\vec{F}_3$ тело находится в равновесии, то силы лежат на прямых, пересекающихся в одной точке.



Равнодействующая сила $\vec{R}$ – это сила, которая действует на тело так же как несколько сил вместе: $\vec{R} = \sum_i \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = 0$. Так как $\vec{F}_3 = -(\vec{F}_1 + \vec{F}_2)$, то все силы лежат в одной плоскости. Моменты сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ относительно точки *O* пересечения прямых, на которых лежат эти силы, равны нулю. Из условия $\sum_i M_i = 0$ следует, что прямая, на которой лежит сила $\vec{F}_3$, проходит через точку *O*.

Теорема о равнодействующей силе. Если под действием сил $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, $\vec{F}_3$, …., тело находится в равновесии, то суммарный момент этих сил относительно любой оси равен нулю.

Докажем, что для тела, находящегося в равновесии момент действующих сил относительно любой (произвольной) оси вращения равен нулю. Пусть на тело действую три силы. Тело находится в равновесии. Найдем суммарный момент этих сил относительно оси, проходящей через точку *O* перпендикулярно чертежу (точку *O* выбрали произвольно). Определим плечо каждой силы. Плечо силы – это кратчайшее расстояние от оси вращения до линии действия силы. Тогда



$$M = \sum_i M_i = F_1 d_1 - F_2 d_2 - F_3 d_3$$

с учетом направления моментов. С другой стороны результирующий момент сил, действующих на тело равен моменту равнодействующей силы $M = Rd$. Однако, согласно первому условию равновесия $\vec{R} = \sum_i \vec{F}_i = 0$, следовательно $M = Rd = 0$. Таким образом, при условии равновесия сумма моментов всех внешних сил относительно произвольной оси равна нулю.

2.1. <u>Сложение параллельных сил</u>

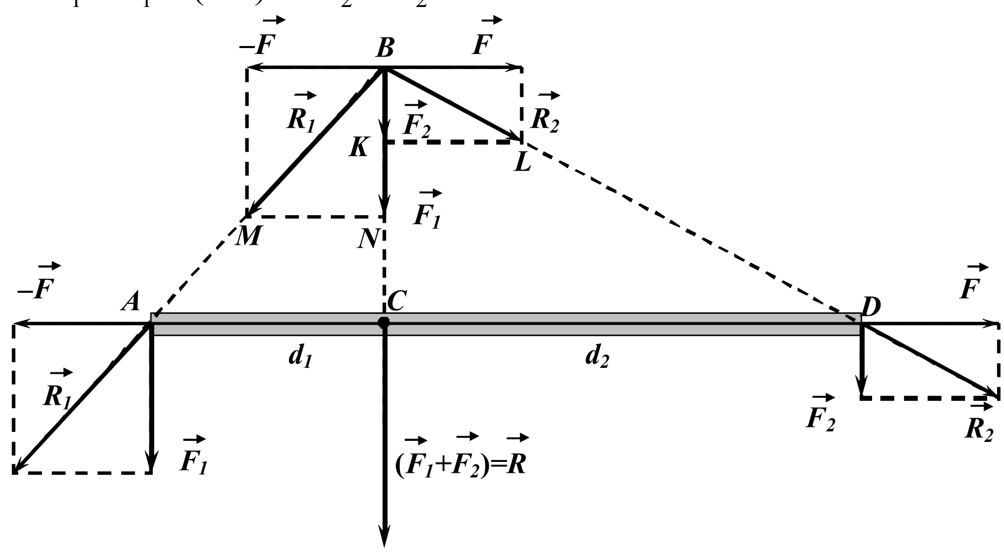
Параллельные силы – это силы, линии действия которых параллельны и силы направлены в одну сторону.

Сложить параллельные силы – это значит найти величину, направление и точку приложения их равнодействующей силы.

<u>Способ 1 (графический).</u>

Рассмотрим твердое тело в виде тонкого невесомого стержня длиной *AD,* к концам которого приложены параллельные силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$. Необходимо найти величину и точку приложения равнодействующей силы. Воспользуемся графическим способом.

Чтобы сложить две параллельные силы тяжести $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ воспользуемся следующим приемом. В точке A и в точке D приложим равные и противоположно направленные силы $\vec{F}$ и $-\vec{F}$. Найдем результирующие силы $\vec{R}_1 = \vec{F}_1 + (-\vec{F})$ и $\vec{R}_2 = \vec{F}_2 + \vec{F}$ в точках A и D.



Проведем линии действия сил $\vec{R}_1$ и $\vec{R}_2$ до пересечения их в точке B. Перенесем силы $\vec{R}_1$ и $\vec{R}_2$ в точку B и разложим их на первоначальные составляющие. Из рисунка видно, что силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ в точке B направлены по одной прямой и их результирующая равна $\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$. Перенесем $\vec{R}$ по линии действия. Тогда точка C – это точка приложения $\vec{R}$. Положение точки приложения силы $\vec{R}$ можно найти из подобия (конгруэнтности) треугольников ACB и MNB, CDB и KLB:

$$\frac{AC}{MN}=\frac{BC}{BN} \text{ и } \frac{CD}{KL}=\frac{BC}{BK}.$$

Так как из рисунка $BN=F_1$ и $BK=F_2$; $AC=d_1$ и $CD=d_2$; $MN=\left|-\vec{F}\right|$ и $KL=\left|\vec{F}\right|$, тогда

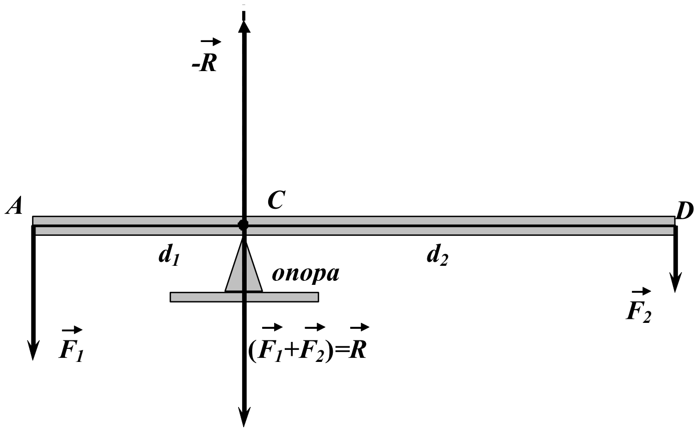
$$\frac{d_1}{\left|-\vec{F}\right|}=\frac{BC}{F_1}; \qquad \frac{d_2}{\left|\vec{F}\right|}=\frac{BC}{F_2} \qquad \text{или}$$

$$F_1 \cdot d_1 = F_2 \cdot d_2,$$

$$\frac{d_1}{d_2}=\frac{F_2}{F_1}.$$

Таким образом, **равнодействующая двух параллельных сил по величине равна сумме этих сил и направлена в ту же сторону.** Точка приложения равнодействующей силы ***делит расстояние между точками приложения параллельных сил на отрезки, обратно пропорциональные числовому значению этих сил***.

Чтобы тело находилось в равновесии, необходимо, чтобы к телу приложить уравновешивающую силу. ***Уравновешивающая сила – это сила, по величине равная равнодействующей, приложенная к той же точке и направленная по линии действия равнодействующей силы в противоположную сторону.*** Например, положим стержень на опору. Тогда сила реакции опоры – это уравновешивающая сила и тогда суммарная сила, действующая на стержень равна нулю.



Твердое тело, имеющее неподвижную ось вращения и находящееся в равновесии относительно этой оси называется **рычагом.**

<u>Способ 2 (по правилу моментов).</u> При сложении параллельных сил удобно пользоваться правилом моментов. Если стержень находится в равновесии, то суммарный момент сил относительно оси вращения, проходящей через точку C приложения равнодействующей силы равен нулю. Следовательно, $M_1=F_1 \cdot d_1$ – момент силы $\vec{F}_1$, $M_2=F_2 \cdot d_2$ – момент силы $\vec{F}_2$, d_1 и d_2 – плечи этих сил. Момент силы M_2 – положительный, а M_1 – отрицательный. Тогда

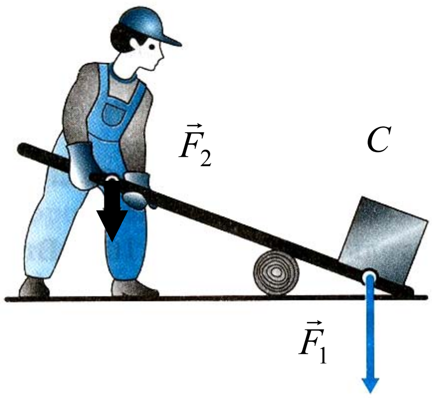
$$-M_1 + M_2 = 0,\ M_1 = M_2$$

или $$F_1 \cdot d_1 = F_2 \cdot d_2, \qquad \frac{d_1}{d_2} = \frac{F_2}{F_1}.$$

Вывод:

1) если стержень находится в равновесии на опоре, то точка опоры (точка *C*) делит расстояние между точками приложения сил обратно пропорционально модулям приложенных к концам стержня сил $F_1 \cdot d_1 = F_2 \cdot d_2$. (правило рычага).

2) если стержень находится на опоре в точке *C*, к концу которого приложена сила $\vec{F}_1$, то чтобы стержень находился в равновесии, необходимо к другому концу стержня приложить силу $\vec{F}_2$, точка приложения которой определяется согласно уравнению $F_1 \cdot d_1 = F_2 \cdot d_2$. Величина силы $\vec{F}_2$ зависит от расстояния d_2 точки приложения этой силы от точки *C* приложения равнодействующей силы («золотое правило механики» – сколько выигрывается в силе, столько проигрывается в расстоянии). Чем больше сила, тем меньше расстояние от точки опоры до точки приложения силы.



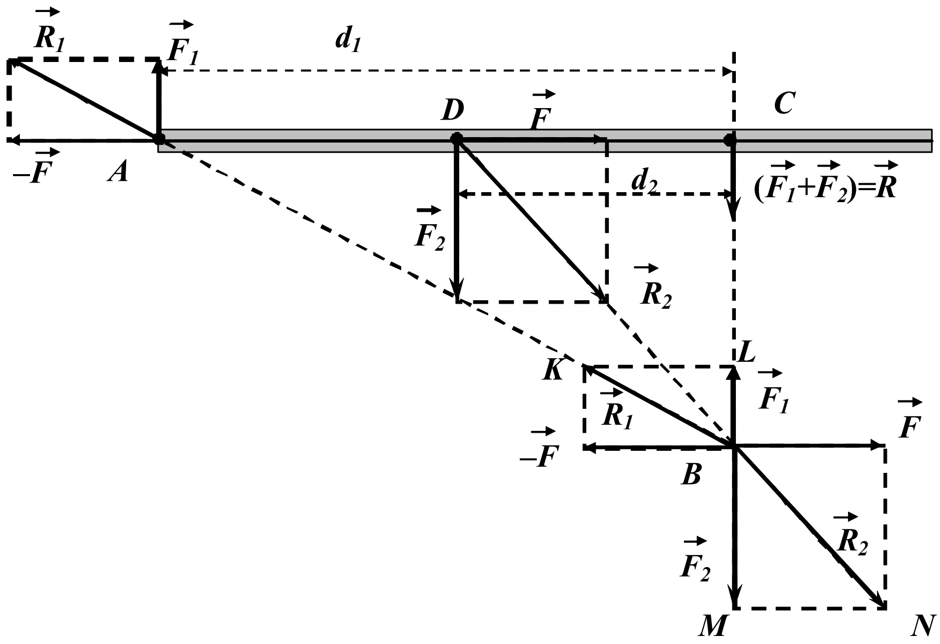
2.2. <u>Сложение антипараллельных сил</u>

Антипараллельные силы – это силы, линии действия которых параллельны и силы направлены в противоположные стороны.

Сложить антипараллельные силы, значит найти величину, направление и точку приложения их равнодействующей.

<u>Способ 1 (графический).</u> Рассмотрим твердое тело в виде тонкого невесомого стержня, к которому приложены антипараллельные силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$. Необходимо найти величину и точку приложения равнодействующей силы.

Чтобы сложить две антипараллельные силы тяжести $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ воспользуемся следующим приемом. В точке A и в точке D приложим равные и противоположно направленные силы $\vec{F}$ и $-\vec{F}$. Найдем результирующие силы $\vec{R}_1 = \vec{F}_1 + (-\vec{F})$ и $\vec{R}_2 = \vec{F}_2 + \vec{F}$ в точках A и D.



Проведем линии действия сил $\vec{R}_1$ и $\vec{R}_2$ до пересечения их в точке B. Перенесем силы $\vec{R}_1$ и $\vec{R}_2$ в точку B и разложим их на первоначальные составляющие. Из рисунка видно, что силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ в точке B направлены по одной прямой и их результирующая равна $\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$. Перенесем $\vec{R}$ по линии действия. Тогда точка C – это точка приложения силы $\vec{R}$. Положение точки приложения силы $\vec{R}$ можно найти из подобия (конгруэнтности) треугольников ACB и KLB и треугольников CDB и MNB:

$$\frac{CD}{MN} = \frac{BC}{BM} \text{ и } \frac{AC}{KL} = \frac{BC}{BL}.$$

Так как из рисунка $BL = F_1$ и $BM = F_2$; $AC = d_1$ и $CD = d_2$; $MN = |\vec{F}|$ и $KL = |-\vec{F}|$, тогда

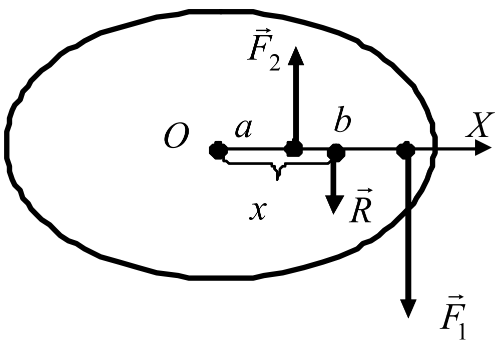
$$\frac{d_1}{|-\vec{F}|} = \frac{BC}{F_1}; \qquad \frac{d_2}{|\vec{F}|} = \frac{BC}{F_2} \text{ или } F_1 \cdot d_1 = F_2 \cdot d_2, \qquad \frac{d_1}{d_2} = \frac{F_2}{F_1}.$$

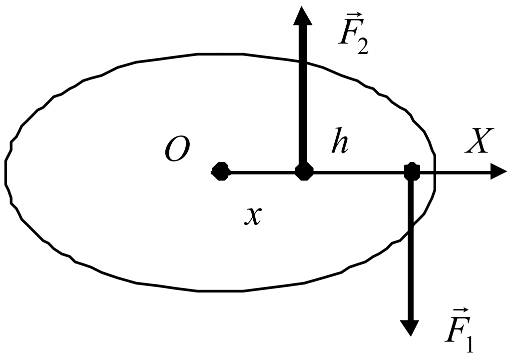
Равнодействующая двух антипараллельных сил по величине равна разности этих сил $R = F_2 - F_1$ и направлена в сторону большей силы. Точка приложения равнодействующей лежит за большей силой на расстоянии, обратно пропорциональном модулям сил.

Вывод:

1) чтобы стержень находился в равновесии, необходимо его положить на опору, тогда результирующая сила, действующая на стержень, равная сумме равнодействующей и силы реакции опоры будет равна нулю. Если стержень находится в равновесии на опоре, то точка опоры (точка *C*) делит расстояние между точками приложения сил обратно пропорционально модулям приложенных к концам стержня сил $F_1 \cdot d_1 = F_2 \cdot d_2$.

2) если стержень находится на опоре в точке *C*, то вращающий момент, действующий на стержень равен нулю $F_1 \cdot d_1 = F_2 \cdot d_2$.





<u>Способ 2 (по правилу моментов).</u> На диск действуют силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, направленные противоположно. Диск может вращаться относительно оси, проходящей через точку *O* перпендикулярно чертежу. Действие силы $\vec{F}_2$, приложенной в точке с координатой *a,* и силы $\vec{F}_1$, приложенной в точке с координатой (*a*+*b*), можно заменить равнодействующей силой $R = F_1 - F_2$, которая приложена в точке с координатой *x*:

$$F_1(a+b) - F_2 a = Rx \quad \text{или}$$

$$x = \frac{F_1(a+b) - F_2 a}{F_1 - F_2}.$$

Парой сил называют две силы, равные по модулю $|\vec{F}_1| = |\vec{F}_2| = F$, противоположные по направлению $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$, линии действия которых не лежат на одной прямой.

Кратчайшее расстояние между линиями действия *h* пары сил, называют плечом пары сил.

Равнодействующая двух антипараллельных равных по величине сил (пары сил) равна нулю $R = F_1 - F_2 = 0$. Пара сил не имеет равнодействующей и приводит тело, на которое она действует во вращательное движение. Момент пары сил равен произведению силы F на плечо пары сил *h*:

$$M = F \cdot h\,.$$

Момент пары сил не зависит от положения точки приложения сил относительно оси вращения тела. Покажем это.

Рассмотрим диск, который может вращаться относительно оси проходящей через точку O перпендикулярно чертежу.

Найдем вращающий момент сил, действующих на тело:

$$M = \sum_i M_i = F_1(x+h) - F_2 x = F(x+h) - Fx = Fh$$

Момент пары сил не зависит от x, что и требовалось доказать.

Вывод: равнодействующая пары сил равна нулю. Пара сил не меняет скорость поступательного движения тела, так как $\sum_i \vec{F}_i = 0$. Момент пары сил не равен нулю, поэтому тело вращается.

УПРАЖНЕНИЯ

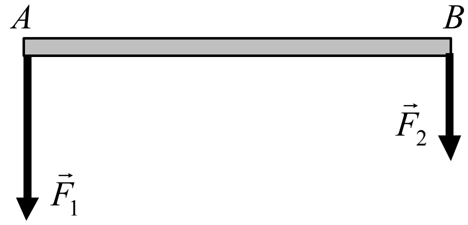
Упражнение 1. *Слушайте, читайте, повторяйте.*

Сила; вектор силы; точка приложения силы; величина силы; направление силы; момент силы; плечо силы; пара сил; плечо пары сил.

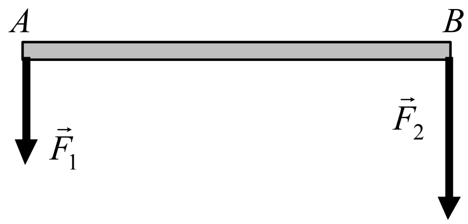
Сложение сил; сложение векторов; векторная сумма; сложение параллельных сил; сложение антипараллельных сил; равнодействующая сила; результирующая сила; сложить силы – значит найти равнодействующую силу; сложить силы – значит найти результирующую силу; уравновешивающая сила.

Упражнение 2. *Решите задачи.*

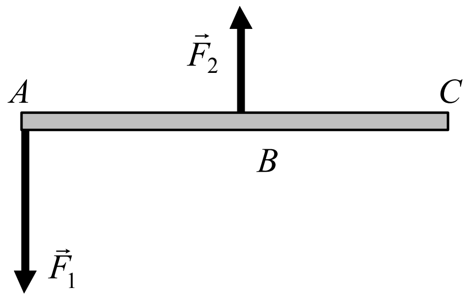
1. Чему равна и как направлена равнодействующая двух одинаково направленных сил $F_1 = 8H$ и $F_2 = 6H$, приложенных к концам невесомого стержня длиной AB = 20 см. Определить положение точки приложения равнодействующей силы графическим способом.



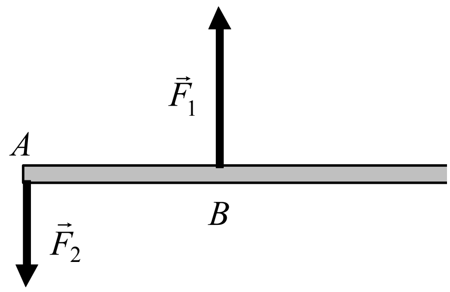
2. Чему равна и как направлена равнодействующая двух одинаково направленных сил $F_1 = 8H$ и $F_2 = 16H$, приложенных к концам невесомого стержня длиной АВ = 20 см. Определить положение точки приложения равнодействующей силы используя правило моментов.

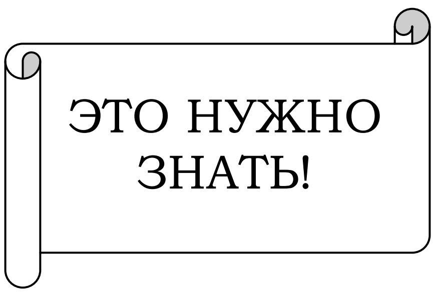


3. Чему равна и как направлена равнодействующая двух противоположно направленных сил $F_1 = 10H$ и $F_2 = 6H$, приложенных к невесомому стержню длиной АС = 50 см. Расстояние АВ = 30 см. Определить положение точки приложения равнодействующей силы графическим способом.



4. Чему равна и как направлена равнодействующая двух противоположно направленных сил F_1 и F_2, приложенных к невесомому стержню длиной 60 см, если расстояние АВ = 25 см. Где находится точка приложения равнодействующей силы, если $F_1 = 100H$, а $F_2 = 20\ H$? Как нужно изменить силу F_1 не меняя величины, направления и точки приложения силы F_2, чтобы точка приложения равнодействующей находилась на конце стержня? Решить задачу используя правило моментов.





Физические термины

1. **Параллельные силы** – это силы, линии действия которых параллельны и силы направлены в одну сторону. Сложить па-

раллельные силы – это значит найти величину, направление и точку приложения их равнодействующей силы.

2. Равнодействующая двух параллельных сил по величине равна сумме этих сил и направлена в ту же сторону. Точка приложения равнодействующей силы *делит расстояние между точками приложения параллельных сил на отрезки, обратно пропорциональные числовому значению этих сил*.
3. **Антипараллельные силы** – это силы, линии действия которых параллельны и силы направлены в противоположные стороны.
4. Равнодействующая двух антипараллельных сил по величине равна разности этих сил $R = F_2 - F_1$ и направлена в сторону большей силы. Точка приложения равнодействующей лежит за большей силой на расстоянии, обратно пропорциональном модулям сил.
5. Парой сил называют две силы, равные по модулю $|\vec{F}_1| = |\vec{F}_2| = F$, противоположные по направлению $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$, линии действия которых не лежат на одной прямой. Кратчайшее расстояние между линиями действия h пары сил, называют плечом пары сил.
6. Равнодействующая двух антипараллельных равных по величине сил (пары сил) равна нулю $R = F_1 - F_2 = 0$. Пара сил не имеет равнодействующей и приводит тело, на которое она действует во вращательное движение. Момент пары сил равен произведению силы F на плечо пары сил h:

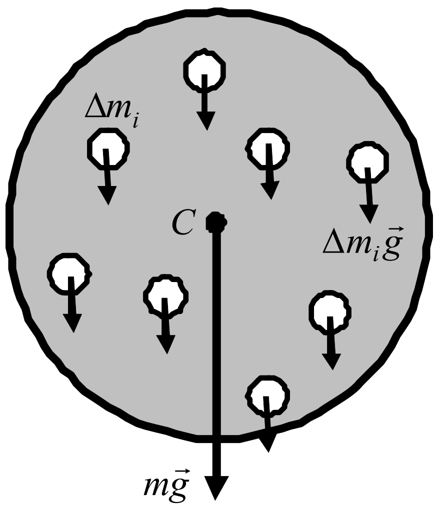
$$M = F \cdot h .$$

ТЕМА 3. **ЦЕНТР ТЯЖЕСТИ. ЦЕНТР МАСС**

Новые слова и словосочетания	
геометрическая форма	
правильная геометрическая форма	
неправильная форма	произвольная форма
симметрия	ось симметрии
однородный	техника
устойчивость	сооружение

3.1. **Центр тяжести**

Если твердое тело массой m находится в гравитационном поле, то на тело действует сила тяжести $m\vec{g}$. **Точка приложения силы тяжести твердого тела называется центром тяжести.**



C –центр тяжести тела

С другой стороны, любое тело можно мысленно разбить на материальные точки массой Δm_i. На каждую материальную точку действует сила тяжести $\Delta m_i\vec{g}$. Для нахождения силы тяжести всего тела нужно силы тяжести $\Delta m_i\vec{g}$ сложить по правилу сложения параллельных сил $m\vec{g} = \sum_{i=1}^{N} \Delta m_i\vec{g}$.

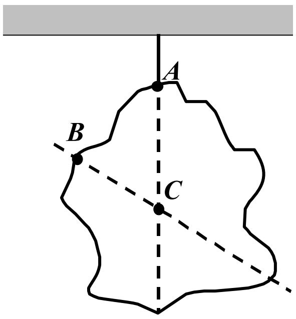
Таким образом, центр тяжести твердого тела – это точка приложения равнодействующей сил тяжести всех материальных точек, составляющих твердое тело.

Центром тяжести тела называется точка, к которой приложена равнодействующая всех сил тяжести, действующих на отдельные части (частицы), из которых состоит тело.

Нахождение положения центра тяжести твердого тела является важной технической задачей, так как от положения центра тяжести зависит устойчивость зданий, мостов, машин, технических сооружений. Поэтому познакомимся с методами определения положения центра тяжести твердого тела.

Положение центра тяжести можно определить двумя методами: экспериментально и теоретически.

Метод 1. Положение центра тяжести определяется экспериментально.

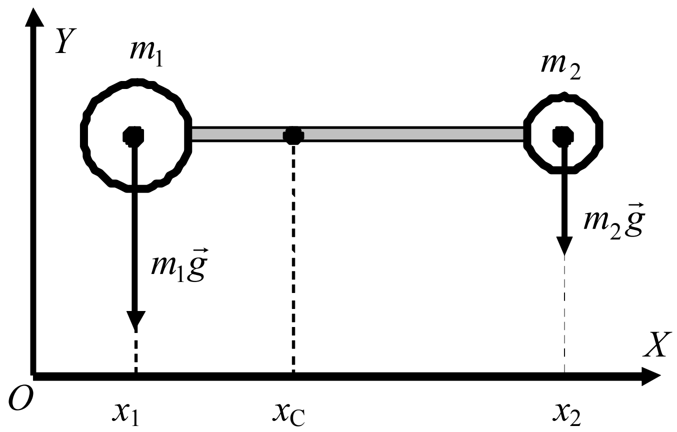


Для определения положения центра тяжести тела произвольной формы, его можно последовательно подвесить на нити за любые две произвольные точки тела. Например, сначала за точку A тела, а затем – за точку B. Точка C, в которой пересекутся продолжения нити (линия действия силы реакции нити) и будет центром тяжести.

Центр тяжести однородных тел правильной геометрической (простой) формы находится в его геометрическом центре. Центр тяжести однородного стержня находится в середине стержня. Центр тяжести круга – в его геометрическом центре, у параллелограмма – в точке пересечения диагоналей и т.д. Центр тяжести может находиться и вне тела. Например, центр тяжести кольца находится в центре кольца.

Метод 2. Координаты центра тяжести тела произвольной формы можно определить теоретически, используя правило моментов.

Пример 1. Найдём положение центра тяжести системы из двух шаров массами m_1 и m_2, укрепленных на концах тонкого невесомого стержня.



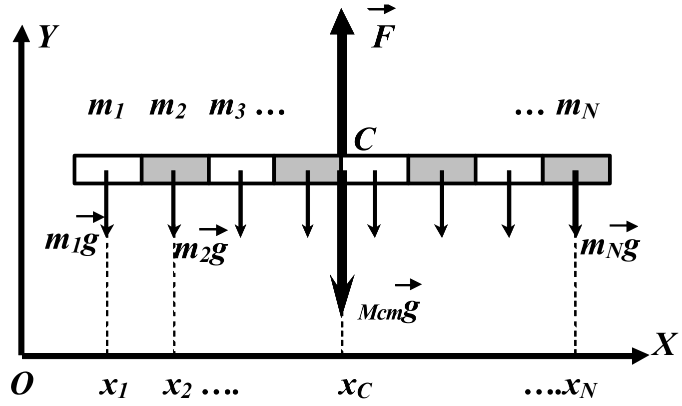
При сложении параллельных сил равнодействующая сила равна их сумме: $R = m_1 g + m_2 g$. Точка приложения этой силы совпадает с положением центра тяжести системы. Запишем правило моментов для системы, изображенной на рисунке относительно оси OY: $m_1 g x_1 + m_2 g x_2 = R x_C$,

отсюда найдем координату центра тяжести

$$x_C = \frac{m_1 g x_1 + m_2 g x_2}{R} = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2}.$$

Пример 2. На рисунке изображен однородный стержень массой M_{cm}. Разобьем (мысленно) стержень на N малых участков $M_{cm} = \sum_{i=1}^{N} m_i$

(количество малых участков $N \to \infty$, а m_i – мало по сравнению с массой стержня). На каждый участок стержня действует сила тяжести $m_i\vec{g}$ (m_i – масса i –того участка стержня, i – номер участка). Если сложить все силы тяжести, действующие на все малые участки стержня, то величина ***равнодействующей*** равна силе притяжения стержня со стороны Земли



$$\vec{R} = M_{cm}\vec{g} = \sum_{i=1}^{N} m_i\vec{g}\,.$$

Центр тяжести – это точка (точка C) приложения равнодействующей параллельных сил тяжести малых участков стержня. Приложим к стержню внешнюю силу $\vec{F}$ так, чтобы стержень находился в равновесии. Это означает, что суммарное действие силы $\vec{F}$ и $\vec{R}$ не вызывает вращения тела. Следовательно, выполняется условие равновесия для моментов всех сил относительно любой неподвижной оси. Запишем условие равновесия относительно оси OY.

Момент M равнодействующей $\vec{R}$ и момент M' внешней силы $\vec{F}$ должны в сумме быть равны нулю: $M + M' = 0$. Очевидно, что это условие сводится к требованию, чтобы равные по модулю и противоположно направленные силы $\vec{F}$ и $\vec{R}$ имели бы одну и ту же линию действия.

Момент M равнодействующей $\vec{R}$ относительно оси OY равен

$$M = R \cdot x_C = M_{cm}g \cdot x_C,$$

с другой стороны, момент равнодействующей $\vec{R}$ относительно оси OY, равен сумме моментов сил тяжести всех участков стержня относительно этой же оси :

$$M = \sum_i M_i = m_1x_1g + m_2x_2g + ... + m_Nx_Ng = \sum_{i=1}^{N} m_ix_ig\,.$$

Найдем координату центра тяжести: $M_{cm}g \cdot x_C = g\sum m_ix_i$ или

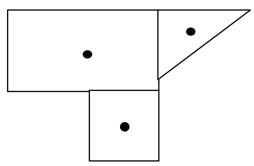
$$x_C = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i x_i}{M_{cm}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i x_i}{\sum_{i=1}^{N} m_i}.$$

Аналогично можно найти другие координаты центра тяжести твердого тела: $y_C = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i y_i}{M_{cm}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i y_i}{\sum_{i=1}^{N} m_i}$ и $z_C = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i z_i}{M_{cm}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i z_i}{\sum_{i=1}^{N} m_i}$.

Зная координаты центра масс можно определить радиус-вектор центра тяжести: $\vec{r}_C = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i \vec{r}_i}{M_{cm}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i \vec{r}_i}{\sum_{i=1}^{N} m_i}$.

Если стержень однородный, то $m_i = const$. Тогда координата центра тяжести равна: $x_C = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i x_i}{\sum_{i=1}^{N} m_i} = \frac{m_i \sum_{i=1}^{N} x_i}{N m_i} = x_{cp}$. Таким образом, координата центра тяжести однородного стержня совпадает с координатой середины стержня.

Любое тело сложной формы состоит из тел простой формы. Для определения положения центра тяжести тела сложной (неправильной) формы, нужно, прежде всего, определить положения центров тяжести отдельных его частей простой формы. Определив положение центров тяжести отдельных частей тела сложной формы, можно найти центр тяжести всего тела. Для этого нужно все тело заменить системой материальных точек, расположенных в центрах тяжести составных частей тела. Эти материальные точки имеют массу этой части тела.



3.2. <u>**Центр масс**</u>

Если тело движется поступательно, то существует точка, в которой пересекаются направления действия всех приложенных к телу сил (точка приложения равнодействующей силы). Эта точка называется ***центр***

масс. Любая сила, линия действия которой не проходит через центр масс, вызывает вращение тела.

Центром масс тела называют точку, через которую должны проходить линии действия сил, сообщающих телу ускоренное поступательное движение.

Центр масс движется так, как будто в ней сосредоточена вся масса тела, и к нему приложены все силы, действующие на тело. Поэтому, рассматривая поступательное движение тела, можно рассматривать движение только одной материальной точки – центра масс.

Положение центра масс системы материальных точек определяется по формуле: $\vec{r}_C = \dfrac{\sum\limits_{i=1}^{N} m_i \vec{r}_i}{\sum\limits_{i=1}^{N} m_i}$, где m_i – масса i –той материальной точки, $\vec{r}_i$ – радиус-вектор i –той материальной точки относительно выбранной системы координат.

Центр масс системы материальных точек (или твердого тела) – воображаемая точка, положение которой характеризует распределение массы этой системы.

Если тело движется поступательно в однородном поле силы тяжести, то положение центра тяжести и центра масс совпадают. Сила тяжести действует на все материальные точки тела. Поэтому их равнодействующая при любом положении тела проходит через центр масс и через центр тяжести. Значит, центр масс и центр тяжести совпадают.

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Слушайте, читайте, повторяйте.*

Теория; теоретический; эксперимент; экспериментальный; геометрия; геометрический; симметрия; симметричный.

Положение; определить положение; находить; нахождение; сооружать; сооружение; распределять; распределение; совпадать; совпадение; изображать; изображение; пересекать; пересечение.

Форма; простая форма; сложная форма; произвольная форма.

Движение поступательное; движение вращательное.

Воображать; воображение; воображаемая точка.

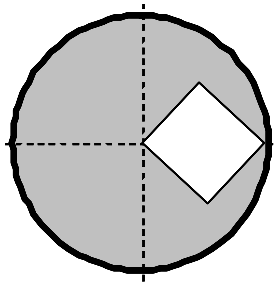
Упражнение 2. *Решите задачи.*

1. Найти положение центра тяжести двух частиц массами m_1 и m_2, находящихся на расстоянии l друг от друга.

2. Два малых по размерам груза массами 4 кг и 2 кг скреплены невесомым стержнем длиной 6 м. На каком расстоянии от центра стержня находится центр тяжести системы?

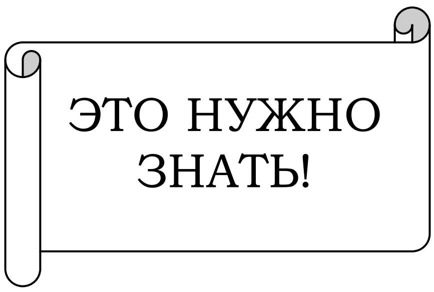
3. Цинковый и алюминиевый шары закреплены в точке касания. Найти положение центра тяжести шаров. Радиус каждого шара R.

4. Определить положение центра тяжести системы, состоящей из трех соприкасающихся шаров радиусом R каждый и массами 1 кг, 2 кг, 3 кг, расположенных вдоль одной прямой.



5. Из однородной круглой пластинки радиусом R вырезали квадрат, диагональ которого совпадает с радиусом круга и равна ему. Найти положение центра тяжести полученной пластины.

6. Из однородной круглой пластинки радиусом 9 см вырезан круг вдвое меньшего радиуса. Найти положение центра тяжести полученной пластинки.



Физические термины

1. Точка приложения силы тяжести твердого тела называется центром тяжести.
2. *Центром тяжести тела называется точка, к которой приложена равнодействующая всех сил тяжести, действующих на отдельные части (частицы), из которых состоит тело.*
3. Координаты центра тяжести можно найти по формулам:

$$x_C = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i x_i}{M_{cm}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i x_i}{\sum_{i=1}^{N} m_i}; \; y_C = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i y_i}{M_{cm}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i y_i}{\sum_{i=1}^{N} m_i};$$

$$z_C = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i z_i}{M_{cm}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i z_i}{\sum_{i=1}^{N} m_i}, \text{ или } \vec{r}_C = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i \vec{r}_i}{\sum_{i=1}^{N} m_i}.$$

4. **Центр масс системы материальных точек (или твердого тела)** – воображаемая точка, положение которой характеризует распределение массы этой системы.
5. ***Центром масс тела*** называют точку, через которую должны проходить линии действия сил, сообщающих телу ускоренное поступательное движение. Центр масс движется так, как будто в ней сосредоточена вся масса тела, и к нему приложены все силы, действующие на тело. Поэтому, рассматривая поступательное движение тела, можно рассматривать движение только одной материальной точки – центра масс.
6. Если тело находится в однородном гравитационном поле, то центр масс и центр тяжести совпадают.

ТЕМА 4. **МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ И ГАЗА. ДАВЛЕНИЕ**

Новые слова и словосочетания

давление	атмосфера
гидродинамика	аэродинамика
гидростатика	аэростатика
гидравлический пресс	сообщаться
сообщающиеся	сжать
сжатие	снабжать, снабжённый
соединять, соединённый	

Равновесие и движение жидкостей и газов изучают в разделе механики – гидроаэромеханике. Раздел гидроаэромеханики, в котором изучаются условия равновесия жидкости или газа, называется гидростатикой и аэростатикой.

Гидростатика изучает свойства **несжимаемых** жидкостей. В несжимаемых жидкостях плотность вещества одинаковая по всему объёму.

Жидкости и газы в отличие от твердого тела не имеют собственной формы, а принимают форму сосуда, в котором они находятся. Газы при этом заполняют весь объём сосуда, а жидкости сохраняют собственный объём. При изменении формы в жидкости и газе упругие силы не возникают, поэтому частицы жидкости и газа начинают двигаться в направлении силы. Это свойство жидкостей и газов – текучесть. Текучесть – это способность одних слоев жидкости и газа двигаться относительно других слоев.

Жидкость будет находиться в покое, если не наблюдается движение одних слоев относительно других слоев.

4.1. **Давление**

Механику жидкостей и газов удобнее описывать не с использованием понятия силы, а с использованием понятия давления.

Давление твердого тела на опору. Всякое тело под действием приложенной к нему силы оказывает давление на опору. **Давлением называется физическая величина, равная отношению силы, действующей перпендикулярно поверхности, к площади этой поверхности:** $P = \frac{F_n}{S}$**.** Силу F_n называют силой нормального давления (силой давления).

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

При одной и той же силе давления давление может быть разным в зависимости от площади опоры тела.

Рис. 1

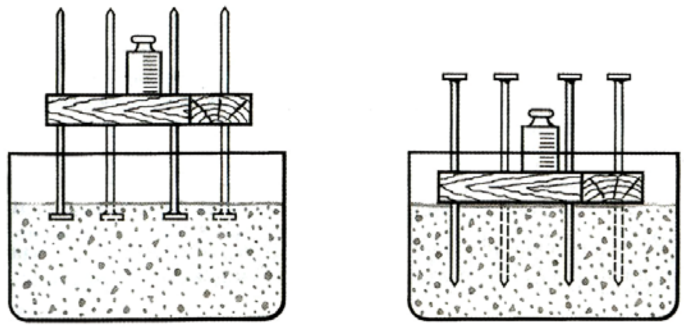


Рис. 2

Рассмотрите внимательно рисунки.

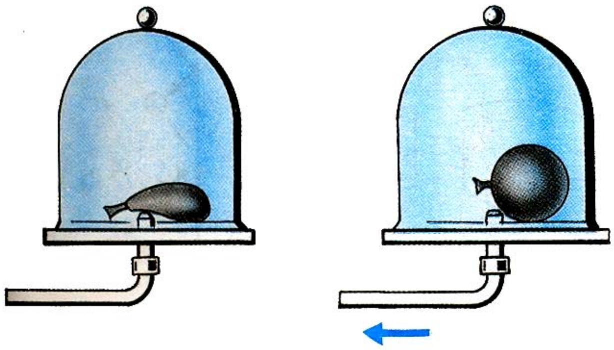
Рисунок 1. Человек без лыж проваливается в снег. Если он наденет лыжи (площадь опоры увеличивается), то давление лыжника на снег станет меньше, и он не проваливается в снег.

Рисунок 2. Тяжёлая доска с грузом установлена на песке так, что гвозди в песок не проваливаются. Если гвозди перевернуть острыми концами вниз (площадь опоры сделать очень маленькой), то гвозди провалятся в песок.

<u>Давление в жидкости и газе.</u> Молекулы газа, совершая беспорядочное хаотичное движение, не связаны или очень слабо связаны силами взаимодействия. Поэтому они движутся свободно и в результате соударений стремятся разлететься во все стороны, заполняя весь объём сосуда. Поэтому объём газа определяется объёмом того сосуда, в котором газ находится.

Молекулы жидкости также очень подвижны, поэтому жидкости принимают форму того сосуда, в котором они находятся. В жидкостях среднее расстояние между молекулами меньше, чем у газов, поэтому жидкости сохраняют собственный объём.

Газ оказывает давление на стенки, дно, крышку сосуда, в котором он находится. Давление газа можно объяснить ударами большого количества беспорядочно движущихся молекул о стенки (дно, крышку) сосуда. Если газ находится в стационарном состоянии, то давление в любых точках поверхности сосуда и внутри газа одинаково.



Пример 1. Рассмотрите внимательно рисунок. Под колокол воздушного насоса поместили резиновый шарик. Он содержит небольшое количество молекул воздуха и имеет неправильную форму. Откачаем воздух из-под колокола. Шарик постепенно раздувается и принимает сферическую форму. Как это можно объяснить?

Вывод: *сферическая форма шарика показывает, что газ оказывает по всем направлениям одинаковое давление.*

Пример 2. Если объём газа изменить, то давление газа также изменится. При уменьшении объёма (если масса газа и температура остаются постоянными) плотность газа увеличится. Тогда число ударов молекул о стенки сосуда увеличится, и давление газа станет больше. Рассмотрите внимательно рисунок.

При уменьшении объёма расстояние между молекулами уменьшается. При этом резиновая пленка выгибается наружу, указывая на то, что давление воздуха внутри цилиндра увеличивается.

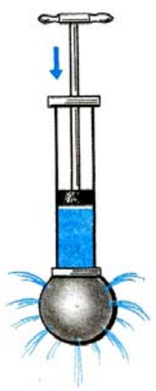
При увеличении объёма плотность газа уменьшается. Число ударов о стенки сосуда станет меньше. Давление уменьшается.

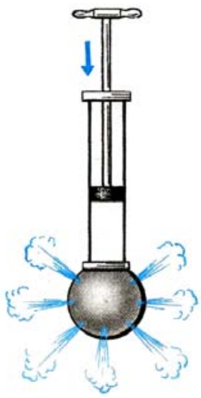
Такие же явления наблюдаются, если вместо газа взять жидкость.

Итак, если масса и температура газа или жидкости остаются постоянными, то при уменьшении объёма газа или жидкости его давление увеличивается, а при увеличении объёма давление уменьшается.

В отличие от твердых тел отдельные слои жидкости или газа могут свободно перемещаться относительно друг друга по всем направлениям. Подвижностью частиц газа и жидкости объясняется, что давление, производимое на них, передается не только в направлении действия силы, а по всем направлениям, в каждую точку жидкости или газа. Обратите внимание на рисунок.

Жидкость или газ передает внешнее давление по всем направлениям без изменения (закон Паскаля).

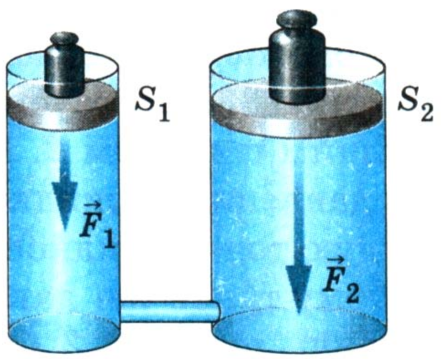




Если на поверхность жидкости (или газа) площадью S, действует внешняя сила F, то эта сила оказывает давление $P_0 = \frac{F}{S}$, которое передается по всем направлениям без изменения.

Закон Паскаля позволяет объяснить действие распространенного в технике **гидравлического пресса (механическая машина).**

Гидравлический пресс состоит из двух цилиндров разного диаметра, снабжённых поршнями и соединённых трубкой. Пространство между поршнями и трубка заполнены жидкостью.



Обозначим площадь первого поршня через S_1, а площадь второго поршня через S_2. Приложим ко второму поршню внешнюю силу F_2. Найдем, какую силу F_1 нужно приложить к первому поршню, чтобы сохранить равновесие.

Согласно закону Паскаля давление во всех точках жидкости должно быть одним и тем же, тогда: $\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}$ или $F_1 = F_2 \frac{S_1}{S_2}$.

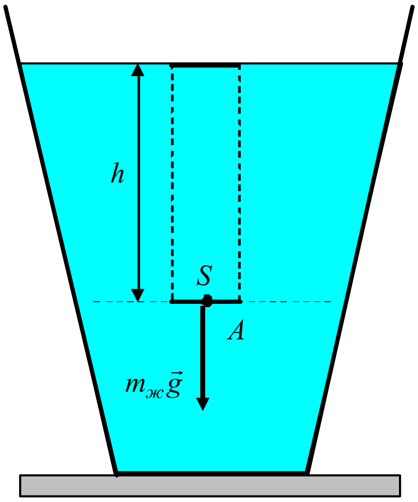
Модуль силы $\vec{F}_1$ во столько же раз больше модуля силы $\vec{F}_2$, во сколько раз площадь первого цилиндра больше площади второго.

Таким образом, при помощи гидравлического пресса **можно малой силой, приложенной к поршню небольшого сечения, получить большую силу,** действующую на поршень большого сечения.

Отношение $\frac{F_2}{F_1}$ **характеризует выигрыш в силе**, получаемый в данной механической машине. *Выигрыш в силе определяется отношением площадей* $\frac{S_2}{S_1}$. *Поэтому, чем больше отношение площадей, тем больше выигрыш в силе.*

4.2. Гидростатическое давление

Жидкости и газы передают по всем направлениям не только оказываемое на них внешнее давление, но и то давление, которое существует



внутри благодаря собственному весу. Верхние слои жидкости давят на нижние слои, на дно сосуда. **Давление жидкости (или газа) на дно и стенки сосуда, обусловленные действием силы тяжести, называют гидростатическим.**

Определим гидростатическое давление столба однородной жидкости плотностью ρ на глубине *h*. Выделим мысленно в окрестности точки *A*, расположенной на глубине *h* в жидкости площадку *S*. На площадку, находящуюся внутри неподвижной жидкости действуют две силы: вес столба жидкости высотой *h* и сила давления со стороны жидкости (по закону Паскаля).

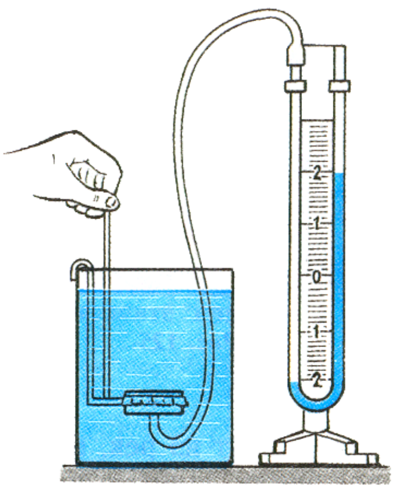
Обозначим *P* давление внутри жидкости на глубине *h*. Тогда по закону Паскаля на площадку со стороны жидкости действует сила $F = PS$. На выделенную площадку действует столб жидкости высотой *h*. Сила давления на площадку будет равна весу столба жидкости: $F = m_{ж} g = \rho g S h$.

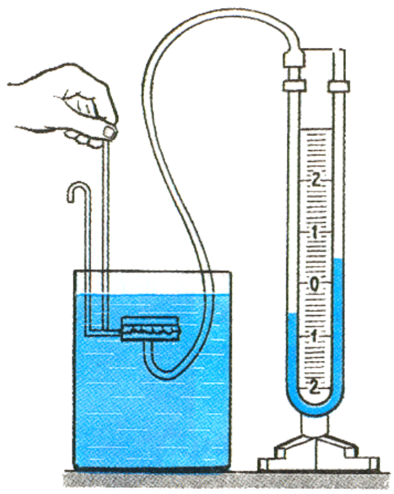
Так как площадка находится в равновесии, то результирующая сила, действующая на площадку равна нулю: $PS = \rho g S h$.

Тогда давление, оказываемое на площадку равно $P = \rho g h$.

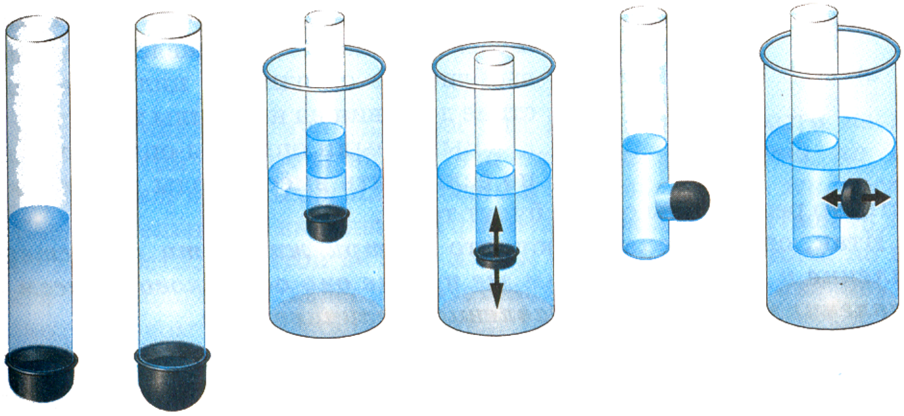
Давление внутри жидкости зависит только от высоты столба (от глубины).

Обратите внимание на эксперимент.





Давление внутри жидкости на данном уровне одинаково по всем направлениям и зависит только от высоты столба.

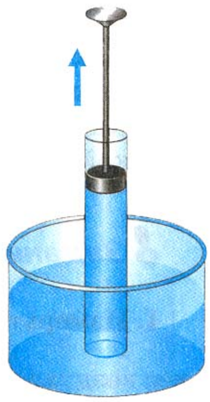


Гидростатическое давление на любой глубине внутри жидкости не зависит от сосуда, в котором находится жидкость.

Полученные результаты справедливы не только для жидкостей, но и для газов.

4.3. Вес воздуха. Атмосферное давление

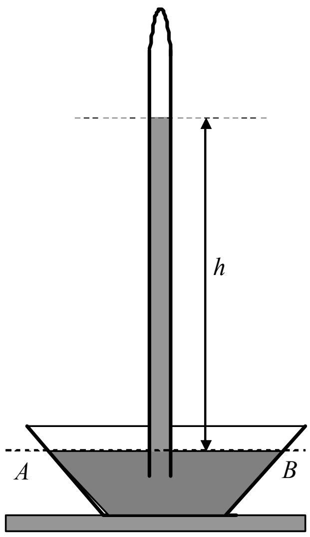
Воздушная оболочка, окружающая Землю, называется **атмосферой.** Атмосфера, как показали наблюдения, простирается на высоту нескольких тысяч километров.



На воздух, как и на любое тело на Земле действует сила тяжести. Вследствие действия силы тяжести верхние слои воздуха сжимают нижние слои. Воздушный слой, прилегающий непосредственно к Земле, сжат больше всего. Согласно закону Паскаля он передает производимое на него давление по всем направлениям. В результате этого земная поверхность и тела, находящиеся на ней, испытывают давление всего столба воздуха (испытывают *атмосферное давление*).

Существованием атмосферного давления могут быть объяснены многие явления, с которыми мы встречаемся в жизни. Рассмотрите внимательно рисунки.

Рассчитать атмосферное давление по формуле $P = \rho gh$ для вычисления давления столба воздуха нельзя, так как плотность воздуха с высотой изменяется, а высота столба воздуха над поверхностью Земли непостоянна. Измерить атмосферное давление можно при помощи опыта Торричелли. В этом опыте использовалась запаянная с одного конца стеклянная трубка длиной 1 *м*. Её заполнили ртутью и, закрыв открытый конец, перевернули в чашку с ртутью. После того как трубку открыли, часть ртути вылилась. Высота столба ртути h, оставшейся в трубке, оказалась равной 760 *мм*.

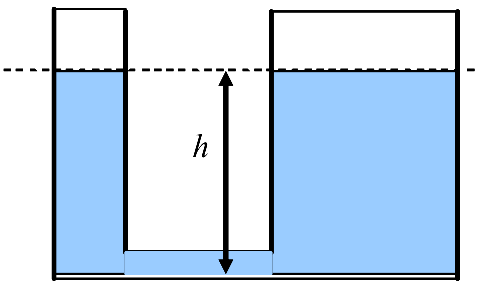


Наблюдаемому явлению можно дать объяснение. Атмосфера давит на поверхность ртути в чашке. Ртуть находится в равновесии. Значит, давление в трубке на уровне *AB* равно атмосферному давлению.

Атмосферное давление равно давлению столба ртути высотой 760 *мм* или равно $P = \rho gh$. Подставляя в эту формулу значения $\rho = 13595{,}1$ *кг/м*^{3} (плотность ртути при 0°С), $g = 9{,}80665\,м/с^2$ (ускорение свободного падения), и $h = 760\,мм = 0{,}76\ м$ (высота ртутного столба), получим: *P* = 101325 *Па*. Это и есть нормальное атмосферное давление.

Атмосферное давление, близкое к нормальному, наблюдается обычно в местностях, находящихся на уровне моря. С увеличением высоты над уровнем моря (например, в горах) давление уменьшается.

4.4. Сообщающиеся сосуды



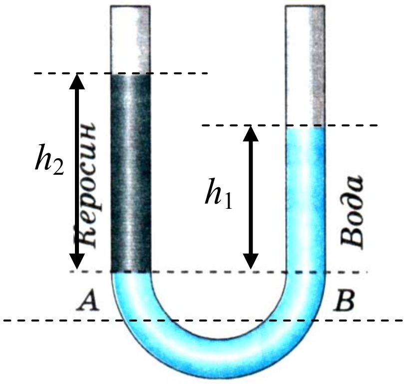
Сосуды, имеющие общую (соединяющую их) часть, заполненные покоящейся жидкостью, называются **сообщающимися.**

В сообщающихся сосудах, заполненных однородной жидкостью плотностью ρ, давление на одной и той же высоте одинаково. Поэтому жидкость в сосудах устанавливается на одном уровне.

В сообщающихся сосудах поверхности однородной жидкости устанавливаются на одном уровне (закон сообщающихся сосудов).

Если в один из сообщающихся сосудов налить одну жидкость (например, воду), а в другой сосуд налить другую жидкость (например, керосин), то уровни жидкостей будут разными.

Так как жидкости в сосудах находятся в равновесии, то можно утверждать, что давление, создаваемые правым и левым столбами жидкостей (например, на уровне *AB)*, равны: $P_1 = P_2$. Или $P_1 = \rho_1 g h_1$, а $P_2 = \rho_2 g h_2$, где ρ_1 – плотность воды, h_1 – высота столба воды относительно уровня *AB;* ρ_2 – плотность керосина, h_2 – высота столба керосина относительно уровня *AB.*



Приравнивая эти выражения, получаем $\rho_1 g h_1 = \rho_2 g h_2$ или $\rho_1 h_1 = \rho_2 h_2$. Из этого равенства следует, что если $\rho_1 > \rho_2$, то $h_1 < h_2$. Это означает, *что в сообщающихся сосудах, содержащих разные жидкости, высота столба жидкости с большей плотностью будет меньше высоты столба жидкости с меньшей плотностью.* Заметим, что высота столба отсчитывается от поверхности соприкосновения жидкостей друг с другом.

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Слушайте, читайте, повторяйте.*

Давление; давление на опору; гидростатическое давление; давление столба; давление на дно; давление на стенки сосуда.

Гидростатика; аэростатика. Гидравлический пресс.

Атмосфера; атмосферный; атмосферное давление; давление атмосферы; нормальное давление; повышенное давление; пониженное давление.

Упражнение 2. *Прочитайте текст, перескажите и ответьте на вопросы.*

ТЕКСТ

Давление на дне морей и океанов.

Гидравлическое давление в жидкости на одной и той же глубине одинаковое. С увеличением глубины давление возрастает. Особенно больших значений оно достигает на дне морей и океанов. Например, на глубине 10 км давление воды составляет около 10^8 Па.

Несмотря на огромное давление, существующее на таких глубинах, и здесь обитают некоторые животные: различные иглокожие, ракообразные, моллюски, черви, глубоководные рыбы. Организм этих животных приспособлен к условиям большого давления и точно такое же давление имеется внутри них.

Человек начал осваивать подводный мир ещё в глубокой древности. Опытные, хорошо тренированные ныряльщики, задерживая дыхание, погружались на глубину 20–30 м.

Опускаться на очень большие глубины человек без специального снаряжения не может. Для погружения на глубину около 40 м используется специальный аппарат со сжатым воздухом – акваланг. Акваланг позволяет находиться под водой до часа и более.

При подводных работах на различных глубинах используются водолазные скафандры. Для исследования морей и океанов на больших глубинах используют батисферы и батискафы.

Вопросы.

1. Каким образом человек может дышать, находясь под водой?
2. Что препятствует погружению людей без специального оборудования на большие глубины?
3. Что такое акваланг? Почему в нём используют сжатый воздух?
4. Чем отличается батискаф от батисферы?

Упражнение 3. *Решите задачи.*

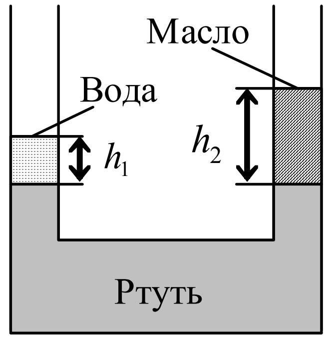
1. Лёд на реке выдерживает давление не более $0{,}7 \cdot 10^5$ Па. Может ли по этому льду пройти трактор массой 4000 кг. если гусеницы трактора шириной 30 см соприкасаются со льдом на длине 400 см?

2. В цилиндрический сосуд налиты ртуть и вода. Массы их одинаковы. Общая высота жидкости равна h. Чему равно гидростатическое давление на дно сосуда?

3. На малый поршень гидравлического пресса действует сила 100 Н. Поршень опускается на расстояние 20 см. Какая сила давления действует на большой поршень, если он поднимается на 10 см.

4. Гидравлический пресс дает выигрыш в силе. Дает ли он выигрыш в работе?

5. В двух сообщающихся сосудах находится ртуть. В один сосуд налили масло, в другой воду. При этом уровень ртути в сосудах не изменился. Чему равна высота столба воды, если высота столба масла 20 см.



6. В двух сообщающихся сосудах разного сечения находится ртуть. В широкий сосуд налили 272 г воды; радиус этого сосуда 4 см. На сколько высота ртути в узком сосуде больше, чем в широком?

7. В двух сообщающихся сосудах находится ртуть. Поверх неё в один сосуд налили масло высотой 48 см, а в другой налили керосин высотой 20 см. Определить разность уровней ртути в обоих сосудах.

8. В двух сообщающихся сосудах находится ртуть. В один сосуд налили масло высотой 20 см. Определить разность уровней ртути в сосудах.

9. С какой силой давит на дно и стенки сосуда вода, если высота столба воды 20 м.

10. На какой глубине в воде давление больше атмосферного в 2 раза, если атмосферное равно 1 атм.

Табличные значения

Вещество	Плотность, кг/м^3	Вещество	Плотность, кг/м^3
Ртуть	13600	Керосин	800
Сталь	7800	Нефть	800
Вода	1000	Спирт	600
Масло	900	Дуб	800
Сосна	500	Железо	7800

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. **Давлением** называется физическая величина, равная отношению силы, действующей перпендикулярно поверхности, к площади этой поверхности: $P = \frac{F_n}{S}$. Силу F_n называют силой нормального давления (силой давления).
2. Жидкость или газ передает внешнее давление по всем направлениям без изменения **(закон Паскаля).**
3. Давление жидкости (или газа) на дно и стенки сосуда, обусловленные действием силы тяжести, называют **гидростатическим.**
4. Давление внутри жидкости зависит только от высоты столба (от глубины). Давление внутри жидкости на данном уровне одинаково по всем направлениям и зависит только от высоты столба. Гидростатическое давление на любой глубине внутри жидкости не зависит от сосуда, в котором находится жидкость.
5. В сообщающихся сосудах поверхности однородной жидкости устанавливаются на одном уровне **(закон сообщающихся сосудов).**
6. В сообщающихся сосудах, содержащих разные жидкости, высота столба жидкости с большей плотностью будет меньше высоты столба жидкости с меньшей плотностью.

ТЕМА 5. **ДЕЙСТВИЕ ЖИДКОСТИ И ГАЗА НА ПОГРУЖЕННОЕ В НИХ ТЕЛО**

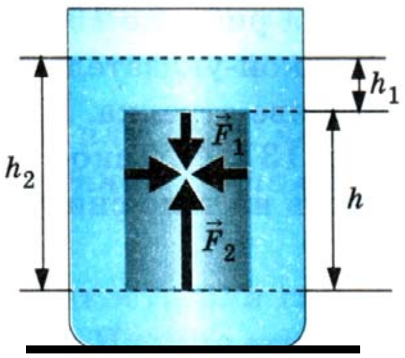
Новые слова и словосочетания

погрузить	погруженный
выталкивать	выталкивающая
сила Архимеда	плавать
плавание	вытеснять
вытесненная	

5.1. **Выталкивающая сила (сила Архимеда)**

Под водой мы можем легко поднять камень, который с трудом поднимаем в воздухе. Если погрузить пробку в воду и отпустить, то она всплывает на поверхность. Как объяснить эти явления?

Мы знаем, что жидкость давит на дно и стенки сосуда, а если в неё погрузить какое-нибудь твердое тело, то оно также будет испытывать давление со стороны жидкости.



Рассмотрим силы, которые действуют на погруженное в жидкость тело. Пусть тело цилиндрической формы погружено в жидкость так, как показано на рисунке. Площадь основания цилиндра S.

Силы, действующие на боковые стороны цилиндра, уравновешивают друг друга. Под действием этих сил цилиндр только сжимается.

Силы же действующие на верхнее и нижнее основание цилиндра неодинаковы. На верхнее основание со стороны жидкости действует сила $\vec{F}_1$, направленная вниз, а на нижнее основание действует со стороны жидкости сила $\vec{F}_2$, направленная вверх. Причем сила $\vec{F}_2$ больше, чем сила $\vec{F}_1$. В результате равнодействующая сил давления $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ будет направлена вверх и равна разности этих сил. Эта равнодействующая и называется **выталкивающей силой или архимедовой силой:** $F_{арх} = F_2 - F_1$.

Определим величину выталкивающей силы. Из определения давления следует, что сила давления равна произведению давления на площадь, поэтому $F_1 = P_1 S$, где P_1 –гидростатическое давление в жидкости на глубине h_1;

$F_2 = P_2 S$, где P_2 – гидростатическое давление в жидкости на глубине h_2.

Так как $P_1 = \rho_{ж} g h_1$, а $P_2 = \rho_{ж} g h_2$, то сила Архимеда (выталкивающая сила) равна $F_{арх} = \rho_{ж} g h_2 S - \rho_{ж} g h_1 S = \rho_{ж} g (h_2 - h_1) S = \rho_{ж} g h S$.

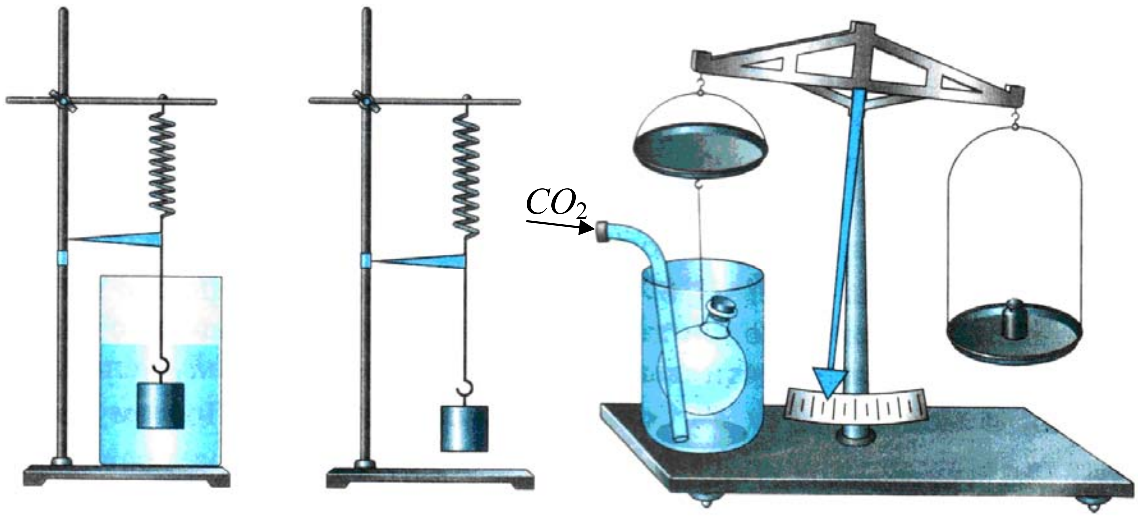
Если учесть, что $hS = V$, где V –объём цилиндра, а $\rho_{ж} V = m_{ж}$ – масса жидкости в объёме цилиндра, то $F_{арх} = g m_{ж} = P_{ж}$ – *выталкивающая сила равна весу жидкости, вытесненной телом в объёме погруженного в неё тела.*

<u>Закон Архимеда</u>: на тело, погруженное в жидкость или газ, действует выталкивающая сила, направленная вертикально вверх и равная весу жидкости или газа, вытесненного телом.

Таким образом, формула выталкивающей силы имеет вид:

$$F_{арх} = \rho_{ж} g V_{погр.тела}$$

Существование силы, выталкивающей тело из жидкости, легко обнаружить на опыте. Рассмотрите внимательно рисунки.



5.2. Плавание тел

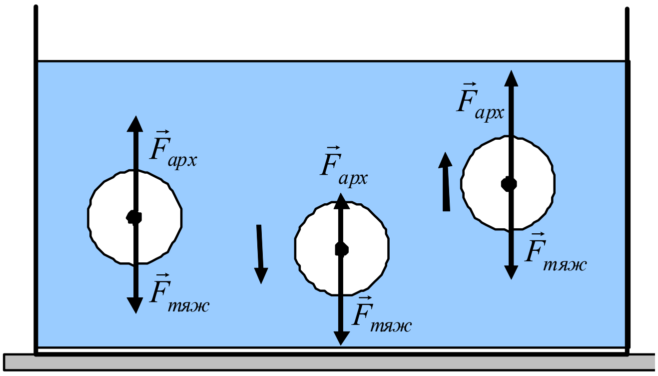
На тело, находящееся внутри жидкости, действуют две силы: сила тяжести, направленная вертикально вниз, и сила Архимеда, направленная вертикально вверх.

От того какая из сил больше, будет наблюдаться различные состояния тела внутри жидкости:

1. Если эти силы равны, то есть $F_{арх} = F_{тяж}$, то тело будет находиться в равновесии. Это условие $F_{арх} = F_{тяж}$ – называется **условием плавания тел:** *для того, чтобы тело плавало, необходимо, чтобы дей-*

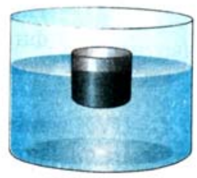
ствующая на него сила тяжести уравновешивалась выталкивающей силой. Тело плавает внутри жидкости.

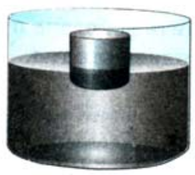
2. Если сила тяжести больше, чем выталкивающая сила $F_{арх} < F_{тяж}$. то **тело тонет**.



3. Если сила тяжести меньше, чем выталкивающая сила $F_{арх} > F_{тяж}$. то тело поднимается из жидкости (всплывает). Пока всё тело находится в жидкости, выталкивающая сила не меняется.

Когда всплывающее тело достигнет поверхности, то выталкивающая сила начнёт уменьшаться за счет уменьшения объёма погруженной в жидкость части тела. Когда выталкивающая сила станет равной силе тяжести, тело остановится, и будет **плавать на поверхности жидкости, частично погрузившись в неё.** Если одно и то же тело может плавать по поверхности в двух различных жидкостях, то объём погруженной части тела будет различным.





4. Если тело плавает на поверхности воды, частично погрузившись в неё, то выталкивающая сила равна весу тела в воздухе. Проверим это на опыте.

В отливной сосуд наливают воду до уровня боковой трубки. Поместим в сосуд тело, которое может плавать на поверхности воды, частично погрузившись в неё. Тело вытесняет объём воды, равный объёму погруженной части тела. Вытесненная вода выливается из сосуда в стакан. Сравним вес воды в стакане и вес тела в воздухе. **Вес вытесненной воды равен весу тела в воздухе.**

Вывод: *если тело плавает в жидкости, то вес вытесненной им жидкости равен весу этого тела в воздухе.*

Таким образом, можно закон Архимеда сформулировать следующим образом: **на всякое тело, погруженное в покоящуюся жидкость (или газ), действует со стороны этой жидкости (или газа) выталки-**

вающая сила, равная произведению плотности жидкости (или газа), ускорения свободного падения и объёма той части тела, которая погружена в жидкость (или газ).

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Слушайте, читайте, повторяйте.*

Плавание судов

Суда, плавающие по рекам, озёрам, морям и океанам, построены из различных материалов с различной плотностью. Корпус судов обычно делают из стальных листов. Все внутренние крепления, придающие судам прочность, также изготавливают из металлов. Для постройки судов используют материалы, имеющие по сравнению с водой как большую, так и меньшую плотность. Почему же суда держатся на воде, перевозят большие грузы?

Мы знаем, что тело вытесняет своей подводной частью столько воды, что вес этой воды равен весу тела в воздухе. Это справедливо и для судов.

Упражнение 2. *Решите задачи.*

1. Тело в воздухе весит 2,41 Н, а в керосине 2,17 Н. Определить плотность тела.

2. Железное тело в керосине весит 2 Н. Определить вес железа в воздухе.

3. Дерево плавает в воде. Погруженная часть тела составляет 3/4 всего объема. Определить плотность дерева.

4. Железное тело плавает в ртути. Какая часть объема погружается в ртуть?

5. Объём выступающей части айсберга над поверхностью воды равнее 200 $м^3$. Найти объём всего айсберга и его массу.

6. Какое наименьшее количество брёвен длиной 10 м и площадью поперечного сечения 300 $см^2$ надо взять. чтобы на нём переплавить через реку автомашину массой 1000 кг?

7. Медный шар с внутренней полостью весит в воздухе 2,59 Н, а в воде весит 2,17 Н. Определить объём внутренней полости шара.

8. Аэростат, наполненный водородом, поднимается с ускорением 1 м/с^2. Масса оболочки аэростата с грузом 700 кг. Плотность воздуха 1,29 кг/м^3. Определить объём аэростата.

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. **Закон Архимеда:** на тело, погруженное в жидкость или газ, действует выталкивающая сила, направленная вертикально вверх и равная весу жидкости или газа, вытесненного телом.
2. На всякое тело, погруженное в покоящуюся жидкость (или газ), действует со стороны этой жидкости (или газа) выталкивающая сила, равная произведению плотности жидкости (или газа), ускорения свободного падения и объёма той части тела, которая погружена в жидкость (или газ): $F_{арх} = \rho_{ж} g V_{погр.тела}$.

ТЕМА 6. **ГИДРОДИНАМИКА**

Новые слова и словосочетания

текучесть	поток
внутреннее трение	вязкость
стационарный	Бернулли
трубка тока	идеальный
несжимаемый	ламинарный
турбулентный	завихрения

Раздел классической механики, изучающий движения жидкостей и газов, а также взаимодействие движущихся жидкостей и газов с твердыми телами, называется гидро- и аэродинамикой. Изучение движения жидкостей и газов имеет огромное значение для техники.

Жидкости и газы имеют общее характерное свойство – текучесть. Текучесть – это способность одних слоев жидкости или газа двигаться относительно других слоев. При движении слоев между ними возникают силы внутреннего трения или вязкости. Вязкостью называют свойство жидкости оказывать сопротивление относительному перемещению слоев.

Жидкости и газы существенно отличаются друг от друга. Различие между жидкостями и газами обусловлено большой **сжимаемостью газов**. Несмотря на это, неподвижные жидкости и газы подчиняются одним и тем же законам (закон Паскаля, закон Архимеда).

Опыты и расчеты показывают, что при скоростях значительно меньших скорости звука (при нормальных условиях 340 *м/с*), можно не учитывать сжимаемость воздуха и других газов. Поэтому газы можно рассматривать как несжимаемую жидкость.

Жидкость, вязкостью и сжимаемостью которой можно пренебречь, называют идеальной жидкостью.

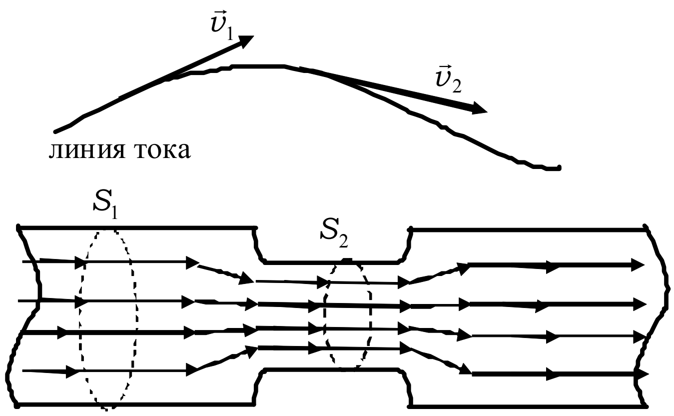
6.1. **Движение идеальной жидкости. Линии тока. Теорема Эйлера**

Движение жидкости или газа называется течением, а совокупность частиц движущейся жидкости или газа называется потоком.

Движение жидкости, при котором отдельные слои жидкости скользят относительно друг друга, не перемешиваясь, называется **ламинарным течением.** Движение жидкости, сопровождающееся перемешиванием её различных слоев с образованием завихрений, называется **турбулентным.**

Наиболее простым является ламинарное (без завихрений) течение жидкости.

Рассмотрим ламинарное течение жидкости. Поток жидкости схематично изобразим на рисунке. В каждой точке этого потока скорость частиц жидкости имеет определенную величину и направление. Скорости частиц жидкости в различных точках пространства различны. Если во всех точках пространства скорости частиц жидкости не меняются со временем, то такое движение жидкости **называется стационарным (установившимся).**



При установившемся течении любая частица жидкости проходит данную точку пространства с одним и тем же значением скорости. В другой точке пространства скорость может быть другой, но также постоянной во времени.

Поток жидкости или газа графически изображают линиями тока. **Линия тока – это линия, касательная к которой в каждой точке пространства совпадает с направлением вектора скорости частиц жидкости в этой точке.** Густота линий тока – это число линий, проведённых через единичную площадку, перпендикулярную направлению скорости течения жидкости, численно равна скорости течения жидкости в этом месте. Тогда, чем больше скорость течения жидкости, тем гуще располагаются линии тока.

При стационарном течении в случае идеальной жидкости (невязкой и несжимаемой, плотность жидкости $\rho = const$) через любое сечение в потоке за одну секунду проходит одинаковый объём жидкости, поэтому $S_1 v_1 = S_2 v_2 = const$, где v_1 и v_2 – скорости жидкости соответственно в сечениях S_1 и S_2.

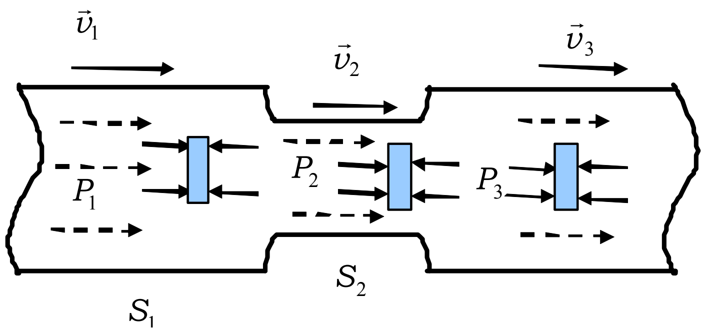
Уравнение $S\,v = const$ **называют теоремой о неразрывности струи или теоремой Эйлера.** Согласно этому уравнению через сечение меньшей площади жидкость течёт с большей скоростью. Теорема Эйлера является выражением закона сохранения массы движущейся жидкости.

Эта теорема используется, например, при расчетах, связанных с подачей топлива в ракетный двигатель по трубам переменного сечения.

6.2. **Зависимость давления в жидкости от скорости её течения. Уравнение Бернулли**

При изучении гидростатики мы знаем, как распределяется давление в неподвижной жидкости. Познакомимся с распределением давления в движущейся жидкости.

1. Возьмем горизонтальную трубку переменного сечения. Рассмотрим, как меняется давление в жидкости при её стационарном течении по трубке. Выделим элемент жидкости, который движется вдоль оси трубки. При переходе из широкой части трубки в узкую скорость течения увеличивается, поэтому ускорение выделенного элемента жидкости направлено по течению жидкости. А при переходе из узкой части в широкую скорость течения уменьшается, поэтому ускорение направлено против течения жидкости.



Согласно второму закону Ньютона ускорение вызывается силой и совпадает с ней по направлению. Такой силой может быть только равнодействующая сил давления окружающей жидкости на выделенный элемент жидкости. Значит, сила давления на элемент жидкости при переходе из широкой части трубки в узкую направлена по течению жидкости, поэтому $P_1 > P_2$. **Давление в широкой части трубки больше, чем давление в узкой части.**

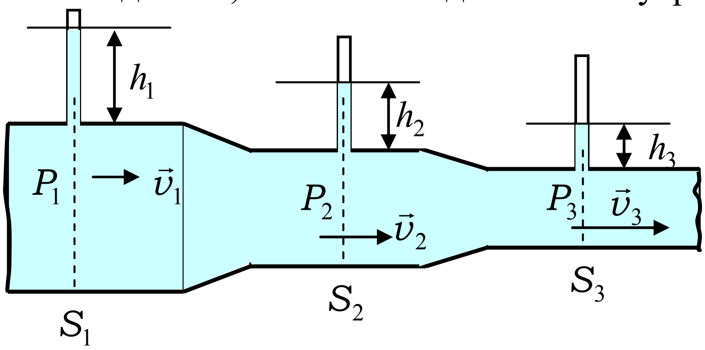
При переходе выделенного элемента из узкой части трубки в широкую часть, ускорение направлено против течения жидкости (так же направлена и сила давления на выделенный элемент). Значит, давление в широкой части трубки P_3 должно быть больше, чем давление P_2 в узкой части трубки.

Чем быстрее течёт жидкость, тем меньше давление внутри неё.

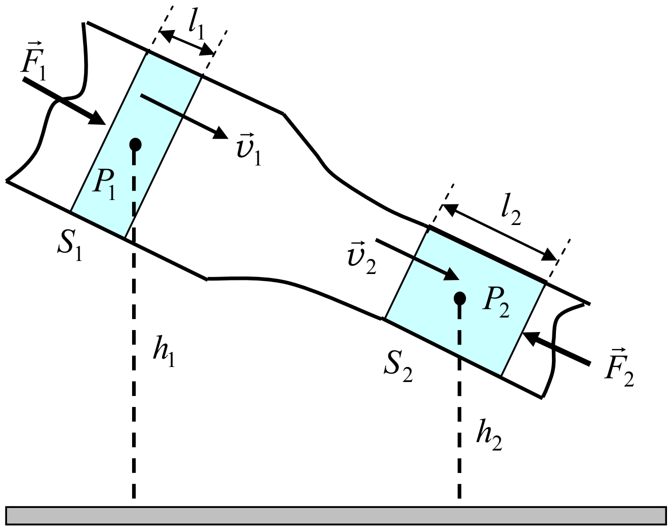
Для измерения давления жидкости используют манометры – трубки, опущенные в поток.

Обратимся к эксперименту. Возьмём трубку переменного сечения, расположенную горизонтально. В стенки трубки вставим стеклянные открытые сверху трубки (манометрические трубки). При стационарном течении жидкость в каждой манометрической трубке поднимется на высоту h *и давление этого столба жидкости характеризует давление в потоке жидкости*:

$P = P_0 + \rho_{ж} gh$, где P – давление в потоке жидкости, P_0 – атмосферное давление, $\rho_{ж}$ – плотность жидкости. Из опыта видно, что чем больше скорость течения жидкости, тем меньше давление внутри жидкости.



2. Пусть трубка переменного сечения расположена наклонно к горизонту. По трубке течёт идеальная жидкость в поле силы тяжести. В жидкости действуют только консервативные силы давления, вызванные только упругостью жидкости и сила тяжести. Тогда можно воспользоваться законом сохранения механической энергии и найти связь между скоростью течения жидкости, давлением внутри неё и наклоном трубки относительно горизонта.



Зависимость давления идеальной жидкости от скорости её стационарного течения и перепада высоты была установлена в математической форме швейцарским физиком Д. Бернулли в 1738 г.

Выделим некоторый объём жидкости в широкой части трубки. Площадь поперечного сечения, давление, и модуль скорости в этой части трубки соответственно равны: S_1, P_1, υ_1, а в узкой части трубки – S_2,

P_2, υ_2. Если жидкость течёт слева направо и течение стационарное, то под действием сил давления $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, и силы тяжести выделенный объём жидкости за малый промежуток времени сместится вправо и займет часть трубки в узкой части. Силы давления совершат работу: $A = A_1 + A_2 = F_1 l_1 - F_2 l_2 = P_1 S_1 l_1 - P_2 S_2 l_2 = P_1 S_1 \upsilon_1 \Delta t - P_2 S_2 \upsilon_2 \Delta t$.

Согласно закону сохранения механической энергии, работа внешних сил равна изменению энергии выделенного элемента. Так как жидкость идеальная, значит, $\rho = const$ и объём выделенного элемента не меняется $\Delta V = S_1 l_1 = S_2 l_2$.

Изменение энергии этого элемента жидкости равно:

$$\Delta E = \Delta E_k + \Delta E_p = \frac{1}{2}\rho \Delta V(\upsilon_2^2 - \upsilon_1^2) + \rho g(S_2 l_2 h_2 - S_1 l_1 h_1).$$

Учитывая, что $\Delta E = A$, получим:

$$\frac{1}{2}\rho \Delta V(\upsilon_2^2 - \upsilon_1^2) + \rho g(S_2 l_2 h_2 - S_1 l_1 h_1) = P_1 S_1 l_1 - P_2 S_2 l_2 \quad \text{или}$$

$$\frac{1}{2}\rho(\upsilon_2^2 - \upsilon_1^2) + \rho g(h_2 - h_1) = P_1 - P_2.$$

Полученное выражение можно записать:

$$P_1 + \rho g h_1 + \frac{\rho \upsilon_1^2}{2} = P_2 + \rho g h_2 + \frac{\rho \upsilon_2^2}{2} \text{ или } P + \rho g h + \frac{\rho \upsilon^2}{2} = const.$$

Полученное уравнение носит название уравнение Бернулли для течения идеальной жидкости. Уравнение Бернулли описывает наиболее простой случай течения жидкости: течение стационарное, а вязкостью и сжимаемостью можно пренебречь.

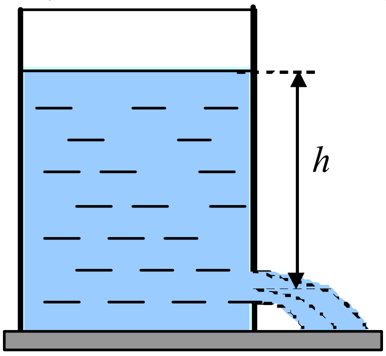
В этом уравнении $\frac{\rho \upsilon^2}{2}$ – динамическое давление (плотность кинетической энергии потока жидкости), $\rho g h$ – гидростатическое давление (плотность потенциальной энергии потока жидкости), P – давление жидкости на поверхности обтекаемого тела (статическое давление).

Согласно уравнению Бернулли **сумма давления и плотности кинетической и потенциальной энергий при стационарном течении идеальной жидкости остаётся постоянной для любого сечения потока.**

6.3. Скорость вытекания жидкости из отверстия в сосуде

С помощью уравнения Бернулли можно найти скорость вытекания идеальной жидкости из отверстия, расположенного в сосуде на глубине

h относительно поверхности жидкости. На рисунке изображён широкий сосуд с жидкостью. Сосуд имеет отверстие, расположенное на высоте h относительно поверхности жидкости и имеет сечение малое, по сравнению с сечением сосуда.



Если сосуд широкий, а отверстие мало, то скорость течения жидкости в сосуде мала. Тогда ко всему потоку жидкости в целом можно применить уравнение Бернулли.

В верхнем сечении у поверхности жидкости давление P_0 равно атмосферному давлению, а скорость жидкости $\upsilon_0 \approx 0$. В нижнем сечении (в отверстии) давление также равно атмосферному давлению (жидкость вытекает наружу). Если скорость течения жидкости в отверстии обозначить через υ, то по уравнению Бернулли для этих двух сечений получим: $P_0 + \dfrac{\rho \upsilon^2}{2} = P_0 + \rho g h$ или $\upsilon = \sqrt{2gh}$, где h – высота жидкости в сосуде над отверстием.

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Решите задачи.*

1. На поршень шприца, имеющий площадь S, действует постоянная сила $\vec{F}$. С какой скоростью должна вытекать в горизонтальном направлении струя из отверстия шприца площадью s, если плотность жидкости ρ?

2. В сосуд, в дне которого имеется малое отверстие, закрытое пробкой, налита вода до высоты $h = 1$ м. На поверхности воды находится поршень массой 1 кг и площадью 100 см^2. Между поршнем и стенками сосуда вода не просачивается. Найти скорость вытекания воды из отверстия в дне сосуда сразу после того, как из отверстия будет вынута пробка. Трение не учитывать.

3. В горизонтальной трубке в широкой её части вода течёт со скоростью 0,1 м/с при давлении 2 атм. В узкой части трубки давление равно 1,5 атм. Чему равна скорость течения в узкой части трубки?

4. По горизонтальной трубке переменного сечения протекает вода. Статическое давление в точке x_1 равно 0,3 Па, а скорость воды 4 см/с. Найти статическое и динамическое давление в точке x_2, если отношение сечений трубки в этих точках $S_1 : S_2 = 0{,}5$.

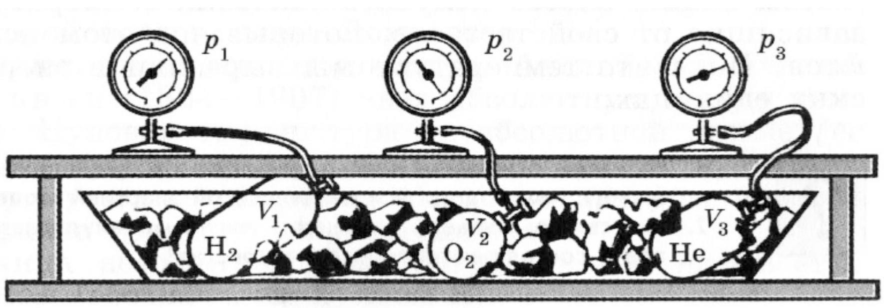
5. В широкой части горизонтально расположенной трубы нефть течет со скоростью 2 м/с. Определить скорость течения нефти в узкой части трубы, если разность давлений в широкой и узкой частях трубы 50 мм.рт.ст.

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. **Жидкости и газы имеют общее характерное свойство – текучесть.** Текучесть – это способность одних слоев жидкости или газа двигаться относительно других слоев. При движении слоев между ними возникают силы внутреннего трения или вязкости. Вязкостью называют свойство жидкости оказывать сопротивление относительному перемещению слоев.
2. **Жидкости и газы существенно отличаются друг от друга.** Различие между жидкостями и газами обусловлено большой **сжимаемостью газов**.
3. Жидкость, вязкостью и сжимаемостью которой можно пренебречь, называют **идеальной жидкостью.**
4. **Линия тока** – это линия, касательная к которой в каждой точке пространства совпадает с направлением вектора скорости частиц жидкости в этой точке.
5. Уравнение $S{\cdot}\upsilon = const$ называют **теоремой о неразрывности струи или теоремой Эйлера.**
6. Чем быстрее течёт жидкость, тем меньше давление внутри неё.
7. По уравнению Бернулли сумма давления и плотности кинетической и потенциальной энергий при стационарном течении идеальной жидкости остаётся постоянной для любого сечения потока.

Глава 5.
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА



ТЕМА 1. **МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА**

Новые слова и словосочетания

хаотический	тепловой
термодинамический	параметр
молекулярный	броуновское движение
диффузия	проникать
проникновение	агрегатное состояние
обоснование	микрообъект
равновероятный	равноправный
макропараметр	микроскопический

Молекулярная физика и термодинамика – это раздел физики, в котором изучаются тепловые явления.

Молекулярная физика изучает структуру и свойства вещества исходя из молекулярно-кинетических представлений о природе материальных тел. Согласно этим представлениям, любое тело состоит из очень малых частиц: молекул, атомов, ионов. Эти микрообъекты находятся в непрерывном хаотическом движении. Хаотичность движения означает, что все направления движения частиц равноправны и равновероятны. Движение каждой молекулы подчиняется законам классической механики. Описывая движение каждой частицы (микрообъекта), молекулярная физика характеризует в целом совокупность большого количества частиц (макрообъекта). Молекулярно–кинетическая теория – часть молекулярной физики, которая изучает связь физических характеристик всего тела (или *макропараметров*) с параметрами движения молекул в теле (или *микропараметрами*).

Молекулярно-кинетический подход учитывает также, что все частицы, из которых состоит вещество, взаимодействуют между собой. Соотношение между средними значениями кинетической энергии хаотического движения молекул и потенциальной энергии их взаимодействия качественно характеризует агрегатное состояние вещества: твердое, жидкое или газообразное.

Поэтому можно сказать, что молекулярная физика – это теория, объясняющая строение и основные свойства тел движением и взаимодействием частиц (атомов, молекул, ионов), из которых состоят тела.

Объектом изучения молекулярной физики являются макроскопические системы – системы, состоящие из большого числа частиц (микрообъектов). Любое вещество состоит из огромного числа частиц. Информация о системе с большим числом частиц должна характеризовать не отдельную частицу, а совокупность частиц в целом. *Законы поведения совокупности большого числа частиц называются статистическими закономерностями.*

Система, состоящая из большого числа частиц, характеризуется микроскопическими и макроскопическими параметрами.

Микроскопические параметры – *это параметры, характеризующие движение отдельной частицы (масса частицы, импульс, скорость, кинетическая энергия).* Так как частиц много, то в молекулярной физике вводится понятие:

1) средняя скорость движения частиц $\bar{\vec{\upsilon}} = \dfrac{\vec{\upsilon}_1 + \vec{\upsilon}_2 + ... + \vec{\upsilon}_n}{N}$, где $\vec{\upsilon}_1, \vec{\upsilon}_2, \vec{\upsilon}_n$ – скорости отдельных частиц, N – количество частиц в системе.

2) средний квадрат скорости частиц $\overline{\upsilon^2} = \dfrac{\vec{\upsilon}_1^2 + \vec{\upsilon}_2^2 + ... + \vec{\upsilon}_n^2}{N}$, величина $\sqrt{\overline{\upsilon^2}} = \upsilon_{кв}$ называется средней квадратичной скоростью частиц.

3) средняя кинетическая энергия частиц $\overline{E}_k = \dfrac{m_0 \overline{\upsilon^2}}{2}$.

Макроскопические параметры – *это параметры, характеризующие систему частиц в целом (масса вещества, давление, объём, температура).*

Молекулярная физика выясняет связь микро и макроскопических параметров. Её цель – объяснить макроскопические свойства вещества, зная характерные особенности строения вещества и характер движения её частиц. Молекулярная физика использует модель макроскопической системы – *идеальный газ.*

Термодинамика не рассматривает микроскопическое состояние вещества, а изучает физические свойства систем на основе анализа процессов, связанных с законами превращения энергии. Термодинамика – раздел физики, в котором изучают общие свойства макроскопических систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и процессы перехода между этими состояниями. Тепловое равновесие – это такое состояние системы тел, при котором макропараметры системы остаются постоянным сколько угодно долго.

В основе термодинамики несколько фундаментальных законов – начала термодинамики.

Подходя с разных точек зрения к изучению свойств физических систем и процессов, протекающих в них, **молекулярная физика и тер-**

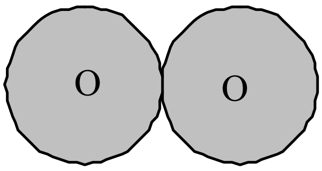
модинамика взаимно дополняет друг друга, образуя <u>единую теорию вещества.</u>

<u>Молекулярная структура вещества</u>

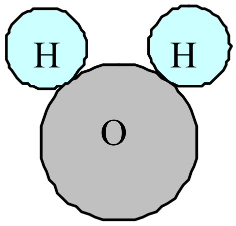
Моделью материального тела в молекулярной физике является совокупность движущихся и взаимодействующих между собой атомов и молекул.

1. <u>Молекула – составная часть тела</u>. Молекула – это наименьшая частица данного вещества, сохраняющая его химические свойства. Наименьшая частица воды – это молекула воды. Молекулы разных веществ имеют разные размеры. Размер молекулы водорода примерно равен $3 \cdot 10^{-10}$ *м*, а размер молекулы белка равен примерно 10^{-7} *м*. Масса молекул тоже разная (и тоже очень маленькая). Масса молекулы воды примерно равна $3 \cdot 10^{-26}$ *кг*.

2. <u>Атом – наименьшая частица химического элемента</u>, являющаяся носителем его свойств. Молекулы состоят из атомов. Например, молекула кислорода O_2 состоит из двух атомов кислорода. Молекула воды H_2O состоит из трёх атомов – одного атома кислорода и двух атомов водорода. Число атомов в молекуле может быть разным.

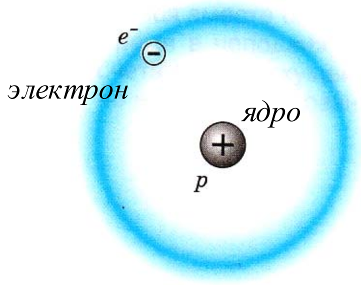


молекулы кислорода



молекулы воды

Атом также имеет сложную структуру. Согласно классическим представлениям атом состоит из ядра и вращающихся вокруг ядра электронов. Ядро атома состоит из нуклонов (протонов и нейтронов). Строение атома напоминает структуру Солнечной системы. В атоме отрицательно заряженные электроны удерживаются вблизи положительно заряженного ядра силами электромагнитного взаимодействия. Атом в целом электронейтрален: положительный заряд ядра компенсируется отрицательным зарядом электронов. Масса атома складывается из массы ядра и суммарной массы электронов. Практически вся масса атома сосредоточена в ядре.



атом водорода

Массу атомов и молекул принято измерять в *атомных единицах массы*.

Атомная единица массы (*а.е.м.*) *– средняя масса нуклона в атоме углерода* ${}^{12}_{6}C$. В ядре атома углерода ${}^{12}_{6}C$ содержится 12 нуклонов, поэтому $m_{{}^{12}_{6}C} = 12$ *а.е.м.*. Значит, **атомная единица массы равна** $\frac{1}{12}$ **массы атома углерода** ${}^{12}_{6}C$: 1 *а.е.м.* = $\frac{1}{12} m_{{}^{12}_{6}C}$ = 1,66·10^{-27} *кг.*

Масса любого атома может быть выражена в *атомных единицах массы или в килограммах:* $m_a = M_r\,а.е.м. = M_r \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27}\,кг$, где M_r – относительная атомная масса.

Относительная атомная масса M_r – число атомных единиц массы, содержащихся в массе данного атома. Относительная атомная масса совпадает с числом нуклонов в ядре атома (массовое число): $M_r = A$.

Относительная атомная масса некоторых элементов							
Элемент	Водород	Гелий	Литий	Углерод	Азот	Кислород	Уран
Изотоп, ${}^{A}_{Z}X$	${}^{1}_{1}H$	${}^{4}_{2}He$	${}^{6}_{3}Li$	${}^{12}_{6}C$	${}^{14}_{7}N$	${}^{16}_{8}O$	${}^{235}_{92}U$
Относительная атомная масса, а.е.м.	1,0078	4,0026	6,0151	12,0000	14,0031	15,9949	235,0439

в таблице использованы обозначения ${}^{A}_{Z}X$, где X – символ элемента, Z – порядковый номер элемента в таблице Менделеева (порядковый номер определяет число протонов в ядре и определяет заряд ядра), A – массовое число, равное числу нуклонов в ядре.

Масса молекулы складывается из суммы масс атомов, составляющих эту молекулу. Например: масса молекулы углекислого газа CO_2 составляет 44 *а.е.м.* или M_r = 12+16·2 = 44.

3. Количество вещества. Количество вещества характеризуется числом молекул этого вещества. Макроскопические тела состоят из огромного количества атомов и молекул, поэтому количество вещества удобнее измерять в единицах, содержащих большое количество атомов и молекул. В физике введена единица количества вещества ***моль.***

Моль – количество вещества, масса которого (в граммах), численно равна относительной атомной массе.

Массу одного моля называют молярной массой и обозначают μ: $\mu = M_r \cdot 1 \frac{г}{моль}$.

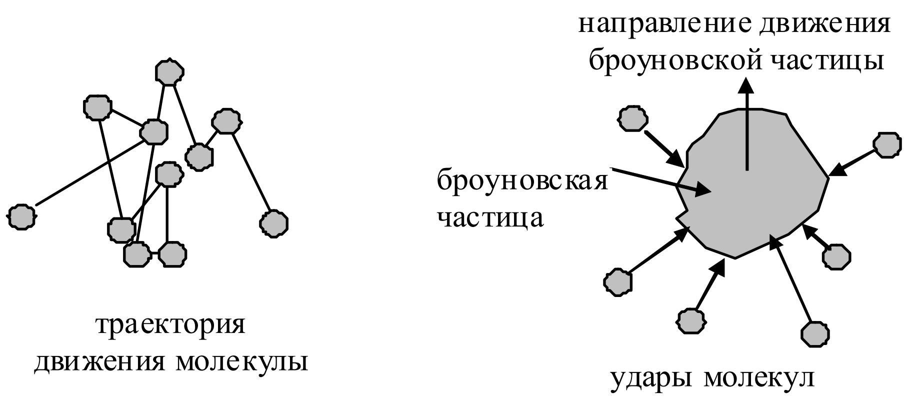
В одном моле вещества в любом агрегатном состоянии содержится одинаковое количество атомов или молекул, равное N_A. *Число атомов или молекул, содержащихся в одном моле вещества, называется числом Авогадро.* Число Авогадро равно: $N_A = 6{,}022 \cdot 10^{23}$ $моль^{-1}$. Тогда масса одного моля вещества равна массе одного атома (или молекулы) умноженной на число Авогадро: $\mu = m_a \cdot N_A$.

Тогда количество вещества (число молей) можно найти как отношение числа молекул (атомов) N в данном теле к числу Авогадро: $\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{m_a N}{m_a N_A} = \frac{m}{\mu}$, где m – масса вещества.

4. <u>Атомы и молекулы вещества вечно и непрерывно движутся.</u> Движение атомов и молекул хаотичное.

Тепловое движение молекул – это непрерывное хаотическое (беспорядочное) движение молекул.

а) Доказательством движения молекул является броуновское движение. Это движение маленьких твердых частиц под ударами молекул жидкости.



В 1827 г. шотландский ботаник Р. Броун наблюдая под микроскопом взвесь цветочной пыльцы в воде, обнаружил, что частицы пыльцы беспорядочно движутся. Впоследствии оказалось, что такое сложное движение характерно для любых частиц малых размеров ($\approx 1 мкм$), взвешенных в газе или жидкости. Такое движение называется **броуновским.** Объяснение броуновского движения было дано Эйнштейном в 1905 г. Причина броуновского движения взвешенных частиц вызывается ударами молекул среды, в которой эти частицы находятся. Так как молекулы движутся хаотично, то броуновские частицы получают удары молекул с разных сторон, поэтому траектория их движения – ломаная линия.

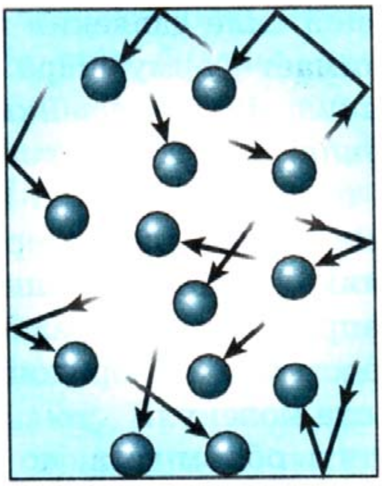
б) Другим доказательством теплового движения молекул является *диффузия.* ***Диффузия – это процесс проникновения молекул одного вещества в промежутки между молекулами другого вещества.***

Диффузия происходит в жидких, твердых и газообразных веществах. Например, растворы разных веществ – сахар в чае, распространение запаха – запах духов в комнате, испарение жидкости. Быстрее диффузия протекает в газах и жидкостях (промежутки между молекулами больше), медленнее – в твердых телах.

в) Каждое вещество может находиться в твердом, жидком и газообразном состоянии. В этих состояниях вещество имеет разное строение и разный характер теплового движения молекул. Тепловое движение – это особая форма движения материи. При механическом движении все части тела движутся упорядоченно. При тепловом движении молекулы движутся беспорядочно.

В газах молекулы движутся прямолинейно равномерно (движение по инерции) и изменяют направление движения только при столкновении с другой молекулой или со стенкой сосуда.

Тепловое движение молекул **в твердых телах** представляет собой колебательное движение частиц (атомов, молекул, ионов) относительно положения равновесия.



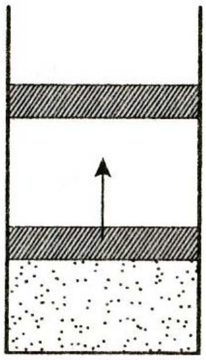
В жидкостях молекулы не так свободны, как в газах, но не так связаны, как в твердых телах. Тепловое движение в жидкостях соединяет беспорядочное поступательное движение молекул с беспорядочным колебательным движением около положения равновесия.

Итак, молекулы непрерывно, хаотично движутся.

Интенсивность движения молекул зависит от температуры вещества. Чем выше температура, тем быстрее движутся молекулы.

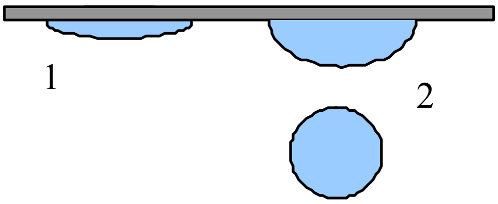
5. <u>Между молекулами существуют силы взаимодействия</u> – силы притяжения и силы отталкивания.

Силы взаимодействия молекул друг с другом называются молекулярными силами. Силы притяжения и силы отталкивания, действующие между молекулами, обусловлены действием заряженных частиц атомов, из которых состоят молекулы. Следовательно, **молекулярные силы имеют электромагнитную природу.**



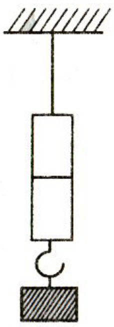
а) Молекулы газов движутся с большими скоростями прямолинейно до столкновения. При комнатной температуре скорость молекул составляет несколько сотен метров в секунду. Направление движения молекулы изменяют только при столкновении друг с другом или со стенкой сосуда. Молекулы газов находятся друг от друга на достаточно большом расстоянии. Поэтому, **силы молекулярного взаимодействия у молекул газов очень малы и проявляются лишь на небольших расстояниях. Поэтому газы не сохраняют форму и объём.** Наличие сил взаимодействия между молекулами газа проявляются при сжатии газов. Легкий поршень за счет движения молекул поднимается.

б) Молекулы жидкостей расположены значительно ближе друг к другу, чем молекулы газа, поэтому силы взаимодействия между молекулами жидкостей больше, чем у газов. Силы притяжения удерживают молекулы друг около друга. Поэтому, **молекулы жидкостей могут колебаться около некоторого положения равновесия, время от времени меняясь, местами с соседями. Вследствие этого жидкости обладают текучестью. Они сохраняют свой объём, принимая форму сосуда, в который они налиты.** Благодаря действию сил отталкивания молекулы не проникают друг в друга.



Наличие сил взаимодействия между молекулами жидкости можно объяснить на примере.

На каплю воды действует сила тяжести, которая направлена вниз. Если масса капли не очень большая, то сила тяжести меньше суммы молекулярных сил, и капля не падает (1). Если сила тяжести больше молекулярных сил, то капля падает вниз (2).



в) Молекулы твердых тел расположены ещё ближе и их взаимодействие ещё сильнее, чем у газов. Молекулы твердых тел колеблются около положения равновесия. Молекулы твердых тел очень редко меняются местами друг с другом. Поэтому твердые тела не обладают текучестью, сохраняют свою форму и объём. Твердые тела обладают вследствие сильного молекулярного взаимодействия упругостью.

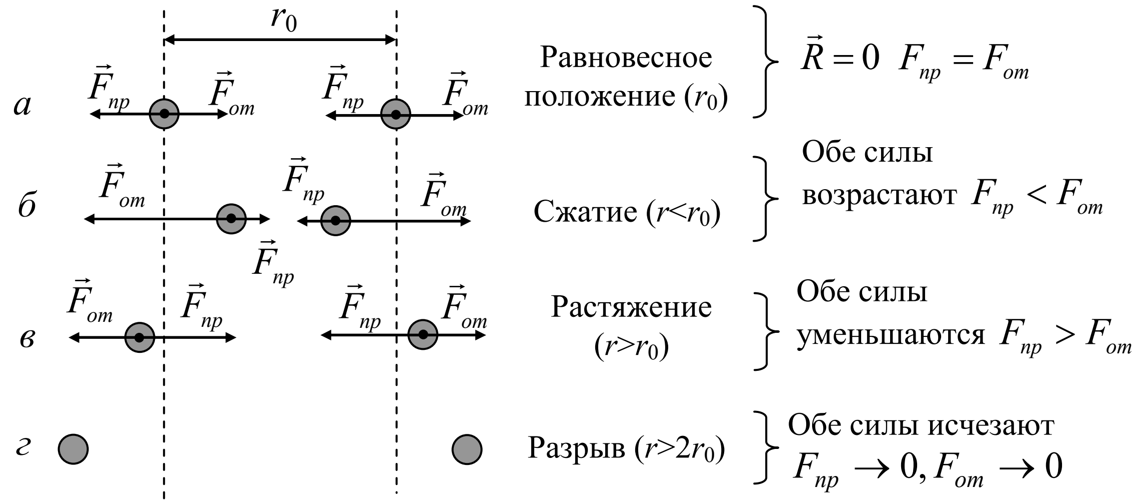
Наличие сил взаимодействия между молекулами твердого тела можно объяснить на примере.

Два твердых тела, плотно прижатые друг к другу отшлифованными поверхностями, слипаются в результате взаимодействия молекул.

Таким образом, **опытное обоснование наличия молекулярных сил**:

- сохранение формы твердых тел – действие сил притяжения ($F_{пр}$);
- наличие промежутков между молекулами – действие сил отталкивания ($F_{от}$);
- упругость тел – действие сил притяжения и сил отталкивания ($F_{пр}$ и $F_{от}$);
- слипание тел с отшлифованными поверхностями – действие сил притяжения ($F_{пр}$);
- сохранение объёма жидкостями – действие сил притяжения ($F_{пр}$).
- молекулы не проникают друг в друга – действие сил отталкивания ($F_{от}$).

Силы притяжения и силы отталкивания действуют одновременно, и по-разному зависят от расстояния между молекулами.



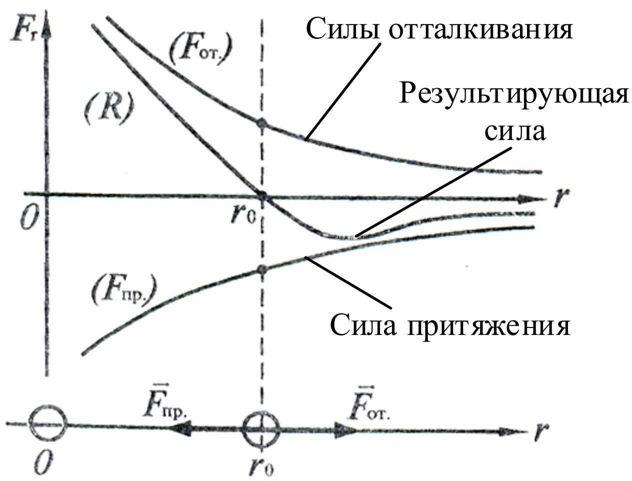
В разных веществах разные $r_0, F_{пр}, F_{от}$

Действие молекулярных сил зависит от расстояния между молекулами. Молекулярные силы действуют на очень маленьких расстояниях ($\approx 10^{-9}$ м), соизмеримых с размерами молекул ($\approx 10^{-10}$ м).

Сила взаимодействия двух молекул $\vec{R}$ равна сумме сил притяжения $\vec{F}_{пр}$ и сил отталкивания $\vec{F}_{от}$: $\vec{R}=\vec{F}_{пр}+\vec{F}_{от}$. От расстояния r между молекулами зависит, какая сила больше ($\vec{F}_{пр}>\vec{F}_{от}$ или $\vec{F}_{от}>\vec{F}_{пр}$).

Существует расстояние r_0 между молекулами, когда силы притяжения и отталкивания уравновешивают друг друга. В этом случае сила взаимодействия равна нулю (рис. *а*). Если молекулы находятся на расстоянии $r > r_0$, сила притяжения становится больше силы отталкивания ($\vec{F}_{отт} < \vec{F}_{пр}$), и молекулы притягиваются (рис. *б*). Если молекулы находятся на расстоянии $r < r_0$, сила отталкивания больше силы притяжения $\vec{F}_{пр} < \vec{F}_{отт}$ и молекулы отталкиваются (рис. *в*). Если $r >> r_0$, сила взаимодействия между молекулами стремится к нулю $\vec{R} \to 0$. Молекулы между собой не взаимодействуют.

На рисунке приведен график зависимости силы взаимодействия *R* между молекулами от расстояния *r* между ними.



Итак, силы взаимодействия между молекулами обладают следующими свойствами:

– силы являются **короткодействующими** (действуют на малых расстояниях между молекулами),

– при расстояниях, превышающих 2–3 диаметра молекулы сила отталкивания равна нулю; сила притяжения стремится к нулю,

– при сближении молекул ($r<r_0$) обе силы резко возрастают, но $\vec{F}_{от} > \vec{F}_{пр}$.

6. <u>Агрегатное состояние вещества</u>

Объяснение свойств вещества, исходя из представлений о его молекулярном строении – главная задача молекулярной физики. Основной физической моделью молекулярной физики является совокупность движущихся и взаимодействующих между собой молекул вещества. Взаимное расположение, характер движения и взаимодействия молекул одного и того же вещества, характеризует его агрегатное состояние.

Различают четыре агрегатных состояния вещества: твердое, жидкое, газообразное и плазменное.

Реализация того или иного агрегатного состояния вещества зависит от соотношения кинетической и потенциальной энергии молекул, входящих в его состав. Потенциальная энергия молекулы характеризует степень её связи с другими молекулами. Между любыми двумя молекулами на расстоянии, большем диаметра молекулы, действуют силы притяжения (имеют электромагнитную природу). Эти силы стремятся связать молекулы в единое целое. Кинетическая энергия молекул препятствует этому.

Твердое тело. *Вещество находится в твердом состоянии, если средняя потенциальная энергия притяжения молекул много больше их средней кинетической энергии* ($E_p >> E_к$).

Каждая молекула твердого тела занимает определённый объём в пространстве, притягивая соседние молекулы и одновременно отталкивая их, не давая занять то место, где она сама расположена.

Жидкость. *Вещество находится в жидком состоянии, если средняя кинетическая энергия молекул соизмерима со средней потенциальной энергией их притяжения* ($E_p \approx E_к$).

Молекулы в жидкости упакованы также плотно, как в твердом теле. Однако положение молекулы в жидкости не фиксированы. Молекулы сравнительно медленно изменяют положение друг относительно друга. Под действием внешней силы жидкость течёт, сохраняя свой объём и принимает форму сосуда.

Газы. *Вещество находится в газообразном состоянии, если средняя кинетическая энергия молекул больше, чем средняя потенциальная энергия* ($E_p << E_к$).

Молекулы в газах находятся на больших расстояниях друг от друга. Поэтому газы могут очень сильно расширяться, так как силы притяжения между молекулами незначительны.

Итак, основные положения молекулярной теории строения вещества:

1) все вещества состоят из мельчайших частиц, называемых структурными элементами – атомов, молекул или ионов, т.е. все вещества имеют дискретное (прерывистое) строение;

2) частицы вещества находятся в состоянии непрерывного хаотичного (теплового) движения;

3) между частицами вещества существуют силы взаимодействия, величина которых для разных веществ различна.

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Решите задачи.*

1. На изделие, имеющее форму круглой пластинки диаметром 2 см, нанесён слой меди, толщиной 2 мкм. Найти число атомов меди, содержащихся в этом покрытии. Плотность меди $\rho = 8{,}9 \cdot 10^3$ кг/м^3, молярная масса меди $\mu = 0{,}064$ кг/моль.

2. Оцените радиус атома меди, приняв, что в твердом состоянии её атомы располагаются вплотную друг к другу. Плотность меди $\rho = 8{,}9 \cdot 10^3$ кг/м^3, молярная масса меди $\mu = 0{,}064$ кг/моль, число Авогадро $N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$. Обратите внимание! Кристаллы меди имеют форму куба, поэтому и моль меди также имеет форму куба.

3. Кристалл поваренной соли имеет кубическую форму и состоит из чередующихся ионов Na и Cl. Найти среднее расстояние между ионами, если плотность соли $\rho = 2{,}2 \cdot 10^3$ кг/м^3, молярная масса меди $\mu = 0{,}058$ кг/моль, число Авогадро $N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$.

4. Сколько молекул содержится в 2 г водяного пара? Молярная масса водяного пара $\mu = 0{,}018$ кг/моль, число Авогадро $N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$.

5. Считая, что диаметр молекулы водорода равен $2{,}3 \cdot 10^{-8}$ см, определить, какой длины получилась бы нить, если бы все молекулы, содержащиеся в 1 г этого газа, были расположены в один ряд вплотную друг к другу.

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. Молекулярная физика изучает структуру и свойства вещества исходя из молекулярно-кинетических представлений о природе материальных тел. **Молекулярная физика** – это теория, объясняющая строение и основные свойства тел движением и

взаимодействием частиц (атомов, молекул, ионов), из которых состоят тела.

2. **Микроскопические параметры –** *это параметры, характеризующие движение отдельной частицы (масса частицы, импульс, скорость, кинетическая энергия).*
3. **Макроскопические параметры –** *это параметры, характеризующие систему частиц в целом (масса вещества, давление, объём, температура).*
4. **Термодинамика** не рассматривает микроскопическое состояние вещества, а изучает физические свойства систем на основе анализа процессов, связанных с законами превращения энергии.
5. Моделью материального тела в молекулярной физике является совокупность движущихся и взаимодействующих между собой атомов и молекул.
6. Молекула – составная часть тела. **Молекула** – это наименьшая частица данного вещества, сохраняющая его химические свойства.
7. **Атом –** наименьшая частица химического элемента, являющаяся носителем его свойств.
8. *Атомная единица массы* (*а.е.м.*) – *средняя масса нуклона в атоме углерода* ${}^{12}_{6}C$. В ядре атома углерода ${}^{12}_{6}C$ содержится 12 нуклонов, поэтому $m_{{}^{12}_{6}C} = 12$ *а.е.м.* Значит, **атомная единица массы равна 1/12 массы атома углерода** ${}^{12}_{6}C$: 1 *а.е.м.* = $1{,}66 \cdot 10^{-27}$ *кг.*
9. **Относительная атомная масса** M_r – число атомных единиц массы, содержащихся в массе данного атома. Относительная атомная масса совпадает с числом нуклонов в ядре атома (массовое число): $M_r = A$.
10. **Моль –** количество вещества, масса которого (в граммах), численно равна относительной атомной массе.
    Массу одного моля называют молярной массой и обозначают μ: $\mu = M_r \cdot 1 \dfrac{г}{моль}$.
11. Атомы и молекулы вещества вечно и непрерывно движутся. Движение атомов и молекул хаотичное.
    Тепловое движение молекул – это непрерывное хаотическое (беспорядочное) движение молекул.

12. Между молекулами существуют силы взаимодействия – силы притяжения и силы отталкивания.
13. **Твердое тело.** *Вещество находится в твердом состоянии, если средняя потенциальная энергия притяжения молекул много больше их средней кинетической энергии.*
14. **Жидкость.** *Вещество находится в жидком состоянии, если средняя кинетическая энергия молекул соизмерима со средней потенциальной энергией их притяжения.*
15. **Газы.** *Вещество находится в газообразном состоянии, если средняя кинетическая энергия молекул больше, чем средняя потенциальная энергия.*

ТЕМА 2. <u>**ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ И ЕГО СЛЕДСТВИЯ**</u>

Новые слова и словосочетания

положение	следствие
идеальный	реальный
учитывать	не учитывать
абстракция	

Любое вещество (макросистема) состоит из огромного количества молекул (1 *моль* вещества содержит $6{,}02 \cdot 10^{23}$ молекул). Поэтому для изучения свойств такой макросистемы необходимо использовать *физическую модель*, позволяющую выявить связь макроскопических параметров системы с её микроскопическими параметрами. Наиболее простой моделью является *идеальный газ*. **Идеальный газ – это газ, молекулы которого представляют собой материальные точки, а взаимодействие между молекулами носит характер абсолютно упругого удара.** *Таким образом, если газ считать идеальным, то размерами молекул можно пренебречь по сравнению с расстоянием между молекулами. Расстояние между молекулами таково, что молекулы между собой не взаимодействуют* ($F_{пр} = 0$; $F_{от} = 0$), *столкновения молекул газа между собой и со стенками сосуда абсолютно упругие*.

<u>Основное уравнение молекулярно-кинетической теории</u>

Молекулярно-кинетическая теория строения вещества позволяет получить **уравнение связи между давлением идеального газа на стенки сосуда и средними характеристиками движения молекул.**

Основные положения молекулярно-кинетической теории (МКТ) идеального газа:

1) молекулы – материальные точки (абсолютно упругие шарики);

2) движение молекул подчиняется законам Ньютона;

3) нет взаимодействия между молекулами ($E_р = 0$; $E_к \neq 0$; $E_р << E_к$);

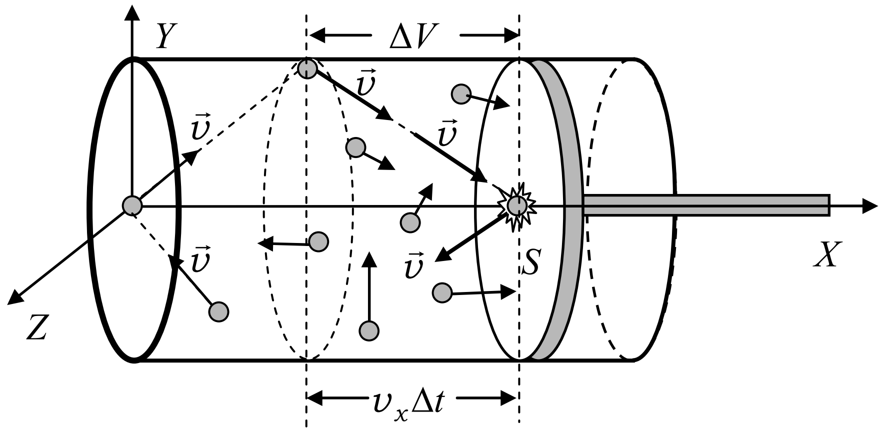
4) молекулы двигаются хаотично;

5) даже в самом маленьком рассматриваемом объеме содержится большое количество частиц (молекул), сравнимое с числом Авогадро.

Основное уравнение МКТ идеального газа связывает <u>макроскопический параметр давления</u>, характеризующий газ в целом, с <u>микроскопическими параметрами</u>, характеризующими движение каждой <u>молекулы</u>.

1. <u>Давление идеального газа.</u> Молекулы газа, двигаются хаотично и, сталкиваясь с любыми препятствиями на своем пути (другими молекулами, стенками сосуда), оказывают на них давление. **Следовательно, давление газа – это результат ударов молекул**. Действие каждой отдельной молекулы незначительное, но так как молекул много, то в результате давление может оказаться большим. Молекулы движутся хаотично, поэтому давление газа в любых точках поверхности сосуда одинаково.

Найдём давление газа, находящегося в цилиндрическом сосуде, на поршень (стенку) площадью S.

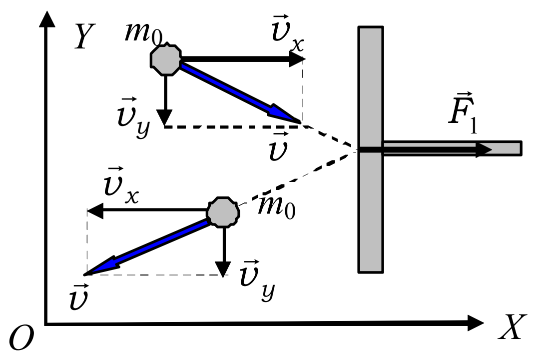


Если поршень (стенка) расположен перпендикулярно оси X, то давление газа равно отношению силы F_x, действующей на поршень в направлении оси X, к его площади S: $P = \dfrac{F_x}{S}$. Сила F_x является результирующей (средней) силой ударов молекул о поршень: $F_x = \overline{F_{1x}} \cdot \Delta N_x$, где $\overline{F_{1x}}$ – средняя сила удара одной молекулы, ΔN_x – полное число ударов молекул о поршень.

Найдем силу удара о поршень одной молекулы. Движение молекулы подчиняется второму закону Ньютона. Согласно второму закону Ньютона, на молекулу (атом) **со стороны поршня (стенки)** действует сила $\vec{F}_м = \dfrac{(m_0\Delta\vec{v})}{\Delta t}$, где $m_0\Delta\vec{v}$ – изменение импульса молекулы за время удара Δt, m_0 – масса молекулы газа. По третьему закону Ньютона на поршень (стенку) со стороны молекулы действует сила $\vec{F}_1 = -\vec{F}_м$, тогда $\vec{F}_1 = -\dfrac{(m_0\Delta\vec{v})}{\Delta t}$, а $F_{1x} = -\dfrac{(m_0\Delta\vec{v})_x}{\Delta t}$.

При упругом ударе компонента скорости по оси X изменяет направление на противоположное, а компоненты скорости по осям Y и Z – не меняются. Тогда изменение импульса молекулы по направлению оси

X за время удара равно: $\Delta(m_0\vec{\upsilon})_x = (-m_0\upsilon_x) - (m_0\upsilon_x) = -2m_0\upsilon_x$, тогда $F_{1x} = \dfrac{2m_0\upsilon_x}{\Delta t}$ – сила удара одной молекулы.



Так как движение молекул хаотичное, то введем понятие средней скорости молекул (среднего значения проекции скорости на ось X):

$$\overline{\upsilon_x} = \frac{\upsilon_{x1} + \upsilon_{x2} + \upsilon_{x3} + \upsilon_{x4} + ...}{N},$$

где υ_{x1}, υ_{x2}, υ_{x3},…… – проекции скорости на ось X отдельных молекул, N – общее число молекул в сосуде. Тогда средняя сила удара одной молекулы о стенку сосуда равна $\overline{F_{1x}} = \dfrac{2m_0\overline{\upsilon_x}}{\Delta t}$.

Рассчитаем теперь полное число ударов молекул о поршень. За промежуток времени Δt с поршнем сталкиваются только те молекулы, которые успевают долететь до него за это время, то есть могут пролететь расстояние $\overline{\upsilon_x} \cdot \Delta t$. Обозначим концентрацию молекул в сосуде n, тогда число частиц в объёме $\Delta V = S \cdot \overline{\upsilon_x} \cdot \Delta t$ равно $\Delta N = \Delta V \cdot n = n \cdot S \cdot \overline{\upsilon_x} \cdot \Delta t$.

Так как молекулы движутся хаотично и все направления движения равновероятны, то из общего числа молекул в объёме ΔN только $\dfrac{1}{2}$ часть молекул имеет проекции скорости, направленные по оси X (к поршню) $\Delta N_x = \dfrac{1}{2}\Delta N$. Найдем давление, оказываемое молекулами на поршень (стенку):

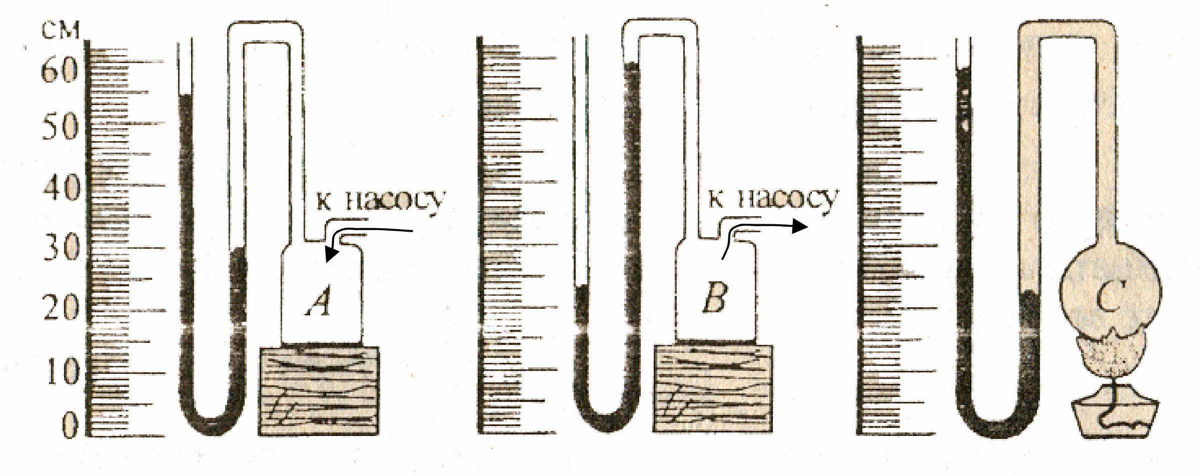
$$P = \frac{F_x}{S} = \frac{\overline{F_{1x}}\Delta N_x}{S} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2m_0\overline{\upsilon_x}\Delta N}{S\Delta t} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2m_0\overline{\upsilon_x} \cdot nS\overline{\upsilon_x} \cdot \Delta t}{S\Delta t} = m_0 n\overline{\upsilon_x^2}\ .$$

Из хаотичности теплового движения следует, что молекулы с одинаковой вероятностью могут двигаться в любом направлении. Поэтому средние квадраты проекций скоростей по осям X,Y,Z одинаковы и равны: $\overline{\upsilon_x^2} = \overline{\upsilon_y^2} = \overline{\upsilon_z^2}$. Так как $\upsilon^2 = \upsilon_x^2 + \upsilon_y^2 + \upsilon_z^2$, то $\overline{\upsilon^2} = \overline{\upsilon_x^2} + \overline{\upsilon_y^2} + \overline{\upsilon_z^2}$. Тогда $\overline{\upsilon_x^2} = \dfrac{1}{3}\overline{\upsilon^2}$.

С учетом того, что $\overline{\upsilon_x^2} = \frac{1}{3}\overline{\upsilon^2}$, получим **основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа**: $P = \frac{1}{3} m_0 n \overline{\upsilon^2}$.

Макроскопическая величина (давление газа) определяется массой молекул, концентрацией молекул и средним квадратом скорости их хаотического движения.

Средняя кинетическая энергия молекулы равна $\overline{E_к} = \frac{m_0 \overline{\upsilon^2}}{2}$. Поэтому основное уравнение молекулярно-кинетической теории можно записать $P = \frac{2}{3} n \cdot \overline{E_к}$.



а *б* *в*

Рассмотрите внимательно рисунок. В сосуде *A* концентрация молекул увеличивается, поэтому давление в этом сосуде больше атмосферного.

В сосуде *B* концентрация молекул уменьшается, поэтому давление в сосуде меньше атмосферного.

Газ в сосуде *C* нагревается, увеличивается кинетическая энергия молекул, поэтому давление в сосуде больше атмосферного.

2. <u>Температура идеального газа.</u> В результате большого числа столкновений между молекулами устанавливается стационарное равновесное состояние газа. Стационарное равновесное состояние – это состояние, при котором средняя кинетическая энергия движения молекул постоянная величина. Физическая величина, характеризующая стационарное равновесное состояние – температура газа. **Температура газа –**

мера средней кинетической энергии хаотического поступательного движения молекул.

Экспериментально установлено, что средняя кинетическая энергия хаотического движения молекул пропорциональна термодинамической температуре: $\overline{E_к} = \frac{m_0\overline{\upsilon^2}}{2} = \frac{3}{2}kT$, где k – постоянная Больцмана (k = 1,38·10^{-23} *Дж/К).*

Следствия из основного уравнения молекулярно-кинетической теории идеального газа

1. Давление газа на стенки сосуда прямо пропорционально средней кинетической энергии хаотического движения молекул. Из эксперимента известно, что средняя кинетическая энергия теплового движения молекул прямо пропорциональна температуре газа: $\overline{E_к} = \frac{m_0\overline{\upsilon^2}}{2} = \frac{3}{2}kT$, где k – постоянная Больцмана (k = 1,38·10^{-23} *Дж/К).* Введём понятие средней квадратичной скорости, как характеристики средней кинетической энергии молекул: $\overline{E_к} = \frac{m_0\overline{\upsilon^2}}{2} = \frac{3}{2}kT$, отсюда $\overline{\upsilon^2} = \frac{2\overline{E_к}}{m_0} = \frac{3kT}{m_0}$, или $\overline{\upsilon_{кв}} = \sqrt{\overline{\upsilon^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$. Средняя квадратичная скорость молекул зависит от температуры газа. Квадрат средней квадратичной скорости определяет среднюю кинетическую энергию теплового движения молекул. С повышением температуры газа увеличивается средняя квадратичная скорость, увеличивается интенсивность движения молекул.

2. Если учесть, что $n \cdot m_0 = \rho$ – плотность газа, то $P = \frac{1}{3}\rho\overline{\upsilon^2}$ – чем больше плотность газа, тем больше давление газа на стенки сосуда. При сжатии газа при постоянной температура давление повышается.

3. Уравнение, связывающее термодинамические параметры (давление, объем, температуру, количество вещества), называется **уравнением состояния**. Так как концентрация молекул $n = \frac{N}{V}$, где N – общее число молекул в сосуде, V – объём всего сосуда, то

$$P = \frac{2}{3} n \cdot \overline{E_к} = \frac{2}{3} n \frac{3}{2} kT = nkT \quad \text{или} \quad P = \frac{N}{V} kT .$$

Это уравнение можно записать $PV = NkT$.

Если в сосуде объёмом V содержится идеальный газ массой m, имеющий молярную массу μ, то $N = \frac{m}{\mu} N_A$. Тогда уравнение состояния газа можно записать через макроскопические параметры давление, объём, температуру и массу газа следующим образом:

$$PV = NkT = \frac{m}{\mu} N_A kT \quad \text{или} \quad PV = \frac{m}{\mu} RT ,$$

где $N_A k = R$ – универсальная газовая постоянная.

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Решите задачи.*

1. Масса молекулы воды $3 \cdot 10^{-26}$ кг. Определите молярную массу воды. Сколько молекул находится в стакане воды объёмом 0,2 л? Плотность воды 1000 кг/м^3.

2. Молекула азота, летящая со скоростью 500 м/с, ударяется о стенку сосуда, причём направление скорости образует с нормалью к стенке угол 60°. Определите изменение импульса стенки за время удара, если считать удар абсолютно упругим.

3. Найти среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекул воздуха при нормальных условиях, если концентрация молекул воздуха равна $2{,}7 \cdot 10^{25}$ м$^{-3}$, температура воздуха 0° С.

4. Определить концентрацию молекул водорода, находящегося под давлением 26,7 кПа, если средняя квадратичная скорость поступательного движения молекул равна $2{,}4 \cdot 10^3$ м/с.

5. Определить плотность газа в сосуде, если молекулы газа производят на стенки сосуда давление 80 кПа, а средняя квадратичная скорость теплового движения молекул равна 500 м/с.

6. При какой температуре средняя квадратичная скорость атомов гелия станет равной скорости искусственного спутника Земли, летящего по круговой орбите на высоте 400 км?

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. **Идеальный газ** – это газ, молекулы которого представляют собой материальные точки, а взаимодействие между молекулами носит характер абсолютно упругого удара.
2. **Основные положения** молекулярно-кинетической теории (МКТ) идеального газа:
   1) молекулы – материальные точки (абсолютно упругие шарики); 2) движение молекул подчиняется законам Ньютона; 3) нет взаимодействия между молекулами ($E_p = 0$; $E_к \neq 0$; $E_p << E_к$); 4) молекулы двигаются хаотично; 5) даже в самом маленьком рассматриваемом объеме содержится большое количество частиц (молекул), сравнимое с числом Авогадро.
3. **Основное уравнение** молекулярно-кинетической теории идеального газа: $P = \frac{1}{3} m_0 n \overline{\upsilon^2}$ или $P = \frac{2}{3} n \cdot \overline{E_к}$.
4. Средняя квадратичная скорость молекул зависит от температуры газа. Квадрат средней квадратичной скорости определяет среднюю кинетическую энергию теплового движения молекул: $\overline{\upsilon^2} = \frac{2\overline{E_к}}{m_0} = \frac{3kT}{m_0}$, или $\overline{\upsilon_{кв}} = \sqrt{\overline{\upsilon^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$.
5. Чем больше плотность газа, тем больше давление газа на стенки сосуда: $P = \frac{1}{3} \rho \overline{\upsilon^2}$ или $P = \frac{2}{3} n \cdot \overline{E_к} = \frac{2}{3} n \frac{3}{2} kT = nkT$.
6. Уравнение состояния газа можно записать через макроскопические параметры давление, объём, температуру и массу газа следующим образом: $PV = NkT = \frac{m}{\mu} N_A kT$ или $PV = \frac{m}{\mu} RT$, где $N_A k = R$ – универсальная газовая постоянная.

ТЕМА 3. **ОПЫТНЫЕ ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ**

Новые слова и словосочетания

изопроцессы	изотермический
изобарический	изобарный
изохорный	процесс
парциальный	нормальные условия
сжатие	расширение
абсолютный	

Состояние газа характеризуется следующими макроскопическими параметрами: V – объём газа, P – давление газа на стенки сосуда, T – температура газа**. Количественная зависимость между макроскопическими параметрами называется уравнением состояния.**

Переход системы (газа) из одного состояния, характеризуемого параметрами P_1, V_1, T_1 **в другое состояние**, характеризуемое параметрами P_2, V_2, T_2 называется **процессом.** Любой процесс описывается уравнением процесса, например, $P = P(V)$ или $T = T(V)$.

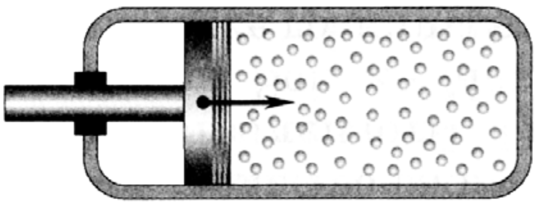
Изопроцессом называется процесс, при котором один из макроскопических параметров состояния данной массы газа остаётся постоянным.

Уравнения связи между параметрами, описывающие изопроцессы называются газовыми законами.

Изотермический процесс. Закон Бойля-Мариотта

Изотермический процесс – процесс изменения состояния определённой массы газа при постоянной температуре.

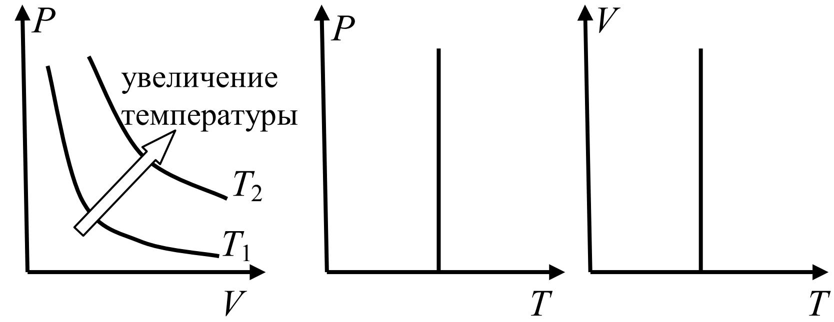
При изотермическом процессе температура $T = const$, $m = const$.



При изменении объёма газа V при постоянной температуре изменяется давление газа. Экспериментально этот закон был установлен в 1662 г. Р. Бойлем, а 1676 г. сформулирован Э. Мариоттом: **для данной массы газа при постоянной температуре произведение давления газа на его объём есть величина постоянная** или математически $PV = const$ $(T = const, \quad m = const)$.

Кривая, изображающая зависимость между макроскопическими параметрами газа при постоянной температуре, называется изо-

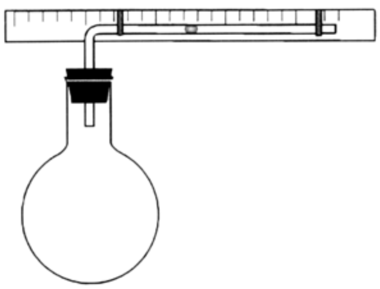
термой. Изотермы представляют собой гиперболу в координатах P,V и прямую линию в координатах P,T или V,T.



Изобарический (изобарный) процесс. Закон Гей–Люссака

Процесс, протекающий в газе, при котором давление остаётся постоянным, называют изобарным.

Зависимость объёма газа от его температуры при постоянном давлении была установлена французским физиком и химиком Л. Гей-Люссаком в 1802 г.



Опыты, проведенные им, показали, что увеличение объёма газа пропорционально изменению температуры. Закон Гей-Люссака: **объём данной массы газа при постоянном давлении возрастает линейно с увеличением температуры:** $V = V_0(1+\alpha \cdot t)$, **где** V – объём газа при температуре t °C, V_0 – объём газа при 0 °C. Величина α называется *температурным коэффициентом расширения* (для всех газов $\alpha = \frac{1}{273} {}^\circ C^{-1}$). Следовательно, $V = V_0(1+\frac{1}{273^\circ C}\cdot t)$ или

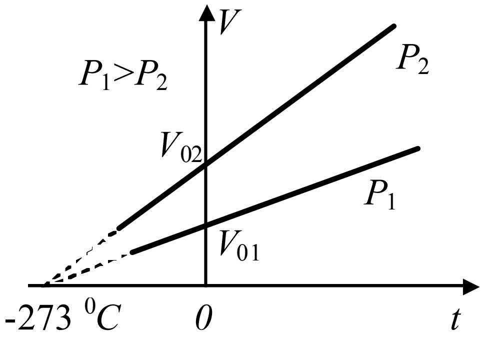
$$V = V_0(1+\frac{1}{273^\circ C}\cdot t) = V_0(\frac{273^\circ C + t}{273^\circ C}) = V_0\frac{T}{T_0},$$

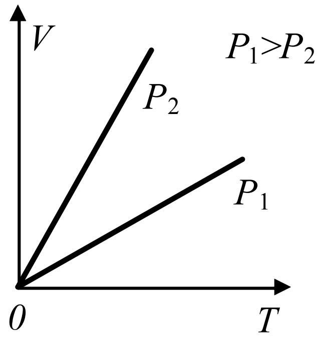
где T – температура газа по абсолютной шкале температур (в градусах Кельвина), T_0 – температура, называемая *нулём Кельвина* (или абсолютным нулём).

Уравнение изобарного процесса можно записать: $\frac{V}{T} = \frac{V_0}{T_0} = const$ или $\frac{V}{T} = const$ – *отношение объёма данной массы газа к его температуре при постоянном давлении есть величина постоянная.* **Для данной**

массы газа при изобарном процессе объём газа пропорционален термодинамической температуре.

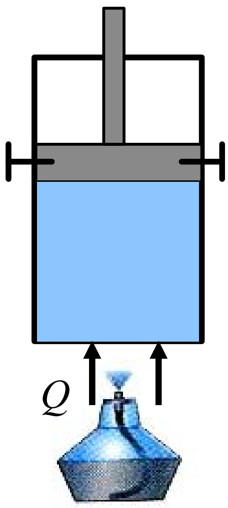
График зависимости объёма от температуры изображается прямой линией – **изобарой.**





Изохорический (изохорный) процесс. Закон Шарля

Процесс, протекающий в газе, при котором объём газа остаётся постоянным, называют изохорным (изохорическим).



Исследования зависимости давления данной массы газа от температуры при постоянном давлении были проведены в 1787 г. французским физиком Ж. Шарлем. Им было установлено: **давление газа данной массы при постоянном объёме возрастает линейно с увеличением температуры:** $P = P_0(1+\gamma \cdot t)$, где P – давление газа при температуре t °C, P_0 – давление газа при температуре 0 °C. Величина γ называется *температурным коэффициентом давления.* Экспериментально установлено, что для всех газов $\gamma = \frac{1}{273} \, °C^{-1}$, таким образом, $P = P_0(1+\frac{1}{273°C} \cdot t)$. По аналогии полученное выражение можно преобразовать:

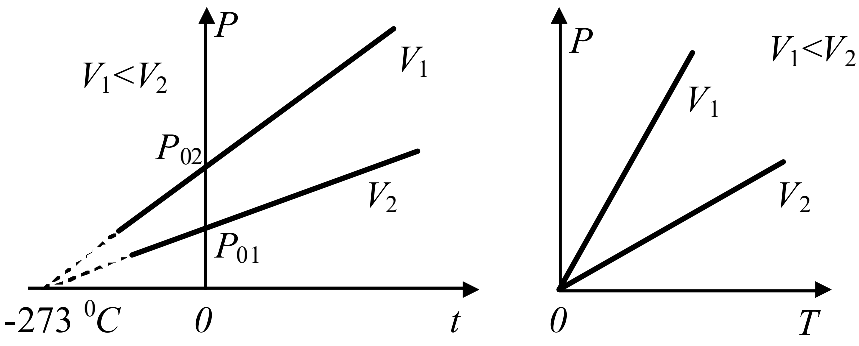
$$P = P_0(1+\frac{1}{273°C} \cdot t) = P_0(\frac{273°C + t}{273°C}) = P_0\frac{T}{T_0},$$

где T – температура газа по абсолютной шкале температур (в градусах Кельвина), T_0 – температура, называемая *нулём Кельвина* (или абсолютным нулём). Нуль Кельвина – это предельная температура, при которой давление идеального газа равно нулю.

Уравнение изохорного процесса можно записать: $\frac{P}{T}=\frac{P_0}{T_0}=const$

или $\frac{P}{T}=const$ – *отношение давления данной массы газа к его температуре при постоянном объёме есть величина постоянная.* **Для данной массы газа давление газа при изохорном процессе пропорционально термодинамической температуре.**

График зависимости давления от температуры изображается прямой линией – **изохорой.**



Закон Авогадро

Один моль любого газа при одинаковой температуре и одинаковом давлении занимает одинаковый объём.

Молярный объём – физическая величина, равная отношению объёма системы (сосуда) к количеству вещества системы: $V_{мол}=\frac{V}{\nu}$. При нормальных условиях $P = 1{,}013 \cdot 10^5$ *Па,* $T = 273$ *K* ($t = 0$ °*C*) молярный объём равен $V_{мол}=22{,}41\cdot 10^{-3}\ м^3/моль$. В одном моле любого вещества содержится одно и тоже количество молекул: $N_A = 6{,}022 \cdot 10^{23}$ $моль^{-1}$ (N_A – постоянная Авогадро).

Закон Дальтона

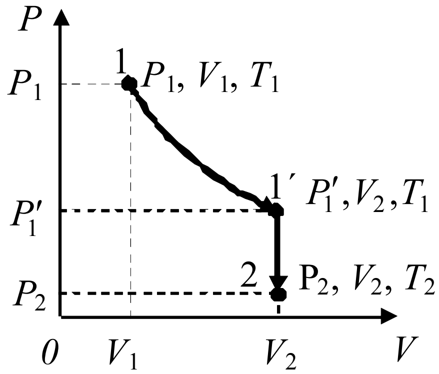
Давление смеси газов равно сумме парциальных давлений P_1, P_2, *…*P_n *входящих в неё газов:* $P=P_1+P_2+P_3+.....+P_n$.

Парциальное давление – давление, которое производил бы газ, входящий в состав газовой смеси, если бы он один занимал объём, равный объёму смеси при этой температуре.

Уравнение состояния идеального газа. Уравнение Клапейрона–Менделеева

Французский физик и инженер Б. Клапейрон вывел уравнение состояния идеального газа, объединив законы Бойля–Мариотта и Гей–Люссака.

Пусть некоторая масса газа $m = const$ находится в состоянии 1, которое характеризуется параметрами P_1, V_1, T_1. Газ переходит в конечное состояние 2, которое характеризуется параметрами P_2, V_2, T_2. При переходе из состояния 1 в состояние 2 в газе протекает вначале изотермический процесс (изотерма 1–1′), потом изохорический (изохора 1′–2).



В соответствии с законом Бойля–Мариотта: $P_1V_1 = P_1'V_2$.

В соответствии с законом Гей–Люссака: $\dfrac{P_1'}{P_2} = \dfrac{T_1}{T_2}$. Решая оба уравнения совместно и исключив из них P_1', получим: $\dfrac{P_1V_1}{T_1} = \dfrac{P_2V_2}{T_2}$.

Так как состояния 1 и 2 были выбраны произвольно, то для данной массы газа величина $\dfrac{PV}{T}$ остается постоянной, то есть $\dfrac{PV}{T} = const = B$. Полученное выражение называется **уравнением Клапейрона,** в котором *В – газовая постоянная, различная для разных газов.*

Русский учёный Д.И. Менделеев объединил уравнение Клапейрона с законом Авогадро, записав это уравнение для 1 *моля* газа. Согласно закону Авогадро при одинаковых давлениях и температуре 1 *моль* любого газа занимает одинаковый молярный объём $V_{мол}$. Поэтому постоянная *В* для одного моля любого газа будет одинаковой (молярная газовая постоянная *R*): $\dfrac{PV_{мол}}{T} = const = R$

Числовое значение молярной газовой постоянной можно определить из условия: при нормальных условиях $P = 1{,}013 \cdot 10^5$ *Па,* $T = 273$ *K* ($t = 0$ °*C*) молярный объём равен $V_{мол} = 22{,}41 \cdot 10^{-3}\ м^3/моль$, тогда $R = 8{,}31$ *Дж/*(*моль·К*).

Уравнение $PV_{мол} = RT$ для 1 *моля* любого газа называется **уравнением Клапейрона–Менделеева или уравнением состояния идеального газа.**

Полученное уравнение можно записать для любой массы газа. Так как **молярный объём –** физическая величина, равная отношению объёма системы (сосуда) к количеству вещества системы $V_{мол} = \dfrac{V}{\nu}$, то $V = V_{мол} \cdot \nu$, то при тех же условиях масса m газа займёт объём $V = \dfrac{m}{\mu} V_{мол}$, где μ – молярная масса газа. Тогда уравнение Клапейрона–Менделеева для массы m газа имеет вид: $PV = \dfrac{m}{\mu} RT$ и называется **уравнением состояния идеального газа.**

При переходе идеального газа данной массы из одного состояния термодинамического равновесия в другое произведение его давления на объём, делённое на абсолютную температуру газа остается величиной постоянной.

Уравнение состояния идеального газа можно записать в другой форме. Если m_0 –масса одной молекулы, то $m = m_0 \cdot N$, где N – число молекул в данном объёме. Молярная масса – это масса одного *моля* вещества, в одном моле любого вещества содержится одно и то количество молекул: $N_A = 6{,}022 \cdot 10^{23}$ *моль*$^{-1}$ (N_A – постоянная Авогадро), тогда $\mu = m_0 \cdot N_A$. Подставим в уравнение состояния m и μ:

$$PV = \frac{m}{\mu} RT = \frac{m_0 N}{m_0 N_A} RT = \frac{N}{N_A} RT \text{ или } P = nkT,$$

где $k = \dfrac{R}{N_A}$ = $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ *Дж/К* – постоянная Больцмана, а $n = \dfrac{N}{V}$ – концентрация молекул.

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Решите задачи.*

1. Определите глубину озера, если объём воздушного пузырька удваивается при подъёме со дна на поверхность. Температура пузырька не успевает измениться при подъёме. На поверхности воды считать атмосферное давление нормальным и равным $1{,}013 \cdot 10^5$ Па.

2. Как изменится давление идеального газа, если объём сосуда, в котором он находится, изотермически увеличить в 2 раза?

3. Газ сжат изотермически от объёма 8 л до объёма 6 л. Давление газа при этом увеличилось на 4 кПа. Определить первоначальное давление газа.

4. Данная масса воздуха при нормальных условиях занимает объём 1 $м^3$. Какой объём будет занимать этот воздух после изотермического закачивания его в шину автомобиля? Давление воздуха в шине 4,9 атм.

5. Как изменится давление идеального газа в закрытом сосуде постоянного объёма, если его абсолютную температуру уменьшить в 3 раза?

6. В закрытом сосуде при температуре 27 °С давление идеального газа было 150 кПа. Каким будет давление этого газа при температуре (–23 °С)?

7. При какой температуре находился газ в закрытом сосуде, если при изохорическом нагревании на 400 К его давление возросло в 3 раза?

8. При температуре 27 °С газ занимает объём 5 л. Какой объём займёт этот же газ при температуре 87 °С, если давление газа остаётся постоянным?

9. Определить конечную температуру идеального газа при уменьшении его объёма в 4 раза и одновременном увеличении его давления в 2 раза, если газ первоначально находился при нормальных условиях.

10. Кислород массой 15 г находится под давлением 200 кПа при температуре 17 °С. После расширения вследствие нагревания при постоянном давлении кислород занял объём 10 л. Определить объём газа до расширения и температуру газа после расширения.

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. Количественная зависимость между макроскопическими параметрами называется **уравнением состояния.**
2. **Переход системы (газа) из одного состояния**, характеризуемого параметрами P_1, V_1, T_1 **в другое состояние**, характеризуемое параметрами P_2, V_2, T_2 называется **процессом.** Любой процесс описывается уравнением процесса, например, $P = P(V)$ или $T = T(V)$.
3. **Изопроцессом** называется процесс, при котором один из макроскопических параметров состояния данной массы газа остаётся постоянным. Уравнения связи между параметрами, описывающие изопроцессы называются газовыми законами.
4. **Изотермический процесс. Закон Бойля–Мариотта:** для данной массы газа при постоянной температуре произведение давления газа на его объём есть величина постоянная или математически $PV = const$ ($T = const$, $m = const$). Кривая, изображающая зависимость между макроскопическими параметрами газа при постоянной температуре, называется **изотермой.**
5. **Изобарический (изобарный) процесс. Закон Гей–Люссака:** объём данной массы газа при постоянном давлении возрастает линейно с увеличением температуры: $V = V_0(1 + \alpha \cdot t)$, где V – объём газа при температуре t °*C*, V_0 –объём газа при 0 °*C*. Или $\frac{V}{T} = const$ *– отношение объёма данной массы газа к его температуре при постоянном давлении есть величина постоянная.* График зависимости объёма от температуры изображается прямой линией – **изобарой.**
6. **Изохорический (изохорный) процесс. Закон Шарля:** давление газа данной массы при постоянном объёме возрастает линейно с увеличением температуры: $P = P_0(1 + \gamma \cdot t)$, где P – давление газа при температуре t °*C*, P_0 – давление газа при

температуре 0 °*C,* или *P/T = const – отношение давления данной массы газа к его температуре при постоянном объёме есть величина постоянная.* График зависимости давления от температуры изображается прямой линией – **изохорой.**

7. **Закон Авогадро:** *один моль любого газа при одинаковой температуре и одинаковом давлении занимает одинаковый объём, равный* $V_{мол} = 22{,}41 \cdot 10^{-3}\ м^3/моль$.
8. **Закон Дальтона:** *давление смеси газов равно сумме парциальных давлений* P_1, P_2, …P_n *входящих в неё газов:* $P = P_1 + P_2 + P_3 + ... + P_n$.
9. **Уравнение состояния идеального газа. Уравнение Клапейрона–Менделеева:** при переходе идеального газа данной массы из одного состояния термодинамического равновесия в другое произведение его давления на объём, делённое на абсолютную температуру газа остается величиной постоянной. Уравнение Клапейрона–Менделеева для массы *m* газа имеет вид: $PV = \frac{m}{\mu}RT$ и называется **уравнением состояния идеального газа.**

ТЕМА 4. **ТЕМПЕРАТУРА И СПОСОБЫ ЕЁ ИЗМЕРЕНИЯ**

(для самостоятельного изучения)

Новые слова и словосочетания

термометр
газовый термометр
термодинамическая шкала
манометр
жидкостный термометр
абсолютная температура
абсолютный нуль

Макроскопические системы. Объектом изучения молекулярной физики являются макроскопические системы – системы, состоящие из большого числа частиц (микрообъектов). Любое вещество состоит из огромного числа частиц. Информация о системе с большим числом частиц должна характеризовать не отдельную частицу, а совокупность частиц в целом.

Система, состоящая из большого числа частиц, характеризуется микроскопическими и макроскопическими параметрами.

Микроскопические параметры – *это параметры, характеризующие движение отдельной частицы (масса частицы, импульс, скорость, кинетическая энергия).*

Макроскопические параметры – *это параметры, характеризующие систему частиц в целом (масса вещества, давление, объём, температура).*

Макроскопические параметры характеризуют состояние макроскопической системы без учёта её молекулярного строения. Масса вещества, давление и объём характеризуют механические свойства макроскопической системы. Температура характеризует степень нагретости тела (системы). Горячее тело имеет более высокую температуру, чем холодное. Для измерения температуры (степени нагретости) тела создан прибор, называемый термометром. Если горячее тело и холодное тело привести в контакт, то между ними происходит обмен энергией. Тело с большей температурой будет отдавать энергию телу с меньшей температурой (происходит теплопередача, теплообмен).

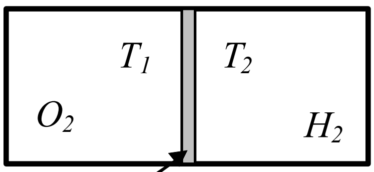
Теплообмен $\Longrightarrow$ передача тепла (энергии) от одного тела (более нагретого) к другому (менее нагретому)

Через некоторый промежуток времени температура обоих тел будет одинаковой. При одинаковых температурах двух тел между ними не происходит теплообмен. Говорят, что между телами установилось тепловое равновесие.

Температура $\boldsymbol{t}$ [°C]; $\boldsymbol{T}$ [K]	физическая величина, характеризующая отклонение тела от теплового равновесия с другим телом, температура которого принята за ноль (степень нагретости).

Для измерения температуры тела необходимо, чтобы установилось тепловое равновесие между термометром и телом, температуру которого будем измерять. *Тепловым равновесием называют такое состояние тел, при котором все макроскопические параметры остаются постоянными.* Это означает, что в системе не меняются давление и объём, не происходит теплообмен, отсутствуют взаимные превращения газов, жидкостей, твердых тел и так далее. Однако микроскопические процессы внутри системы не прекращаются и при тепловом равновесии: меняется положение и скорости молекул при их хаотичном движении, молекулы сталкиваются друг с другом.

Средняя кинетическая энергия молекул газа при тепловом равновесии. Температура – мера средней кинетической энергии молекул



теплопроводящая перегородка

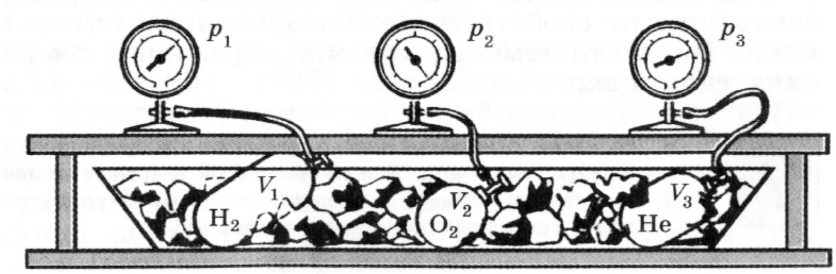
Возьмём сосуд, разделённый пополам перегородкой, проводящей тепло. В одну половину сосуда поместим кислород, а в другую половину сосуда поместим водород. Пусть газы имеют различные температуры. Спустя некоторый промежуток времени газы будут иметь одинаковую температуру, не зависящую от природы газа (газы будут находиться в состоянии теплового равновесия).

Известно, что чем быстрее движутся молекулы, тем выше температура тела. <u>Температура – мера средней кинетической энергии молекул</u>.

При нагревании газа при постоянном объёме давление газа прямо пропорционально температуре. Согласно основному уравнению молекулярно-кинетической теории давление газа прямо пропорционально средней кинетической энергии поступательного движения молекул: $P = \frac{2}{3} n\overline{E}_k$, где n – концентрация молекул. При тепловом равновесии, если давление газа данной массы и его объём не меняются, то средняя кинетическая энергия молекул газа должна быть величиной постоянной. Таким образом, при тепловом равновесии средние кинетические энергии молекул всех газов одинаковы, значит, газы имеют одинаковую температуру.

Так как концентрация молекул $n = \frac{N}{V}$, где N – число молекул в объеме V, то основное уравнение молекулярно-кинетической теории можно записать в виде: $\frac{P}{n} = \frac{PV}{N} = \frac{2}{3}\overline{E}_k$. Очевидно, что величина $\frac{P}{n}$ должна быть пропорциональна температуре газа.

Убедимся на опыте, что $\frac{PV}{N} = \frac{P}{n}$ определяется температурой газа.



Возьмем три сосуда, содержащие различные газы: азот, кислород, гелий. Сосуды имеют объемы V_1, V_2, V_3 и содержат газы массами m_1, m_2, m_3 или N_1, N_2, N_3 молекул. Концентрации молекул в сосудах можно определить:

$$n_1 = \frac{N_1}{V_1} = \frac{m_1}{\mu_1 V_1} N_A; \qquad n_2 = \frac{N_2}{V_2} = \frac{m_2}{\mu_2 V_2} N_A; \qquad n_3 = \frac{N_3}{V_3} = \frac{m_3}{\mu_3 V_3} N_A.$$

Поместим сосуды в лед при температуре 0°C. Измерим давление P_1, P_2, P_3 по приборам (манометрам) в тепловом равновесии.

В тепловом равновесии все газы имеют одинаковую температуру 0° *C*, давление, объем и концентрация молекул в сосудах разные .

Пример.

	Количество молекул	Объём	Давление при температуре 0° *C*	Давление при температуре 100° *C*
Азот	1 *моль*	0,02 $м^3$	$1{,}132 \cdot 10^5$ *Па*	$1{,}547 \cdot 10^5$ *Па*
Кислород	1 *моль*	0.016 $м^3$	$1{,}415 \cdot 10^5$ *Па*	$1{,}933 \cdot 10^5$ *Па*
Гелий	1 *моль*	0,02 $м^3$	$1{,}132 \cdot 10^5$ *Па*	$1{,}547 \cdot 10^5$ *Па*

Для газов, находящихся в тепловом равновесии при 0° *С*:

при t = 0°С для всех газов: $\frac{PV}{N} = const = \theta_1 = 3{,}76 \cdot 10^{-21}$ *Дж*.

Перенесем сосуды в другую среду, например, в горячую воду при температуре 100° *С*, то давление изменится, объём и концентрация молекул останутся постоянными.

Для газов, находящихся в тепловом равновесии при 100° *С*:

при t = 100°С для всех газов: $\frac{PV}{N} = const = \theta_2 = 5{,}14 \cdot 10^{-21}$ *Дж*.

Вывод: величина θ увеличивается с повышением температуры.

Из опыта следует, что в состоянии теплового равновесия отношение $\frac{PV}{N}$ одинаково для всех газов и не зависит от природы газа, его давления и объёма. Будем считать величину θ прямо пропорциональной температуре T газа, измеряемой в градусах: $\theta = kT$, где k –коэффициент пропорциональности (постоянная Больцмана). Постоянная Больцмана $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ *Дж/К*.

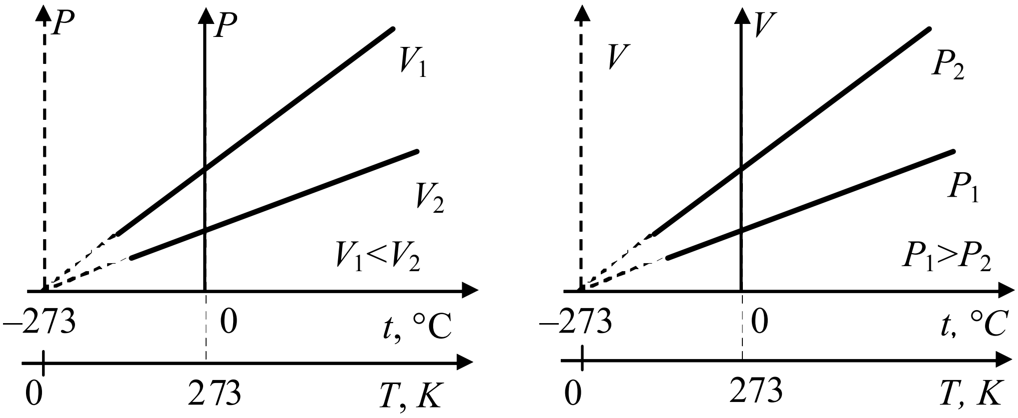
Так как $P = \frac{2}{3} n\overline{E}_k \Rightarrow \quad \frac{PV}{N} = \frac{2}{3}\overline{E}_k = \theta = kT$

Таким образом, температура является мерой средней кинетической энергии молекул:

$$\frac{PV}{N} = kT, \quad \text{то} \quad \overline{E}_k = \frac{3}{2}kT$$

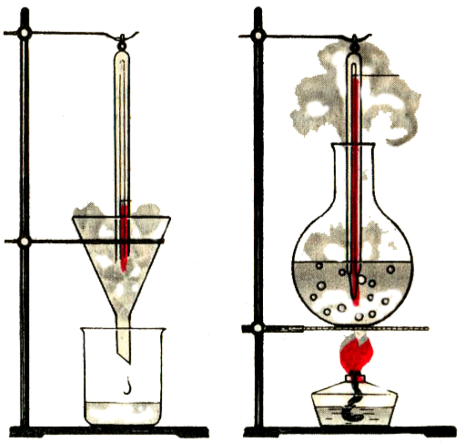
Средняя кинетическая энергия молекул идеального газа прямо пропорциональна абсолютной температуре, т.е. температура, является <u>мерой интенсивности теплового движения молекул.</u>

Температура, определяемая по формуле $\frac{PV}{N} = kT$, не может быть отрицательной, так как все величины, в левой части этого уравнения всегда положительные. Следовательно, минимальным возможным значением температуры T является значение $T = 0$, если давление P или объём V равны нулю. *Минимальную температуру, при которой давление газа становится равным нулю при постоянном объёме газа или при которой объём газа стремится к нулю при постоянном давлении, называют* ***абсолютным нулём температуры.***



Для измерения температуры используют разные шкалы температур.

<u>Шкала Цельсия.</u> В быту мы чаше всего используем шкалу Цельсия. Шкала названа так в честь шведского ученого Андерса Цельсия, предложившего эту шкалу. Она основана на двух фиксированных значениях температуры. Первое значение – температура таяния льда при нормальном атмосферном давлении. Значение этой температуры принимается равной 0° *C*. Второе значение – температура кипения чистой воды при нормальном атмосферном давлении. Значение этой температуры принято считать по этой шкале равной 100 °*C*. Расстояние между этими точками на шкале термометра делится на сто равных частей. Таким образом, цена деления такой шкалы равна 1 °*C*.

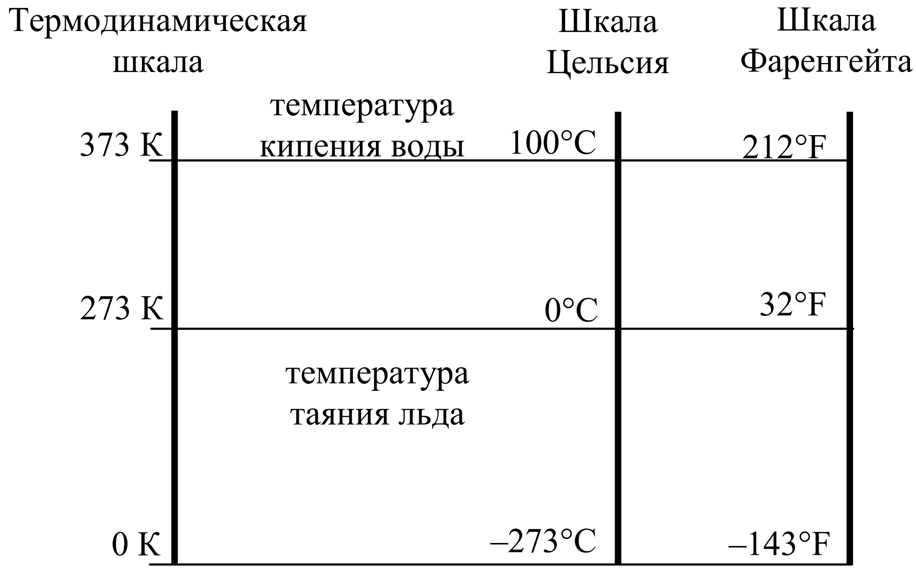


Изменение температуры

измеряют термометрами
– <u>жидкостные</u> (спиртовые, ртутные):
[действие основано на тепловом расширении при нагревании]
– <u>газовые</u>
– <u>полупроводниковые</u>

Шкала температур Цельсия
t°[C]
100° ***температура кипения воды*** (*при нормальных условиях*)
0° ***температура таяния льда***

Единица измерения температуры по шкале Цельсия называется <u>градусом Цельсия</u> (1°C). Температура по шкале Цельсия обозначается *t*°C.



Шкала Фаренгейта. В *шкале Фаренгейта* температура замерзания воды 32°F, а температура кипения воды 212°F. Температурный интервал разделен на 180 равных частей – *градусов Фаренгейта* (1°F).

$$100°C = 180°F \Rightarrow 1°C = 9/5°F \text{ или } 1°F = 5/9°C.$$

Связь между температурой по шкале Фаренгейта и температурой по шкале Цельсия $t\,^{o}F = 5/9\ (t\,^{o}C+32)$.

Термодинамическая температурная шкала. В физике принято использовать так называемую абсолютную (термодинамическую) шкалу температур Кельвина. Эта шкала названа по имени английского физика Уильяма Томсона (лорда Кельвина). Эта шкала построена на основе законов термодинамики. *За нуль (абсолютный нуль) Кельвином была принята такая температура, при которой тело не может передать тепло никакому другому телу, так как в природе не существует менее нагретого тела.* С точки зрения молекулярной теории нулевая температура по шкале Кельвина означает, что кинетическая энергия теплового движения молекул этого газа равна нулю $\overline{E}_k = \frac{3}{2}kT$.

Температуру по термодинамической шкале называют *абсолютной температурой* и обозначают *T*.

Единица измерения абсолютной температуры – *Кельвин* (1*К*).

Один Кельвин равен одному градусу Цельсия (1*К* = 1°*С)*. Связь между абсолютной температурой и температурой по шкале Цельсия *t К* = t°*C*+273 или t°*C* = *t К*–273

Температура 0*К* = – 273,15°*С* называется *абсолютным нулем*.

Абсолютная температура ***T*****[K]**	температура, измеренная по шкале Кельвина (отражает физические смысл температуры)
Абсолютный нуль $\boldsymbol{T = 0}$ **[K]**	температура, при которой прекращается движение молекул. (Абсолютный нуль недостижим, так как материя не существует без движения).

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Ответьте на вопросы. Приготовьтесь к устному ответу.*

1. По какому признаку можно судить о равенстве температур двух тел?

2. Как зависит от температуры средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул?

3. Как строится шкала температур Цельсия? Что принято за основные точки этой шкалы?

4. Как строится абсолютная температурная шкала? Что принято за единицу абсолютной температуры?

5. Каково соотношение между температурами по шкале Цельсия и шкале Кельвина? Чему равен абсолютный нуль температуры по шкале Цельсия?

6. Какую связь устанавливает молекулярно-кинетическая теория между абсолютной температурой идеального газа и средней кинетической энергией хаотического движения его молекул?

ТЕМА 5. **ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ**

Новые слова и словосочетания

термодинамика	термодинамический
бомбардировка	теплообмен
теплопередача	теплота

Молекулярно-кинетическая теория объясняет свойства тел и явления, происходящие в веществе, исходя из рассмотрения характера движения и взаимодействия молекул и атомов вещества. Например, давление объясняется бомбардировкой огромного числа молекул о стенки сосуда. Зависимость давления от температуры обусловлена связью средней кинетической энергии поступательного движения молекул с температурой.

Раздел физики, в котором изучаются свойства тел без использования представлений о характере движения и взаимодействия частиц, из которых они состоят, называется термодинамикой.

Термодинамика – это часть молекулярной физики, которая изучает свойства систем (тел) в состоянии термодинамического равновесия и процессы перехода между этими состояниями равновесия. **Термодинамическая система –** это совокупность большого числа частиц.

Термодинамическое равновесие – состояние, в которое переходит система через достаточно большой промежуток времени при изоляции от окружающей среды. В состоянии термодинамического равновесия параметры характеризующие систему (давление, объём, температура и др.) не меняются.

Термодинамика не рассматривает микроскопическое состояние вещества, а изучает физические свойства систем на основе анализа процессов, связанных с законами превращения энергии.

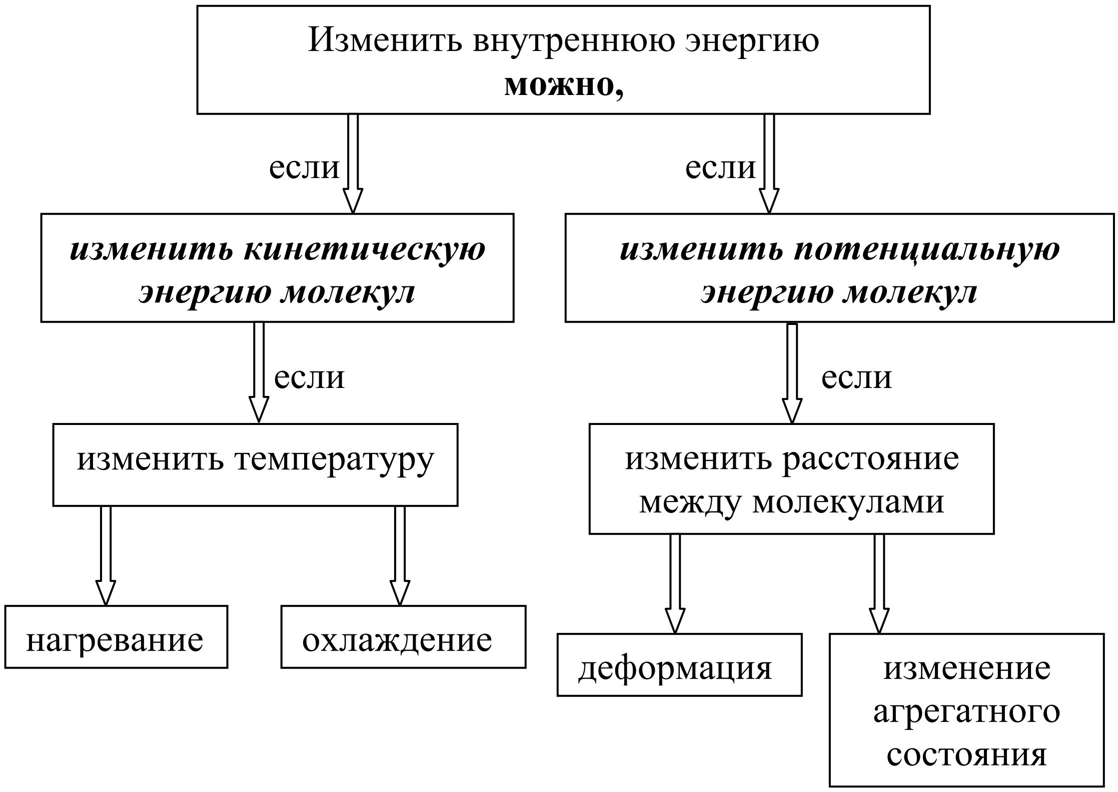
Внутренняя энергия идеального газа

Одной из основных величин, используемых в термодинамике, является ***внутренняя энергия системы (тела).***

Частицы, из которых состоит система, непрерывно хаотически движутся и взаимодействуют друг с другом. Следовательно, эта система обладает энергией, которая зависит от термодинамических параметров: давления, объёма и температуры. Кроме того, частицы системы могут взаимодействовать с внешними телами, не входящими в данную систему.

Внутренняя энергия тел обусловлена движением и взаимодействием молекул, из которых состоят эти тела.

Таким образом, внутренняя энергия – сумма кинетической энергии хаотического теплового движения частиц (атомов, молекул) тела (системы) и потенциальной энергии их взаимодействия $U = \sum\limits_N \overline{E}_k + \sum\limits_N \overline{E}_{i\,пот}$, где $\sum\limits_N \overline{E}_k$ – сумма всех кинетических энергий молекул тела, а $\sum\limits_N \overline{E}_{i\,пот}$ – сумма потенциальных энергий взаимодействия всех молекул.



Молекулы <u>идеального газа</u> не взаимодействуют друг с другом, поэтому внутренняя энергия идеального газа равна **<u>суммарной кинетической энергии молекул</u>**.

Пусть газ содержит N молекул, каждая молекула обладает средней кинетической энергией $\overline{E}_k$. Тогда внутренняя энергия $U = \sum\limits_N \overline{E}_k = N \cdot \overline{E}_k$. Так как $\overline{E}_k = \dfrac{m_0 \overline{\upsilon}^2}{2} = \dfrac{3}{2}kT$, а число молекул N равно $\dfrac{m}{\mu} \cdot N_A = N$, где m масса газа, μ – молярная масса. Тогда внутренняя энергия идеального газа равна:

$$U = N \cdot \overline{E}_k = \frac{3}{2}\frac{m}{\mu} N_A kT \text{ или } U = \frac{3}{2}\frac{m}{\mu} RT \text{, так как } N_A \cdot k = R.$$

Внутренняя энергия идеального одноатомного газа прямо пропорциональна его абсолютной температуре. Она не зависит от объёма и других макроскопических параметров системы.

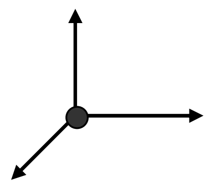
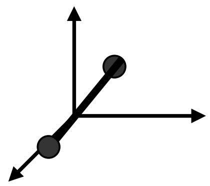
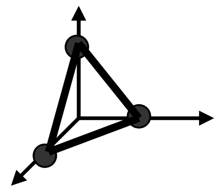
Изменение внутренней энергии идеального газа равно $\Delta U = \frac{3}{2}\frac{m}{\mu} R\Delta T = \frac{3}{2}\frac{m}{\mu} R(T_2 - T_1)$, то есть определяется температурами начального и конечного состояниями газа и не зависит от процесса. Внутренняя энергия не зависит от механического движения тела, не зависит от положения этого тела относительно других тел.

Внутренняя энергия одноатомного газа – это средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул. Молекулы газа, состоящие из нескольких атомов, могут ещё и вращаться. Поэтому кроме кинетической энергии поступательного движения молекулы обладают и кинетической энергией вращательного движения.

В классической молекулярно-кинетической теории рассматриваются только одноатомные молекулы. Положение любого тела в классической механике характеризуется определённым числом степеней свободы i . *Число независимых величин, которые должны быть заданы для определения положения тела (молекулы) в пространстве, называют числом степеней свободы.* Следовательно, число независимых движений, которое тело может совершить, также равно числу степеней свободы.

Если газ одноатомный (молекула газа состоит из одного атома), то каждый атом может совершать только поступательное движение по трём взаимно перпендикулярным направлениям. Положение молекулы определяется тремя координатами. Для молекулы одноатомного газа число степеней свободы равно $i = 3$.

Газ называется двухатомным, если каждая молекула газа состоит из двух атомов. Двухатомная молекула обладает осевой симметрией и имеет 5 степеней свободы. Каждый атом имеет три степени свободы поступательного движения и две степени свободы определяющих вращательное движение. Многоатомная молекула характеризуется шестью степенями свободы (возможно вращение молекулы вокруг трёх взаимно перпендикулярных осей).

Газ		Одноатомный	Двухатомный	Многоатомный
Модель молекулы				
Число степеней свободы	поступательных	3	3	3
	вращательных	–	2	3
	всего	3	5	6

От числа степеней свободы молекул зависит внутренняя энергия газа. Так как движение молекул беспорядочное, то ни один из видов движения молекул не имеет преимущества перед другим видом. Поэтому *на каждую степень свободы, соответствующую поступательному или вращательному движению молекул, приходится одна и та же средняя кинетическая энергия* (закон равномерного распределения энергии по степеням свободы).

Если средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул идеального одноатомного газа равна $\overline{E}_k = \frac{m_0\overline{\upsilon}^2}{2} = \frac{3}{2}kT$. Поступательному движению соответствует **три** степени свободы, следовательно, средняя кинетическая энергия, приходящаяся на одну степень свободы, равна $\frac{1}{2}kT$.

Тогда средняя кинетическая энергия молекулы газа, имеющей число степеней свободы *i*, равна $\overline{E}_k = \frac{i}{2}kT$, а внутренняя энергия газа массой *m* равна $U = \frac{i}{2}\frac{m}{\mu}RT$

Изменить внутреннюю энергию идеального газа, не меняя его массу можно изменив его температуру.

Способы изменения внутренней энергии идеального газа

Так как внутренняя энергия идеального газа прямо пропорциональна температуре газа, то изменение внутренней энергии пропорционально изменению температуры.

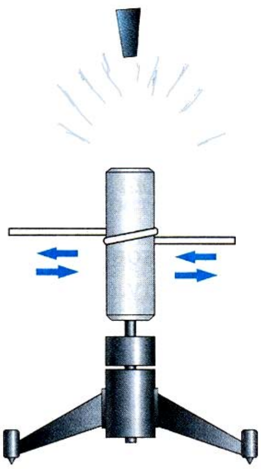
При повышении температуры газа внутренняя энергия увеличивается, так как увеличивается средняя кинетическая энергия движения молекул. С понижением температуры внутренняя энергия уменьшается.

Рассмотрим способы изменения внутренней энергии тела (системы, газа).

Способ первый: изменение внутренней энергии за счёт работы, совершаемой над системой или работы, совершаемой системой.

Пример 1. Скользящая по льду шайба под действием силы трения останавливается через некоторый промежуток времени. Её механическая энергия не просто исчезает, а передаётся беспорядочно движущимся молекулам льда и шайбы. Неровности поверхностей трущихся тел деформируются при движении, и интенсивность беспорядочного движения молекул возрастает. Оба тела нагреваются, что означает и увеличение их внутренней энергии.

Пример 2. На рисунке в тонкостенную латунную трубку налито немного эфира. Трубка закрыта пробкой. При трении веревки о стенки трубки, трубка нагревается. Через некоторое время эфир закипит и пар выталкивает пробку. Опыт показывает, что внутренняя энергия эфира увеличилась. Увеличение внутренней энергии произошло за счет работы, совершенной при трении веревки о трубку.



Итак, **внутреннюю энергию можно увеличить, совершая над телом работу**.

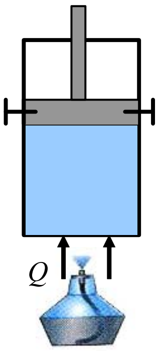
Пример 3. Сожмём быстро газ, находящийся в сосуде с поршнем. Сжатый газ выталкивает поршень, совершая работу. Эта работа совершена за счёт внутренней энергии, которая при этом уменьшается. Уменьшение внутренней энергии приводит к охлаждению газа.

Таким образом, чтобы определить изменение внутренней энергии тела, необходимо знать работу, совершенную над телом или работу, которую совершило само тело.

Если U_0 –внутренняя энергия системы в начальном состоянии, а U_k – внутренняя энергия в конечном состоянии и над системой совершена работа A', то $U_0 + A' = U_k$. Изменение внутренней энергии системы $U_k - U_0 = A'$.

Если работу совершает сама система, то $U_0 - A = U_k$**. Изменение внутренней энергии системы** $U_k - U_0 = -A$**.**

<u>Способ второй:</u> изменение внутренней энергии термодинамической системы в результате теплопередачи.



Пример 1. Изменить внутреннюю энергию системы можно без совершения работы. Если нагревать воду в сосуде, то внутренняя энергия воды начнёт увеличиваться. При нагревании увеличивается скорость теплового движения молекул и значит, увеличивается внутренняя энергия системы. Для нагревания сосуда его необходимо привести в контакт с телом, имеющим более высокую температуру. От горячего тела к холодному передаётся энергия без совершения работы. Такой способ передачи энергии называется **теплопередачей (теплообменом). Количественную меру изменения внутренней энергии при теплообмене называют количеством теплоты.** Количество теплоты – это энергия, которую тело (система) получает или отдаёт в процессе теплообмена.

При теплопередаче внутренняя энергия системы, которая получает теплоту, увеличивается на величину, равную количеству полученной теплоты. При этом внутренняя энергия тела, которое отдаёт теплоту, уменьшается на величину, равную количеству отданной теплоты.

Если U_0 –внутренняя энергия системы в начальном состоянии, а U_k – внутренняя энергия в конечном состоянии и система в процессе теплопередачи получила количество теплоты Q, то $U_0 + Q = U_k$**. Изменение внутренней энергии системы** $U_k - U_0 = +Q$**. Если в процессе теплопередачи система отдаёт количество теплоты** Q'**, то** $U_0 - Q' = U_k$**. Изменение внутренней энергии системы** $U_k - U_0 = -Q'$**.**

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

При теплопередаче теплота самопроизвольно всегда передаётся от более нагретого тела к менее нагретому телу.

<u>Изменение внутренней энергии в общем случае</u>

Итак, изменить внутреннюю энергию системы можно двумя способами:

1. совершить над системой механическую работу (или система совершает работу),

2. передать системе определённое количество теплоты (или система отдаёт определённое количество теплоты).

Эти два процесса могут проходить одновременно. Если U_0 – внутренняя энергия системы в начальном состоянии, а U_k – внутренняя энергия в конечном состоянии, над **системой совершена работа A' и системе передано количество теплоты Q,** то $U_0 + A' + Q = U_k$. **Изменение внутренней энергии системы** $U_k - U_0 = A' + Q$ **.** Если **работу совершает сама система, то** $U_0 - A + Q = U_k$**. Изменение внутренней энергии системы** $U_k - U_0 = -A + Q$ **.**

Если U_0 –внутренняя энергия системы в начальном состоянии, а U_k – внутренняя энергия в конечном состоянии, **над системой совершена работа A' и система отдаёт количество теплоты** Q', то $U_0 + A' - Q' = U_k$. **Изменение внутренней энергии системы** $U_k - U_0 = A' - Q'$**. Если работу совершает сама система, то** $U_0 - A - Q' = U_k$**. Изменение внутренней энергии системы** $U_k - U_0 = -A - Q'$**.**

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Решите задачи.*

1. Кусок пластилина сжали с противоположных сторон двумя силами, модули которых равны 1 Н. В результате сжатия пластилин деформировался так, что его противоположные стороны сместились на 1 см каждая. Определить изменение внутренней энергии куска пластилина.

2. Пробка массой 10 г вылетела из бутылки с газированной водой и поднялась на высоту 30 см. Оцените изменение внутренней энергии термодинамической системы (бутылки с газированной водой), произошедшее при выталкивании пробки.

3. С высоты 1 м на свинцовую плиту падает гиря массой 5 кг. После удара она остаётся неподвижно лежать на плите. Определите изменение внутренней энергии термодинамической системы, состоящей из плиты и гири.

4. Воздух массой 87 кг нагревают от 10°C до 30°C. Определите изменение внутренней энергии воздуха. Молярная масса воздуха 29 г/моль.

5. Найдите изменение внутренней энергии гелия при изобарном расширении газа от объёма 10 л до объёма 15 л, если давление газа 10^4 Па.

6. Молекулярный кислород находится под давлением 10^5 Па в сосуде объёмом 0,8 $м^3$. При изохорном охлаждении внутренняя энергия газа уменьшилась на 100 кДж. Чему равно конечное давление кислорода?

7. Вода в работающем электрическом чайнике получила в процессе теплопередачи от спирали чайника 500 Дж теплоты и одновременно отдала окружающей среде 100 Дж теплоты. Как изменилась при этом внутренняя энергия воды?

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. Термодинамика не рассматривает микроскопическое состояние вещества, а изучает физические свойства систем на основе анализа **процессов, связанных с законами превращения энергии**.
2. **Внутренняя энергия тел** обусловлена движением и взаимодействием молекул, из которых состоят эти тела.
3. **Молекулы идеального газа не взаимодействуют друг с другом**, поэтому внутренняя энергия равна **<u>суммарной кинетической энергии молекул</u>**.
4. **Внутренняя энергия идеального одноатомного газа** прямо пропорциональна его абсолютной температуре $U = \frac{3}{2}\frac{m}{\mu}RT$.

5. **Изменение внутренней энергии** идеального газа равно $\Delta U = \frac{3}{2}\frac{m}{\mu}R\Delta T = \frac{3}{2}\frac{m}{\mu}R(T_2 - T_1)$, то есть определяется температурами начального и конечного состояниями газа и не зависит от процесса. Внутренняя энергия не зависит от механического движения тела, не зависит от положения этого тела относительно других тел.
6. Итак, изменить внутреннюю энергию системы можно двумя способами:
   - совершить над системой механическую работу (или система совершает работу),
   - передать системе определённое количество теплоты (или система отдаёт определённое количество теплоты).
7. Если U_0 –внутренняя энергия системы в начальном состоянии, а U_k – внутренняя энергия в конечном состоянии, над системой совершена работа A' и системе передано количество теплоты Q, то $U_0 + A' + Q = U_k$. Если работу совершает сама система, то $U_0 - A + Q = U_k$.
8. Если U_0 –внутренняя энергия системы в начальном состоянии, а U_k – внутренняя энергия в конечном состоянии, над системой совершена работа A' и система отдаёт количество теплоты Q', то $U_0 + A' - Q' = U_k$. Если работу совершает сама система, то $U_0 - A - Q' = U_k$.

ТЕМА 6. **РАБОТА ГАЗА**

Новые слова и словосочетания

расширение	сжатие
графически	площадь под кривой
гипербола	однозначная функция

В механике рассматривается движение макроскопических тел. Работа силы определяется как произведение модулей силы и перемещения и косинуса угла между направлениями силы и перемещения. Работа, совершаемая при действии силы (или нескольких сил) на макроскопическое систему (тело), равна изменению его кинетической энергии движения и потенциальной энергии в поле этой силы. При этом внутренняя энергия системы не изменяется, так как **внутренняя энергия тел обусловлена движением и взаимодействием молекул, из которых состоят эти тела.** Внутренняя энергия не зависит от механического движения тела, не зависит от положения этого тела относительно других тел.

Внутренняя энергия – однозначная функция термодинамического состояния системы. Изменить внутреннюю энергию системы можно, если совершить над системой механическую работу (или система совершает работу).

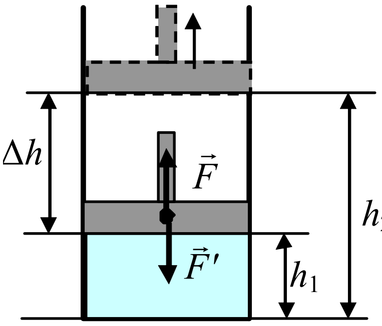
В термодинамике рассматривается работа, совершаемая газом (системой) или работа, совершаемая над системой внешними силами, которая приводит к изменению внутренней энергии системы. При сжатии поршень передаёт молекулам часть своей кинетической энергии, в результате чего газ нагревается – внутренняя энергия газа увеличивается. При расширении газ охлаждается – внутренняя энергия уменьшается.

Итак, **при совершении работы в термодинамике меняется состояние термодинамической системы:** меняется давление, объём и температура.

Работа газа при расширении и сжатии

1. Вычислим работу, совершаемую силой давления газа при его расширении от начального объёма V_1 до конечного объёма V_2. Будем считать, что поршень, площадь поперечного сечения которого S, перемещается на высоту Δh (элементарно малое перемещение) и **сила дав-**

ления газа остаётся постоянной в процессе перемещения поршня (изобарный процесс). На газ со стороны поршня действует сила $\vec{F}'$ (внешняя сила), газ действует на поршень с силой $\vec{F}$. Согласно третьему закону Ньютона $\vec{F} = -\vec{F}'$.



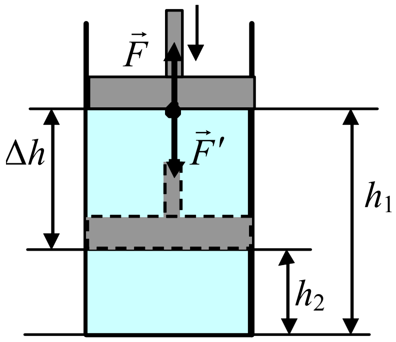
Модуль силы, действующей со стороны газа на поршень, равен $F = PS$, где P – давление газа, S – площадь поршня. Если газ расширяется изобарно и поршень смещается в направлении силы на малое расстояние $\Delta h = h_2 - h_1$, то работа газа равна:

$$A = F \cdot \Delta h = PS(h_2 - h_1) = P(Sh_2 - Sh_1).$$

Начальный объём газа $V_1 = Sh_1$, конечный объём газа $V_2 = Sh_2$, тогда

$$A = P(V_2 - V_1) = P \cdot \Delta V.$$

Таким образом, **работа, которую совершает газ <u>при изобарном расширении</u> от начального объёма V_1 до конечного объёма V_2, равна $A = P(V_2 - V_1) = P \cdot \Delta V$.**



<u>При расширении газ совершает положительную работу, так как направление силы и направление перемещения поршня совпадают.</u>

Если газ сжимается, то $V_2 < V_1$, поэтому $A < 0$.

Если изменение объёма не происходит (<u>изохорический процесс</u>) $V_2 = V_1$, то работа газа $A = 0$.

Работа, совершаемая внешними силами над газом, отличается от работы самого газа только знаком: $A = -A'$, так как сила $\vec{F}'$, действующая на газ, направлена против силы $\vec{F}$, а перемещение поршня остаётся таким же. Тогда $A' = P(V_2 - V_1) = -P \cdot \Delta V$.

2. Формула работы расширения (сжатия) газа $A = P(V_2 - V_1) = P \cdot \Delta V$ относится к случаю, когда давление газа при его сжатии или расширении остаётся постоянным. При других процессах в газе данную формулу применять нельзя. В этом случае нужно определить элементарную работу $\Delta A = dA$ при элементарном изменении объёма $\Delta V = dV$ **столь малом, что изменением давления газа при этом можно пренебречь.** Тогда элементарная работа будет равна $dA = \Delta A = P \cdot \Delta V = PdV$. А вся работа при конечном изменении объёма от V_1 до V_2 равна сумме элементарных работ: $A = \sum dA = \sum P \cdot dV$.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

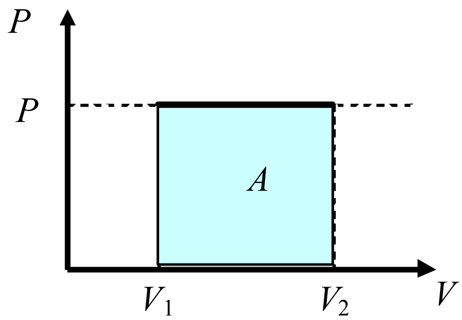
Если газ совершает работу (или над газом совершается работа), то изменяется его внутренняя энергия, так как изменяется температура газа. При изобарном расширении газа совершается работа $A = P \cdot \Delta V$. По уравнению Клапейрона–Менделеева $PV = \frac{m}{\mu} RT$, если объём изменяется на ΔV, то температура изменяется на ΔT:

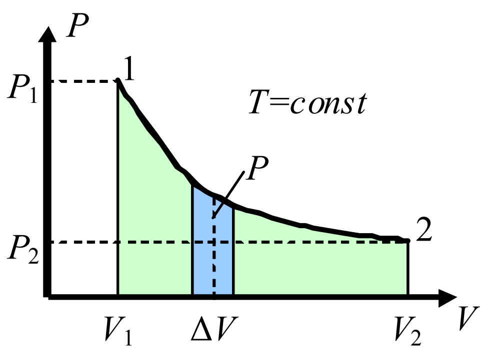
$$P\Delta V = \frac{m}{\mu} R\Delta T \text{ или } A = \frac{m}{\mu} R\Delta T.$$

Изменение внутренней энергии пропорционально изменению температуры $\Delta U = \frac{3}{2}\frac{m}{\mu} R\Delta T$. Следовательно, если газ совершает работу, то изменяется его внутренняя энергия.

Графическое представление работы. Графический метод вычисления работы при любом процессе

1. **Изобарный процесс.** Работа газа при изобарном расширении от начального объёма V_1 до конечного объёма V_2 равна $A = P(V_2 - V_1) = P \cdot \Delta V$. Представим график изобарного процесса. На графике работа газа численно равна площади прямоугольника, ограниченного графиком $P = const$, осью V и перпендикулярами, восстановленными к оси абсцисс в точках V_1 и V_2.

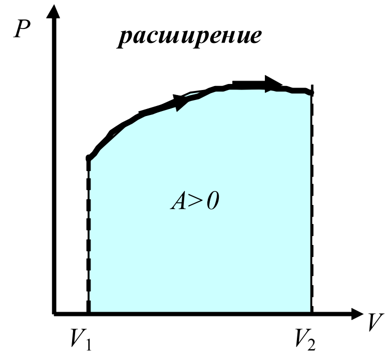




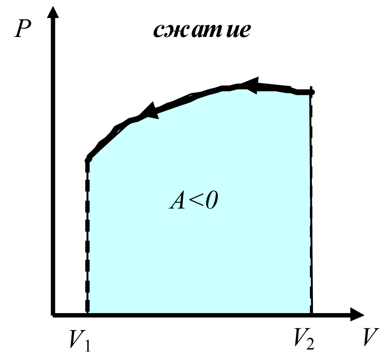
2. **Изохорный процесс.** При изохорном процессе ($\Delta V = 0$) работа газом не совершается: $A = 0$.

3. **Изотермический процесс.** При изотермическом расширении газа его давление изменяется по гиперболическому закону. Выделим на изотерме небольшой участок, соответствующий малому изменению объёма $\Delta V = dV$. Проведём перпендикуляры из концов участка до пересечения с изотермой и обозначим через P среднее давление при таком изменении объёма. Элементарная работа, совершаемая газом при расширении на dV, равна $dA = P \cdot dV$. Такая же величина определяет площадь заштрихованной трапеции, имеющей среднюю линию P и высоту dV. Полная работа складывается из площадей подобных трапеций и равна площади под изотермой:

$$A = \frac{m}{\mu} RT \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}.$$



4. Пусть изменение давления газа при его расширении задаётся произвольной кривой. При увеличении объёма на dV совершается элементарная работа $dA = P \cdot dV$. Полная работа при расширении от объёма от V_1 до V_2 определяется площадью фигуры, ограниченной осью абсцисс, кривой $P = f(V)$ и перпендикулярами, восстановленными к оси абсцисс в точках V_1 и V_2.



Если газ сжимать по той же кривой, то работа газа также определяется площадью фигуры под кривой, но знак её будет отрицательным.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

Работа, совершаемая газом в процессе его расширения (или сжатия) при любом термодинамическом процессе, численно равна площади под кривой, изображающей изменение состояния газа на диаграмме P,V.

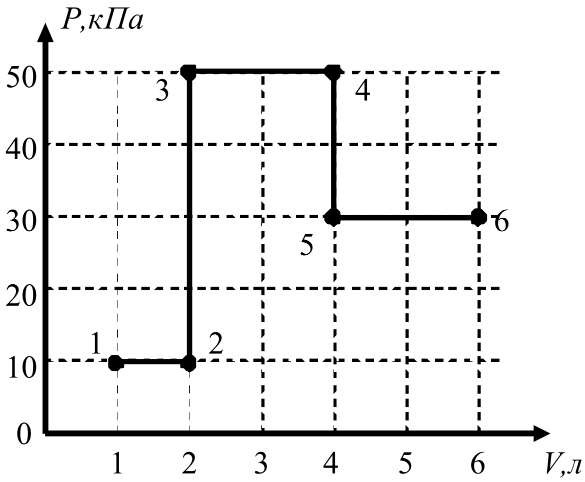
УПРАЖНЕНИЯ

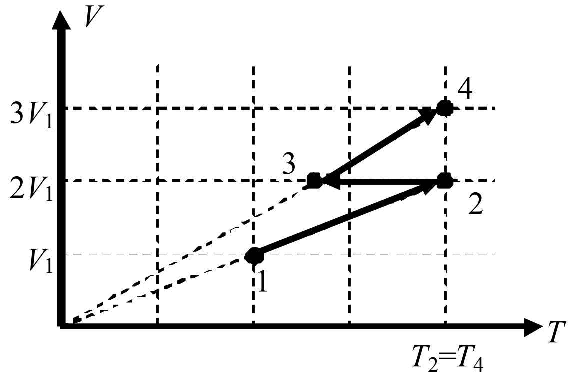
Упражнение 1. *Решите задачи.*

1. Азот массой 0,28 *кг* нагревается изобарно от температуры 290 *K* до температуры 490 *K*. Какую работу совершает газ при этом нагревании? Найдите изменение его внутренней энергии.

2. Кислород массой 50 *г* имеет температуру 320 *K*. В результате изохорного охлаждения давление уменьшилось в два раза, а затем после изобарного расширения температура газа в конечном состоянии стала равна первоначальной. Изобразите на диаграмме *P,V* эти процессы. Рассчитайте графически работу, совершаемую газом. Найдите результирующее изменение внутренней энергии газа.

3. Определите работу, совершаемую гелием при переходе из состояния 1 в состояние 6.





4. Два моля идеального газа сжимаются изотермически при температуре 300 *K* до половины начального объёма. Какая работа совершается газом? Изобразите процесс на диаграмме *P,V*. Покажите, чему равна работа газа.

5. Изменение состояния идеального газа изображено на диаграмме *V,T*. Начальное давление газа 10^5 *Па* и его объём 3 $м^3$. Изобразите изменение состояния газа на диаграмме *P,V*. Найдите работу, совершенную газом при переходе $1 – 2 – 3 – 4$.

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. Работа, совершаемая газом при расширении газа при изобарном процессе на ΔV, равна $A = P \cdot \Delta V$.
2. Элементарная работа, совершаемая газом при расширении на dV, равна $dA = P \cdot dV$.
3. *Работа, совершаемая газом в процессе его расширения (или сжатия) при любом термодинамическом процессе, численно равна площади под кривой, изображающей изменение состояния газа на диаграмме P,V.*
4. При изохорном процессе ($\Delta V = 0$) работа газом не совершается: $A = 0$.
5. При изотермическом расширении газа от объёма от V_1 до V_2 работа равна $A = \dfrac{m}{\mu} RT \cdot \ln \dfrac{V_2}{V_1}$.

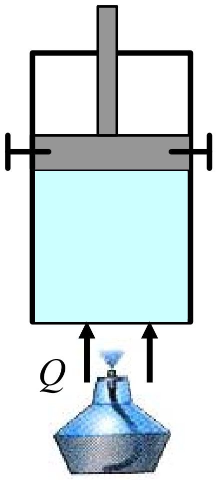
ТЕМА 7. **ТЕПЛОТА**

Новые слова и словосочетания

теплота	количество теплоты
теплообмен	теплопередача
теплоёмкость	удельная теплота
конвекция	излучение
горелка	

7.1. **Количество теплоты**

Изменить внутреннюю энергию газа (термодинамической системы) можно, не только совершая работу, но и нагревая газ.



Если закрепить поршень, то газ при нагревании не будет совершать работу. Но температура газа увеличивается, следовательно, и его внутренняя энергия возрастает. При нагревании увеличивается скорость теплового движения молекул и значит, увеличивается внутренняя энергия системы. Для нагревания газа его необходимо привести в контакт с телом, имеющим более высокую температуру (горелка). От горячего тела к холодному передаётся энергия без совершения работы. Такой способ передачи энергии называется **теплопередачей (теплообменом).**

Процесс передачи энергии от одного тела к другому без совершения работы называется теплообменом или теплопередачей.

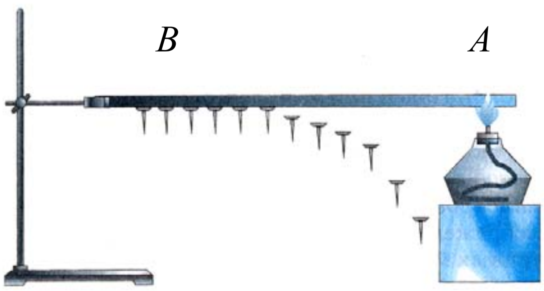
Количество энергии, переданной от одного тела к другому в процессе теплопередачи, называют количеством теплоты или теплотой.

При теплопередаче внутренняя энергия системы, которая получает теплоту, увеличивается на величину, равную количеству полученной теплоты. При этом внутренняя энергия тела, которое отдаёт теплоту, уменьшается на величину, равную количеству отданной теплоты.

Если U_0 – внутренняя энергия системы в начальном состоянии, а U_k – внутренняя энергия в конечном состоянии и система в процессе теплопередачи получила количество теплоты Q, то $U_0 + Q = U_k$. Если в процессе теплопередачи система отдаёт количество теплоты Q', то $U_0 - Q' = U_k$.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ!

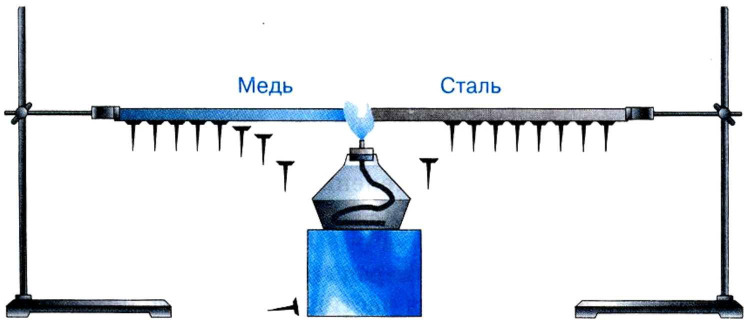
При теплопередаче теплота самопроизвольно всегда передаётся от **более нагретого тела к менее нагретому телу.**



При теплообмене не происходит превращения энергии из одной формы в другую, часть внутренней энергии горячего тела передается холодному телу.

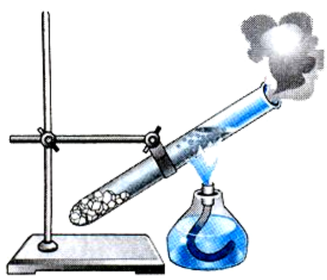
Существуют три вида теплопередачи: теплопроводность, конвекция и излучение.

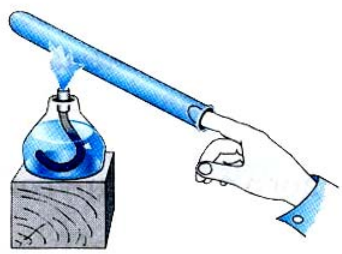
Теплопроводность – это передача тепла от одной части тела к другой. Если один конец твердого тела нагревать, то тепло передается от нагретого конца (от *A*) к холодному (к *B*). Каким образом происходит передача энергии? Сначала увеличиваются скорости колебательного движения молекул проволоки на конце *A*. Температура этого конца проволоки повышается. В результате взаимодействия молекул проволоки увеличивается скорость колебательного движения соседних молекул, то есть повышается температура соседнего участка проволоки. Затем увеличивается скорость колебаний следующих молекул и т. д.



Разные тела обладают различной теплопроводностью. Большую теплопроводность имеют металлы, особенно серебро и медь.

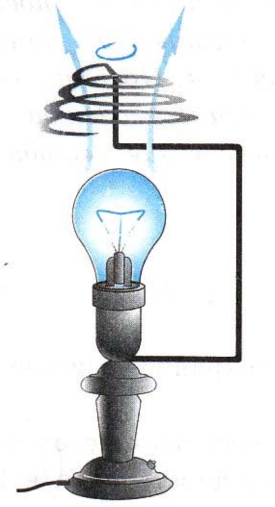
У жидкостей теплопроводность меньше, чем у металлов. У газов теплопроводность ещё меньше, чем у жидкостей.





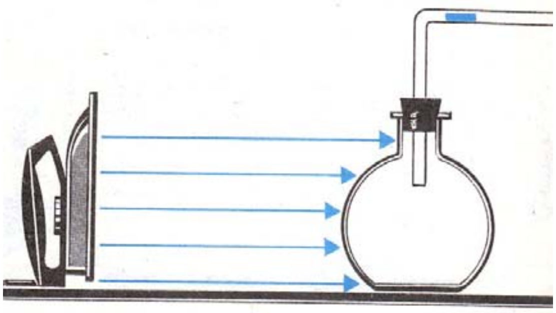
Самую малую теплопроводность имеет вакуум.

Конвекция – это передача тепла при движении слоев жидкости или газа. При конвекции энергия переносится самими слоями жидкости или газа.



На рисунке показаны примеры конвекции. Воздух над лампой нагревается, его плотность становится меньше, и он поднимается вверх. Холодные слои опускаются вниз. Затем прогревается следующий слой воздуха и т. д.

При нагревании жидкости слои, имеющие более высокую температуру, поднимаются вверх, а холодные опускаются вниз. Жидкость прогревается по всему объему.



Излучение – процесс передачи тепла всеми нагретыми телами окружающим телам. Излучение – это перенос энергии электромагнитными волнами. На рисунке представлена колба, закопчённая с одной стороны. На колбу попадает тепло от нагретого тела. Давление внутри колбы повышается.

Передача энергии излучением отличается от других видов теплопередачи тем, что она может осуществляться в вакууме. Излучением солнечная энергия передаётся на Землю.

7.2. Теплоёмкость

Мерой изменения внутренней энергии в процессе теплопередачи является количество теплоты. Переданное телу количество теплоты приводит к изменению температуры тела. Если работа внешних сил равна нулю ($A'=0$) и изменение внутренней энергии происходит только в результате теплопередачи, то $U_0+Q=U_k$, где U_0 –внутренняя энергия системы в начальном состоянии, а U_k – внутренняя энергия в конечном состоянии и система в процессе теплопередачи получила количество теплоты Q. Тогда $Q = U_k - U_0 = \Delta U$.

Изменение внутренней энергии тела (вещества) в результате теплопередачи ему количества теплоты можно определить следующим образом: $\Delta U = Q = c\ m\Delta T$, где ΔT – изменение температуры тела, m – масса тела, c – постоянная, называемая удельной теплоёмкостью вещества (при постоянном объёме). **Удельная теплоёмкость зависит от свойств вещества и его состояния.**

Удельной теплоёмкостью вещества называется физическая величина, равная количеству теплоты, которое нужно сообщить 1 кг вещества, чтобы повысить его температуру на 1 К (1 °С).

Удельная теплоёмкость некоторых веществ

Вещество	c (*Дж/кг·°С*)	Вещество	c (*Дж/кг·°С*)	Вещество	c (*Дж/кг·°С*)
Золото	130	Железо	460	Масло машинное	1670
Ртуть	140	Сталь	500	Масло подсолнечное	1700
Свинец	140	Чугун	540	Лёд	2100
Олово	230	Графит	750	Керосин	2100
Серебро	250	Стекло лабораторное	840	Эфир	2350
Медь	400	Кирпич	880	Дерево (дуб)	2400
Цинк	400	Алюминий	920	Спирт	2500
Латунь	400	Воздух	1000	Вода	4200

Если термодинамической системой является газ, то выражение $Q = U_k - U_0 = \Delta U$ **выполняется только при изохорном процессе (газ не совершает работы).** Тогда изменение внутренней энергии газа в результате теплопередачи ему количества теплоты можно определить следующим образом: $Q = c_V m\Delta T$, где ΔT – изменение температуры газа, m – масса газа, c_V – постоянная, называемая удельной теплоёмкостью при постоянном объёме. Удельная теплоёмкость зависит от свойств газа и его состояния.

Удельная теплоёмкость идеального газа при постоянном объёме. Внутренняя энергия идеального (одноатомного) газа равна сумме средних кинетических энергий теплового движения молекул и определяется по формуле: $U = \frac{3}{2}\frac{m}{\mu}RT$. Изменение внутреннеё энергии пропорционально изменению температуры, то есть $\Delta U = \frac{3}{2}\frac{m}{\mu}R\Delta T$. Так как $Q = \Delta U$, то $c_V m\Delta T = \frac{3}{2}\frac{m}{\mu}R\Delta T$; удельная теплоёмкость идеального газа при постоянном объёме равна $c_V = \frac{3}{2}\frac{R}{\mu}$. Если молекулы газа имеют число степеней свободы i, то $c_V = \frac{i}{2}\frac{R}{\mu}$.

Теплоёмкость одного моля вещества называется молярной теплоёмкостью. Молярной теплоёмкостью вещества называется физическая величина, равная количеству теплоты, которое нужно сообщить 1 молю вещества, чтобы повысить его температуру на 1 К (1 °С).

Молярная теплоёмкость идеального газа при постоянном объёме. Изменение внутренней энергии идеального (одноатомного) газа в результате теплопередачи ему количества теплоты при изохорном процессе можно определить следующим образом: $Q = C_V\frac{m}{\mu}\Delta T$, где ΔT – изменение температуры газа, m – масса газа, C_V – постоянная, называемая молярной теплоёмкостью при постоянном объёме. Так как $Q = \Delta U$, то $C_V\frac{m}{\mu}\Delta T = \frac{3}{2}\frac{m}{\mu}R\Delta T$; молярная теплоёмкость идеального газа при постоянном объёме равна $C_V = \frac{3}{2}R$. Если молекулы газа имеют число степеней свободы i, то $C_V = \frac{i}{2}R$.

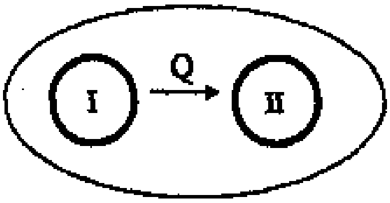
Молярная теплоёмкость связана с удельной теплоёмкостью следующим соотношением $C_V = c_V \cdot \mu$.

Молярная теплоёмкость газа при постоянном давлении. При нагревании газа при постоянном давлении требуется дополнительное количество теплоты на совершение работы расширения газа. Поэтому молярная теплоёмкость газа при постоянном давлении C_P всегда больше молярной теплоёмкости газа при постоянном объёме C_V. Молярная теплоёмкость газа при постоянном давлении равна $C_P = \frac{i+2}{2}R$. Уравнение Майера устанавливает связь между молярными теплоёмкостями при постоянном объёме и постоянном давлении: $C_P = C_V + R$.

7.3. Уравнение теплового баланса

Процесс передачи внутренней энергии без совершения работы – это теплообмен.

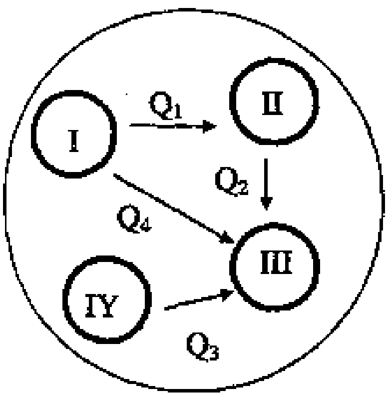
Термодинамическая система – это совокупность большого числа частиц или тел. **Термодинамическая система называется изолированной, если тела, входящие в систему не обмениваются энергией с телами, не входящими в систему и работа внешних сил равна нулю.** Если тела, находящиеся внутри системы не совершают механической работы, полная энергия системы остаётся постоянной.



Рассмотрим изолированную систему тел, в которой происходит теплообмен. В процессе теплообмена внутренняя энергия одних тел увеличивается, других – уменьшается. Мера этого изменения – количество теплоты, которое данные тела получили или отдали в процессе теплообмена.

В системе, которая состоит из двух тел, одно тело отдает количество теплоты $Q_1 = -Q$, а другое тело получает количество теплоты $Q_2 = +Q$. Количество теплоты, отданное одним телом, равно по модулю количеству теплоты, полученному другим телом. Тогда можно утверждать, что количество теплоты изолированной системы сохраняется: $Q_1 + Q_2 = 0$. *Количество теплоты, отданное одним телом, равно по модулю количеству теплоты, полученному другим телом.*

На рисунке представлены 4 тела, которые обмениваются теплотой в результате теплообмена. Обозначим Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 – количества теплоты, которые получают или отдают друг другу тела системы. Тогда $Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 0$.



Или $Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + ... + Q_n = 0$, если система состоит из n тел.

Если система состоит из нескольких тел, имеющих различную температуру, и между ними происходит теплообмен, то алгебраическая сумма количества теплоты, отданного телами $\sum_{i=1}^{n} Q_i^{отд}$ равно количеству теплоты, полученного телами $\sum_{k=1}^{n} Q_k^{пол}$. Тогда

$$\sum_{i=1}^{n} Q_i^{отд} + \sum_{k=1}^{n} Q_k^{пол} = 0 \text{ или } Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + ... + Q_n = 0$$

– уравнение теплового баланса.

Уравнение теплового баланса можно записать в другом виде. Обозначим алгебраическую сумму количества теплоты, отданного всеми телами системы $\sum_{i=1}^{n} Q_i^{отд} = Q_{отд}$, а алгебраическую сумму количества теплоты, полученного всеми телами системы

$$\sum_{k=1}^{n} Q_k^{пол} = Q_{пол}, \text{ тогда } Q_{отд} + Q_{пол} = 0 \text{ или } Q_{пол} = -Q_{отд}.$$

Так как $Q_{пол} > 0$, а $Q_{отд} < 0$, то $Q_{пол} = Q_{отд}$ – **уравнение теплового баланса или закон сохранения энергии изолированной системы**.

Уравнение теплового баланса используют для нахождения теплоёмкости некоторого вещества или температуры, установившейся в системе после теплообмена.

Пример. В латунный калориметр массой 0,15 *кг*, содержащий 20 *кг* воды при 15° *C*, опустили железную гирю массой 0,26 *кг* при температуре 100° *C*. Найти установившуюся общую температуру θ. Потери тепла не учитывать. Удельная теплоемкость железа $C_г = 460$ *Дж/кг К*. Удельная теплоемкость воды $C_в = 4187$ *Дж/кг К*. Удельная теплоемкость калориметра $C_к = 380$ *Дж/кг К*.

Решение. Составим уравнение теплового баланса. Количество теплоты, отданное гирей

$$Q_г = C_г m_г (T - \theta).$$

Количество теплоты, полученное водой $Q_в = C_в m_в (\theta - T_1)$.

Количество теплоты, полученное калориметром $Q_к = C_к m_к (\theta - T_1)$

На основании закона сохранения энергии $Q_г = Q_в + Q_к$ или

$$C_г m_г (T - \theta) = (C_в m_в + C_к m_к)(\theta - T_1)$$

Находим из уравнения теплового баланса окончательную температуру

$$\theta = \frac{C_г m_г T + (C_в m_в + C_k m_k) T_1}{C_г m_г + C_в m_в + C_k m_k}.$$

Подставляя числовые значения величин, получаем $\theta = 289$ К.

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Решите задачи.*

1. Давление азота, находящегося в сосуде объёмом 3 л, после нагревания возросло на $2{,}2 \cdot 10^5$ Па. Определить количество теплоты, сообщённое газу, если удельная теплоёмкость c_V = 745 Дж/кг·К.

2. Определить количество теплоты, сообщённое 5 кг азота при повышении его температуры на 150 К при $V = const$. Чему равна работа, совершенная газом и изменение его внутренней энергии, если c_V = 745 Дж/кг·К?

3. Какое количество теплоты сообщено водороду, если он при изотермическом расширении совершил работу 4190 Дж?

4. Вычислить конечные температуру и давление одноатомного газа, находящегося в баллоне объёмом 1,5 м^3 при температуре 300 К и давлении $1{,}8 \cdot 10^5$ Па, если этому газу сообщено количество теплоты равное $5{,}4 \cdot 10^4$ Дж.

5. Алюминиевый сосуд массой 0,5 кг содержит 0,1 кг воды при температуре 20° С. В него опускают кусок железа массой 0,2 кг, нагретый до 75° С. Определить установившуюся температуру.

6. Нагретое стальное тело массой 150 г опустили в алюминиевый сосуд массой 100 г, содержащий 600 г машинного масла при температуре 15° С, после чего температура масла повысилась до 48° С. Определить начальную температуру стального тела.

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. Процесс передачи энергии от одного тела к другому без совершения работы называется **теплообменом или теплопередачей.**

2. Количество энергии, переданной от одного тела к другому в процессе теплопередачи, называют **количеством теплоты или теплотой.**
3. Если U_0 –внутренняя энергия системы в начальном состоянии, а U_k – внутренняя энергия в конечном состоянии и система в процессе теплопередачи получила количество теплоты Q, то $U_0 + Q = U_k$. Если в процессе теплопередачи система отдаёт количество теплоты Q', то $U_0 - Q' = U_k$.
4. Существуют три вида теплопередачи: теплопроводность, конвекция и излучение.

   Теплопроводность – это передача тепла от одной части тела к другой. **Конвекция** – это передача тепла при движении слоев жидкости или газа. **Излучение** – процесс передачи тепла всеми нагретыми телами окружающим телам. **Излучение** – это перенос энергии электромагнитными волнами.
5. Количество теплоты Q, полученное или отданное телом массой m в процессе теплопередачи, можно определить по формуле: $Q = c\ m\Delta T$.
6. *Удельной теплоёмкостью вещества называется физическая величина, равная количеству теплоты, которое нужно сообщить 1 кг вещества, чтобы повысить его температуру на 1 К (1 °С).*
7. *Теплоёмкость одного моля вещества называется молярной теплоёмкостью. Молярной теплоёмкостью вещества называется физическая величина, равная количеству теплоты, которое нужно сообщить 1 молю вещества, чтобы повысить его температуру на 1 К (1 °С).*
8. Термодинамическая система называется **изолированной**, если тела, входящие в систему не обмениваются энергией с телами, не входящими в систему и работа внешних сил равна нулю.
9. $\sum_{i=1}^{n} Q_i^{отд} + \sum_{k=1}^{n} Q_k^{пол} = 0$ или $Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + ... + Q_n = 0$

   – уравнение теплового баланса. Или $Q_{пол} = Q_{отд}$ – **уравнение теплового баланса или закон сохранения энергии изолированной системы**.

7.4. **Изменение агрегатного состояния**

Новые слова и словосочетания

агрегатное состояние	удельная теплота
плавление	кристаллизация
испарение	кипение
парообразование	конденсация
сублимация	возгонка
горение	

Одной из основных величин, используемых в термодинамике, является ***внутренняя энергия системы (тела).***

Частицы, из которых состоит система, непрерывно хаотически движутся и взаимодействуют друг с другом. Следовательно, эта система обладает энергией, которая зависит от термодинамических параметров: давления, объёма и температуры. Кроме того, частицы системы могут взаимодействовать с внешними телами, не входящими в данную систему.

Внутренняя энергия системы (тела) в термодинамике обусловлена движением и взаимодействием молекул, из которых состоят эти тела.

Таким образом, внутренняя энергия – сумма кинетической энергии хаотического теплового движения частиц (атомов, молекул) тела (системы) и потенциальной энергии их взаимодействия $U = \sum_N \overline{E}_k + \sum_N \overline{E}_{i\,пот}$, где $\sum_N \overline{E}_k = \overline{E_k}$ – сумма всех кинетических энергий молекул тела, а $\sum_N \overline{E}_{i\,пот} = \overline{E_{пот}}$ – сумма потенциальных энергий взаимодействия всех молекул.

В зависимости от условий одно и то же вещество может находиться в твердом, жидком или газообразном состоянии. Эти состояния называют **агрегатными состояниями.** Например, лёд, вода и водяной пар.

Строение молекулы вещества не зависит от того, в каком состоянии оно находится. В жидком, твердом и газообразном состоянии молекулы вещества движутся по-разному, и, кроме того, в различных агрегатных состояниях различно и взаимодействие молекул друг с другом. Следовательно, между внутренней энергией термодинамической системы, содержащей неизменное количество молекул вещества, и агрегатным состоянием этого вещества существует взаимосвязь.

Выясним условия, при которых возможен переход вещества из одного агрегатного состояния в другое.

В газах при атмосферном давлении расстояния между молекулами много больше размера самих молекул, поэтому притяжение молекул газа мало. Средняя кинетическая энергия молекул вполне достаточна, чтобы совершить работу по преодолению сил молекулярного притяжения. Поэтому, если газу не мешают стенки сосуда, его молекулы разлетаются. У идеального газа потенциальная энергия взаимодействия частиц много меньше средней кинетической энергии молекул: $\left|\overline{E_{пот}}\right| << \frac{3}{2}kT$. Знак модуля использован потому, что для сил притяжения потенциальная энергия отрицательна.

В жидкостях, плотность которых во много раз больше плотности газа, молекулы расположены ближе друг к другу. Средняя кинетическая энергия их уже недостаточна для того, чтобы совершить работу по преодолению сил молекулярного притяжения. Поэтому молекулы в жидкостях не могут удаляться друг от друга. В жидкостях средняя потенциальная энергия притяжения молекул должна быть соизмерима с кинетической энергией: $\left|\overline{E_{пот}}\right| \geq \frac{3}{2}kT$.

Твердыми телами в физике называют тела, которые имеют кристаллическое строение. В них молекулы расположены упорядоченно взаимодействуя с ближайшими соседями, поэтому потенциальная энергия притяжения молекул больше их кинетической энергии теплового движения: $\left|\overline{E_{пот}}\right| >> \frac{3}{2}kT$.

Таким образом, *чтобы перевести молекулы из упорядоченного состояния (твердое состояние) в беспорядочное (газообразное состояние), нужно совершить работу (сообщить теплоту) по преодолению сил молекулярного притяжения. При этом изменяется внутренняя энергия вещества.*

Молекулярно-кинетическая теория позволяет не только понять, почему вещество может находиться в газообразном, жидком и твердом состояниях, но и объяснить процесс перехода вещества из одного состояния в другое.

При переходе вещества из твердого состояния в жидкое, а затем в газообразное внутренняя энергия увеличивается, даже если температура вещества не изменяется. При обратном переходе вещества из газообразного состояния в жидкое, а из жидкого в твердое выделяется *определённое количество энергии, вследствие чего внутренняя энергия уменьшается.*

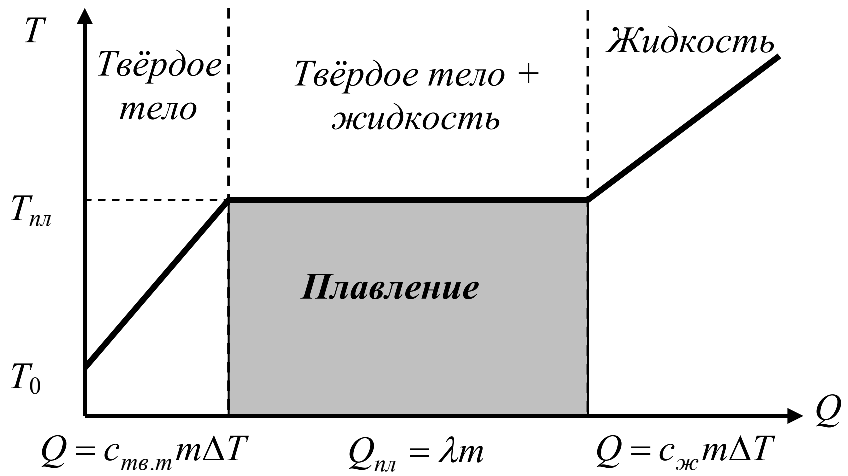
Переход вещества из одного агрегатного состояния в другое называется фазовым переходом.

Плавление и кристаллизация (отвердевание) твердых тел

<u>Плавление</u> – фазовый переход вещества из твердого состояния в жидкое. <u>Отвердевание (кристаллизация)</u> – фазовый переход из жидкого состояния в твердое.

Все твёрдые тела можно разделить на кристаллические и аморфные. У кристаллических тел молекулы и атомы. из которых они состоят, расположены упорядоченно, образуя группы – кристаллы. У аморфных тел порядка в расположении молекул и атомов нет. Процессы плавления и отвердевания у кристаллических и аморфных веществ протекают различно.

Плавление и отвердевание кристаллических тел можно объяснить на основании молекулярно-кинетической теории строения вещества.



В кристаллах молекулы (или атомы) расположены в строгом порядке. Этим объясняется, что все кристаллы одного и того же вещества имеют определённую форму. Атомы и молекулы в кристаллах находятся в движении – они колеблются относительно положения равновесия. При нагревании твердого тела возрастает кинетическая энергия колеблющихся молекул и соответственно амплитуда их колебаний, при этом силы, связывающие молекулы, уменьшаются. Количество теплоты Q, полученное твердым телом массой m в процессе нагревания пропорционально изменению его температуры и равно $Q = c_{тв.т} m \Delta T$.

Когда твердое тело нагреется до температуры плавления, размах колебаний молекул настолько увеличится, что нарушится порядок в расположении молекул в кристаллах. Кристаллы теряют свою форму: вещество плавится, переходя из твердого состояния в жидкое. **Температура, при которой вещество плавится, называют температурой плавления вещества.** Температура плавления для различных веществ различная.

Аморфные вещества – это твердые тела, у которых отсутствует кристаллическая структура. К аморфным веществам относятся смолы, пластмассы, стекло, каучук, канифоль и другие. Аморфные тела не имеют точки плавления. Процесс плавления происходит постепенно и плавно. Получая энергию от нагревателя, аморфное вещество становится постепенно всё мягче и мягче, пока совсем не превратится в жидкость. Удельная теплоёмкость аморфных веществ зависит от температуры.

На рисунке качественно представлен график перехода вещества из твердого состояния в жидкое.

Температура плавления некоторых веществ

Вещество	$t_{пл}$, °C	Вещество	$t_{пл}$, °C	Вещество	$t_{пл}$, °C
Водород	– 259	Натрий	98	Медь	1085
Кислород	– 219	Олово	232	Чугун	1200
Азот	– 210	Свинец	327	Сталь	1500
Спирт	– 114	Янтарь	360	Железо	1539
Ртуть	– 39	Цинк	420	Платина	1772
Лёд	0	Алюминий	660	Осмий	3045
Цезий	29	Серебро	962	Вольфрам	3387
Калий	63	Золото	1064		
Парафин	80				

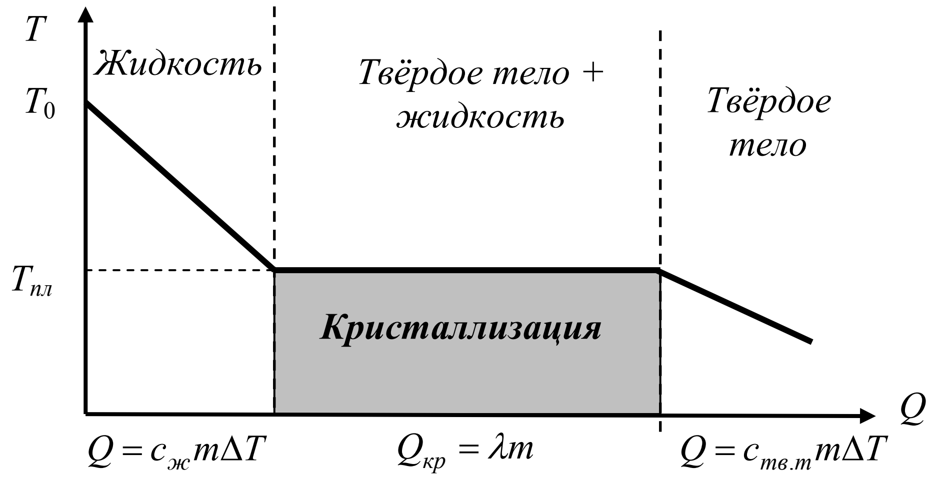
При плавлении кристаллическая решетка разрушается. Из-за упорядоченного взаимного расположения молекулы в твердом теле связаны между собой примерно одинаковыми силами, поэтому разрушение связей происходит практически одновременно. **Подводимое извне тепло идёт на разрушение кристаллической решетки, то есть на увеличение потенциальной энергии молекул**. Средняя кинетическая энергия молекул при плавлении не меняется.

При температуре плавления внутренняя энергия вещества в жидком состоянии больше внутренней энергии такой же массы вещества в твердом состоянии: $U_{тв.т} + Q_{пл} = U_{ж}$. *Например, внутренняя энергия 1 кг воды при температуре* $0°C$ *на* $3{,}4 \cdot 10^5$ *Дж больше внутренней энергии льда массой 1 кг при той же температуре.*

Чем больше масса тела, тем большее количество теплоты $Q_{пл}$ потребуется, чтобы его расплавить: $Q_{пл} = \lambda \cdot m$, где λ – удельная теплота плавления.

Удельная теплота плавления – количество теплоты, необходимое для плавления 1кг вещества при температуре плавления.

Кристаллизация (отвердевание) – фазовый переход вещества из жидкого состояния в кристаллическое (твердое). Кристаллизация возникает **при охлаждении жидкости.** При охлаждении жидкости уменьшается кинетическая энергия молекул и увеличивается потенциальная энергия взаимодействия. При кристаллизации жидкости происходит скачкообразный переход от неупорядоченного расположения молекул к упорядоченному.



Кристаллизация (отвердевание) происходит при той же температуре, что и плавление. *При температуре плавления внутренняя энергия вещества в жидком состоянии больше внутренней энергии такой же массы вещества в твердом состоянии:* $U_{ж} - Q_{кр} = U_{тв.т}$. При кристаллизации жидкости массой m выделяется такое же количество теплоты, сколько её было затрачено на плавление: $Q_{кр} = Q_{пл} = \lambda \cdot m$, где λ – удельная теплота кристаллизации. На рисунке качественно представлен график перехода вещества из жидкого состояния в твердое (кристаллическое) состояние.

Так как аморфные тела не имеют точки плавления, то процесс отвердевания происходит постепенно. При охлаждении жидкое аморфное вещество становится постепенно более вязким, пока совсем не затвердеет. При этом процессе выделяется столько же тепловой энергии, сколько её потребовалось на плавление.

Удельная теплота плавления некоторых веществ

Вещество	λ, *Дж/кг*	Вещество	λ, *Дж/кг*
Алюминий	$3{,}9 \cdot 10^5$	Сталь	$0{,}84 \cdot 10^5$
Лёд	$3{,}4 \cdot 10^5$	Золото	$0{,}67 \cdot 10^5$
Железо	$2{,}7 \cdot 10^5$	Водород	$0{,}59 \cdot 10^5$
Медь	$2{,}1 \cdot 10^5$	Олово	$0{,}59 \cdot 10^5$
Парафин	$1{,}5 \cdot 10^5$	Свинец	$0{,}25 \cdot 10^5$
Спирт	$1{,}1 \cdot 10^5$	Кислород	$0{,}14 \cdot 10^5$
Серебро	$0{,}87 \cdot 10^5$	Ртуть	$0{,}12 \cdot 10^5$

Парообразование и конденсация

Парообразование – фазовый переход вещества из жидкого состояния в газообразное. Парообразование имеет две разновидности: испарение и кипение.

Испарение – это переход вещества из жидкого (или твердого) состояния в газообразное, происходящее с поверхности жидкости (или твердого тела).

Испарение и кипение можно объяснить на основании молекулярно-кинетической теории строения вещества.

Парообразование (испарение, кипение). Молекулы жидкости движутся беспорядочно. Чем выше температура жидкости, тем больше кинетическая энергия молекул. Среднее значение кинетической энергии молекул при данной температуре имеет определённое значение. У каждой молекулы кинетическая энергия в данный момент времени может больше или меньше средней кинетической энергии. Если какая-нибудь достаточно «быстрая» молекула окажется у поверхности жидкости, то она может преодолеть притяжение соседних молекул и вылететь из жидкости. Вылетевшие молекулы образуют над жидкостью пар. *Испарение происходит при любой температуре*, так как в жидкости всегда имеется некоторое количество «быстрых» молекул. Чем выше температура жидкости, тем больше число быстро движущихся молекул, способных вылететь с поверхности жидкости, поэтому испарение происходит тем быстрее, чем выше температура жидкости.

Если испарение происходит в закрытом сосуде, то очень скоро число молекул, вылетевших в единицу времени с единицы поверхности жидкости, становится равным числу молекул вернувшихся обратно в жидкость. Устанавливается *динамическое (или подвижное) равновесие* между процессами испарения и конденсации. *Вещество в газообразном состоянии, находящееся в динамическом равновесии с жидкостью, называется насыщенным паром*. Давление насыщенного пара зависит только от его химического состава и температуры.

Наблюдения и опыты показывают, что испаряются и твердые тела. **Явление превращения твердого тела в пар называется сублимацией (или возгонкой).**

Процесс парообразования, происходящий не только с поверхности жидкости, но и внутри неё по всему объёму, называется кипением.

Кипение происходит при температуре, при которой давление насыщенных паров равно внешнему давлению на поверхность жидкости и равно давлению внутри жидкости. Температура кипения разных жидкостей различна и зависит от внешнего давления, при увеличении внешнего давления температура кипения повышается.

Температура, при которой происходит кипение при нормальном атмосферном давлении, называется температурой кипения.

Одновременно с переходом молекул из жидкости в пар происходит и обратный процесс. Беспорядочно двигаясь над поверхностью жидкости, часть молекул, покинувших жидкость, снова в неё возвращается. **Переход вещества из газообразного состояния в жидкое называется конденсацией.**

Конденсация – это фазовый переход вещества из газообразного состояния в жидкое (или твердое).

Поглощение энергии при испарении жидкости и выделение её при конденсации пара

При вылете из жидкости (или твердого тела) молекулы преодолевают силы притяжения со стороны оставшихся молекул, то есть совершают работу против этих сил. При испарении жидкость покидают наиболее быстрые молекулы, поэтому средняя кинетическая энергия оставшихся в жидкости молекул уменьшается. Это означает, что внутренняя энергия испаряющейся жидкости уменьшается. Таким образом, если испаряющаяся жидкость не получает тепло извне, то жидкость охлаждается. Чтобы испарение жидкости происходило без изменения температуры жидкости, ей необходимо сообщать энергию.

Таким образом, для превращения жидкости в пар путём испарения при постоянной температуре требуется сообщить жидкости теплоту. Энергия, сообщенная жидкости, идёт на увеличение средней кинетической энергии молекул и на увеличение средней потенциальной энергии взаимодействия молекул.

Если жидкость нагрели до температуры кипения, то происходит интенсивный процесс парообразования не только с поверхности жидкости, но и по всему объёму. При температуре кипения энергия нагревателя идёт на переход молекул жидкости в пар и работу против внешнего давления. При этом увеличивается средняя потенциальная энергия молекул (средняя кинетическая энергия движения молекул не меняется, так как температура пара и жидкости одинаковая). *При температуре кипения внутренняя энергия вещества в жидком состоянии меньше внутренней энергии такой же массы вещества в газообразном состоянии:* $U_{ж} + Q_{кип} = U_{газ}$.

Количество теплоты, требующееся для превращения данной массы жидкости при температуре кипения в пар той же температуры, называется теплотой парообразования этой жидкости.

Величина, численно равная количеству теплоты, необходимому для превращения 1 *кг* вещества из жидкого состояния в газообразное при неизменной температуре (температуре кипения) и давлении, называется удельной теплотой парообразования вещества.

Чем больше масса жидкости, тем большее количество теплоты $Q_{кип}$ потребуется, чтобы её превратить в пар при температуре кипения: $Q_{кип} = r \cdot m$, где r – удельная теплота парообразования.

Процесс конденсации – это переход вещества из парообразного состояния в жидкое или твердое. Этот процесс может происходить при охлаждении пара или его сжатии.

При охлаждении пара уменьшается кинетическая энергия молекул и увеличивается потенциальная энергия взаимодействия. При конденсации пара происходит скачкообразный переход от неупорядоченного расположения молекул к упорядоченному. Конденсация происходит при той же температуре, что и кипение. При конденсации выделяется часть внутренней энергии, которая была затрачена на образование пара. *При температуре кипения внутренняя энергия вещества в газообразном состоянии больше внутренней энергии такой же массы вещества в жидком состоянии:* $U_{газ} - Q_{конд} = U_{ж}$; $U_{ж} + Q_{кип} = U_{газ}$. При конденсации пара массой m выделяется количество теплоты: $Q_{конд} = Q_{кип} = r \cdot m$, где r – удельная теплота парообразования.

Температура кипения и удельная теплота парообразования некоторых веществ (при температуре кипения и нормальном атмосферном давлении)

Вещество	$t_{кип}$, °C	r, Дж/кг	Вещество	$t_{кип}$, °C	r, Дж/кг
Железо	2872	$6{,}3\cdot10^6$	Серебро	2167	$2{,}3\cdot10^6$
Магний	1107	$5{,}4\cdot10^6$	Ацетон	56	$0{,}5\cdot10^6$
Медь	2543	$5{,}4\cdot10^6$	Бензол	80	$0{,}4\cdot10^6$
Натрий	886	$4{,}2\cdot10^6$	Вода	100	$2{,}3\cdot10^6$
Ртуть	357	$0{,}3\cdot10^6$			

Энергия топлива. Удельная теплота сгорания топлива

Известно, что молекулы вещества состоят из атомов. Молекула воды состоит из одного атома кислорода и двух атомов водорода. Молекулу можно разделить на атомы. Такое деление молекулы называют химической реакцией. Для разделения молекулы на атомы нужно совершить работу против сил притяжения атомов в молекуле, а значит, затратить энергию, следовательно, химическая реакция разделения молекулы на атомы сопровождается затратой энергии (поглощением теплоты).

Если в результате химической реакции новая молекула образуется в результате объединения нескольких атомов, то энергия при этом выделяется. Действительно при сближении атомов силы взаимного притяжения атомов совершают положительную работу. Если термодинамическая система при этом не совершает работу против внешних сил, то такая реакция сопровождается увеличением температуры системы или передачей тепла окружающим систему телам.

Химические реакции, при которых термодинамическая система поглощает теплоту, называют эндотермическими.

Химические реакции, при которых термодинамическая система выделяет теплоту, называют экзотермическими.

Примером экзотермической реакции является реакция горения. Вещество, при горении которого выделятся теплота, называется *топливом* (уголь, нефть, бензин, дрова и др.).

Горение топлива – экзотермическая реакция (сопровождается выделением тепла). При горении топлива атомы углерода соединяются с атомами кислорода, который содержится в воздухе. Каждый атом углерода соединяется с двумя атомами кислорода. Образовавшаяся при этом молекула – это молекула оксида углерода (углекислого газа). При её образовании выделяется энергия.

Количество теплоты, выделяющееся при сгорании разных видов топлива одной и той же массы различно. **Физическая величина, показывающая, какое количество теплоты выделится при полном сгорании топлива массой *1 кг*, *называется удельной теплотой сгорания топлива.***

При сгорании топлива массой m выделится количество теплоты: $Q = q \cdot m$, где q – удельная теплота сгорания топлива.

Удельная теплота сгорания некоторых видов топлива

Топливо	*q, Дж/кг*	Топливо	*q, Дж/кг*
Порох	$0{,}36 \cdot 10^7$	Древесный уголь	$3{,}4 \cdot 10^7$
Дрова сухие	$1{,}0 \cdot 10^7$	Природный газ	$4{,}4 \cdot 10^7$
Торф	$1{,}4 \cdot 10^7$	Нефть	$4{,}4 \cdot 10^7$
Каменный уголь	$2{,}7 \cdot 10^7$	Бензин	$4{,}6 \cdot 10^7$
Спирт	$2{,}7 \cdot 10^7$	Керосин	$4{,}6 \cdot 10^7$
Антрацит	$3{,}0 \cdot 10^7$	Водород	$12{,}0 \cdot 10^7$

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Решите задачи.*

1. В сосуд, содержащий 2,35 кг воды при 20°С, вливают олово, нагретое до 232°С. При этом температура воды в сосуде увеличилась на 15 °С. Температура плавления олова 232°С. Вычислить массу олова.

2. В стальной калориметр массой 300 г. содержащий 1,5 л воды при температуре 27°С, бросают 400 г мокрого снега (мокрый снег – смесь воды и льда). В результате в калориметре установилась температура 17°С. Определить, сколько льда было в мокром снеге.

3. В сосуде находится 1 л воды и 1 кг льда при 0 °С. Какое количество водяного пара при 100 °С нужно впустить в воду для того, чтобы весь лёд расплавить и получить воду, нагретую до 20 °С. Теплоёмкость сосуда 200 Дж/К.

4. Сколько нужно израсходовать газа, чтобы полностью выпарить 2 л воды, взятой при температуре 15 °С, если теплоёмкость сосуда, в котором находится вода 500 Дж/К. Коэффициент полезного действия газовой горелки 50%.

5. На сколько километров пути хватит 30 л бензина автомобилю, движущемуся со скоростью 54 км/час? Мощность, развиваемая двигателем автомобиля, равна 35 кВт, а коэффициент полезного действия равен 25%.

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. В зависимости от условий одно и то же вещество может находиться в твердом, жидком или газообразном состоянии. Эти состояния называют **агрегатными состояниями.** В жидком, твердом и газообразном состоянии молекулы вещества движутся по-разному, и, кроме того, в различных агрегатных состояниях различно и взаимодействие молекул друг с другом.
2. Переход вещества из одного агрегатного состояния в другое называется **фазовым переходом.**
3. **Плавление** – фазовый переход вещества из твердого состояния в жидкое. **Отвердевание (кристаллизация)** – фазовый переход из жидкого состояния в твердое.
4. Температура, при которой вещество плавится, называют **температурой плавления вещества.**
5. При температуре плавления внутренняя энергия вещества в жидком состоянии больше внутренней энергии такой же массы вещества в твердом состоянии: $U_{тв.т} + Q_{пл} = U_{ж}$. Чем больше масса тела, тем большее количество теплоты $Q_{пл}$ потребуется, чтобы его расплавить: $Q_{пл} = \lambda \cdot m$, где λ – удельная теплота плавления.

   Удельная теплота плавления – количество теплоты, необходимое для плавления 1кг вещества при температуре плавления.

6. Кристаллизация (отвердевание) происходит при той же температуре, что и плавление. *При температуре плавления внутренняя энергия вещества в жидком состоянии больше внутренней энергии такой же массы вещества в твердом состоянии:* $U_{ж} - Q_{кр} = U_{тв.т}$. При кристаллизации жидкости массой m выделяется количество теплоты: $Q_{кр} = Q_{пл} = \lambda \cdot m$, где λ – удельная теплота кристаллизации.
7. **Парообразование –** фазовый переход вещества из жидкого состояния в газообразное. Парообразование имеет две разновидности: испарение и кипение.

   Испарение – это переход вещества из жидкого (или твердого) состояния в газообразное, происходящее с поверхности жидкости (или твердого тела). Процесс парообразования, происходящий не только с поверхности жидкости, но и внутри неё по всему объёму, называется **кипением.**
8. Температура, при которой происходит кипение при нормальном атмосферном давлении, называется **температурой кипения.**
9. *При температуре кипения внутренняя энергия вещества в жидком состоянии меньше внутренней энергии такой же массы вещества в газообразном состоянии:* $U_{ж} + Q_{кип} = U_{газ}$.
10. Количество теплоты, требующееся для превращения данной массы жидкости при температуре кипения в пар той же температуры, называется **теплотой парообразования этой жидкости.**

    Величина, численно равная количеству теплоты, необходимому для превращения 1 *кг* вещества из жидкого состояния в газообразное при неизменной температуре (температуре кипения) и давлении, называется **удельной теплотой парообразования вещества.**

    Чем больше масса жидкости, тем большее количество теплоты $Q_{кип}$ потребуется, чтобы её превратить в пар при температуре кипения: $Q_{кип} = r \cdot m$, где r – удельная теплота парообразования.
11. Физическая величина, показывающая, какое количество теплоты выделится при полном сгорании топлива массой *1 кг, называется* ***удельной теплотой сгорания топлива.*** При сгорании топлива массой m выделится количество теплоты: $Q = q \cdot m$, где q – удельная теплота сгорания топлива.

ТЕМА 8. **ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ**

Новые слова и словосочетания

первое начало	первый закон
однозначный	реальный
эквивалент	эквивалентность
вечный	тепловая машина
потреблять	потребление
адиабатный	адиабата

Первое начало термодинамики

Теория тепловых процессов, в которых не учитывается молекулярное строение тел, называется термодинамикой. Главное содержание термодинамики состоит в двух основных её законах, определяющих законы сохранения и превращения энергии и устанавливающих направленность процессов.

Внутренняя энергия термодинамической системы – это энергия теплового (хаотического) движения и взаимодействия микрочастиц системы (атомов и молекул).

Внутренняя энергия – однозначная функция состояния системы. В каждом состоянии система обладает определённой внутренней энергией. Изменение внутренней энергии определяется разностью значений внутренней энергии в конечном и начальном состояниях и не зависит от способа перехода.

Пример 1. Внутренняя энергия **идеального одноатомного** газа равна **суммарной кинетической энергии всех молекул**.

Пусть газ содержит N молекул, каждая молекула обладает средней кинетической энергией $\overline{E}_k = \frac{m_0\overline{\upsilon}^2}{2} = \frac{3}{2}kT$, число молекул N равно $\frac{m}{\mu} \cdot N_A = N$, где m масса газа, μ – молярная масса. Тогда внутренняя энергия идеального газа равна: $U = \frac{3}{2}\frac{m}{\mu}RT$.

Внутренняя энергия идеального одноатомного газа прямо пропорциональна его абсолютной температуре. Она не зависит от объёма и других макроскопических параметров системы.

Изменение внутренней энергии идеального газа равно $\Delta U = \frac{3}{2}\frac{m}{\mu}R\Delta T = \frac{3}{2}\frac{m}{\mu}R(T_2 - T_1)$, то есть определяется температурами начального и конечного состояниями газа и не зависит от процесса.

Молекулы газа, состоящие из нескольких атомов, могут ещё и вращаться. Поэтому кроме кинетической энергии поступательного движения молекулы обладают и кинетической энергией вращательного движения. Если идеальный газ состоит из более сложных молекул, чем одноатомный, то внутренняя энергия газа равна $U = \frac{i}{2}\frac{m}{\mu}RT$, где i – число степеней свободы.

Внутренняя энергия газа также пропорциональна его температуре, но коэффициент пропорциональности другой.

Пример 2. У реальных газов, жидкостей и твердых тел средняя потенциальная энергия взаимодействия молекул не равна нулю. Для газов она много меньше средней кинетической энергии поступательного движения молекул. Для жидкостей и твердых тел средняя потенциальная энергия взаимодействия молекул сравнима со средней кинетической энергией поступательного движения. Средняя потенциальная энергия взаимодействия молекул зависит от объёма вещества, так как при изменении объёма изменяется расстояние между молекулами. Поэтому **внутренняя энергия реальных газов, жидкостей и твердых тел зависит от объёма**. Таким образом, **температура и объём – макроскопические параметры системы, однозначно определяющие состояние системы и внутренней энергии.**

Внутренняя энергия U термодинамической системы однозначно определяется параметрами, характеризующими состояние системы: температурой и объёмом. *Внутренняя энергия – это энергетическая характеристика состояния системы.*

Изменить внутреннюю энергию системы можно двумя способами:

1) совершить над системой механическую работу (или система совершает работу),
2) передать системе определённое количество теплоты (или система отдаёт определённое количество теплоты).

Эти два процесса могут проходить одновременно. Если U_0 – внутренняя энергия системы в начальном состоянии, U_k – внутренняя энергия в конечном состоянии, над **системой совершена работа *A′* внешними силами и системе передано количество теплоты *Q*:** то $U_0 + A' + Q = U_k$. **Изменение внутренней энергии системы равно:** $U_k - U_0 = A' + Q$**.** ***Изменение внутренней энергии системы при пере-***

ходе её из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил и количества теплоты, переданного системе: $\Delta U = A' + Q$**.**

Если работу совершает сама система ($A' = -A$), то $U_0 - A + Q = U_k$. Изменение внутренней энергии системы равно: $U_k - U_0 = -A + Q$ или $\Delta U = -A + Q$. *Обратите внимание! работа считается положительной, если система сама совершает работу против внешних сил.*

Таким образом, изменение внутренней энергии системы при переходе её из одного состояния в другое равно разности теплоты, подведённой к системе и работы, совершённой системой против внешних сил $\Delta U = Q - A$ ***или*** $Q = \Delta U + A$ **–** ***количество теплоты, переданное системе, идёт на изменение её внутренней энергии и на совершение системой работы против внешних сил.***

Уравнение $Q = \Delta U + A$ ***называют первым законом термодинамики (первое начало термодинамики).***

Первое начало (первый закон) термодинамики – это закон сохранения энергии, распространённый на тепловые явления и процессы.

Применение первого начала термодинамики к различным процессам

1. **Внутренняя энергия изолированной системы.** Если система является изолированной, то работа внешних сил равна нулю. Система не совершает работу против внешних сил ($A = 0$) и система не обменивается теплотой с окружающими телами ($Q = 0$). В этом случае согласно первому закону термодинамики $\Delta U = U_k - U_0 = 0$ или $U_k = U_0$**.** *Внутренняя энергия изолированной системы остаётся постоянной (сохраняется).*

2. **Эквивалентность теплоты и работы.** Из первого закона термодинамики следует, что изменение внутренней энергии термодинамической системы возможно как в процессе совершения работы, так и в результате теплопередачи. Работа и количество теплоты являются мерой изменения внутренней энергии термодинамической системы при различных процессах. Очевидно, что изменить внутреннюю энергию системы на одинаковую величину можно либо в процессе теплообмена $U_0 + Q = U_k$, тогда $\Delta U = U_k - U_0 = Q$ **(система не совершает работу)**, либо в результате совершения системой (над системой) работы $U_0 - A = U_k$, тогда $\Delta U = U_k - U_0 = -A$ **(системе не получает теплоту в результате теплообмена).** *В этом заключается принцип эквивалентно-*

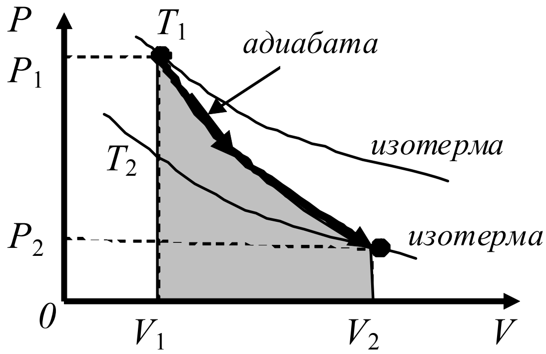
сти теплоты и работы, который впервые был доказан в 1843 г. опытами английского физика Д. П. Джоуля.

3. **Вечный двигатель первого рода.** Современная жизнь человека невозможна без использования самых разнообразных машин. **Устройство, при помощи которого любая энергия может быть преобразована в механическую энергию, называется машиной**. Если при этом **преобразуется тепловая энергия в механическую, то такая машина называется тепловой**. Основным общим признаком машин является способность совершать работу. *Тепловая машина, способная совершать работу без потребления теплоты и без каких-либо изменений внутри самой машины, называется вечным двигателем первого рода*. Из первого начала термодинамики вытекает невозможность создания такого устройства, которое способно совершать неограниченное количество работы без затрат теплоты. Если к системе не поступает тепло ($Q = 0$), и над системой не совершается работа внешних сил ($A' = 0$), то работа, совершаемая системой, может быть совершена только за счёт убыли внутренней энергии $U_0 - A = U_k$, тогда $U_0 - U_k = A$ или $-\Delta U = A$. После того как запас энергии окажется исчерпанным, машина перестанет совершать работу и остановится.

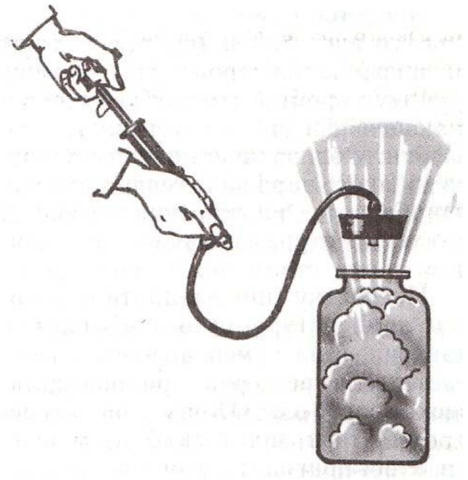
4. **Адиабатный процесс.** Рассмотрим теперь процесс, протекающий в системе, которая не обменивается теплотой с окружающей средой (система теплоизолирована от внешней среды). *Процесс в теплоизолированной системе называют адиабатным.*

При адиабатном процессе ($Q = 0$) изменение внутренней энергии происходит только за счёт совершения работы $0 = \Delta U + A$ или $-\Delta U = A$.

При адиабатном расширении газа $A > 0$, следовательно $\Delta U = \frac{i}{2}\frac{m}{\mu}R\Delta T < 0$. Это означает, что $\Delta T < 0$, температура газа уменьшается по сравнению с первоначальной температурой. Уменьшение температуры газа при адиабатном расширении приводит к тому, что давление газа также уменьшается. На рисунке представлен график адиабатного процесса по сравнению с изотермическим. Рассмотрите внимательно рисунок.



Площадь под адиабатой численно равна работе, совершённой газом при расширении от объёма V_1 до объёма V_2.



Адиабатное сжатие приводит к увеличению температуры газа, так как в результате сжатия над газом совершают работу внешние силы и внутренняя энергия газа возрастает.

Адиабатическое расширение приводит к уменьшению температуры газа. Работа против внешних сил совершается за счет внутренней энергии газа.

5. **Применение первого начала термодинамики к изопроцессам.** Используя первый закон термодинамики, рассмотрим различные процессы в газах, при которых происходит изменение внутренней энергии.

Название процесса	Уравнение процесса	Количество теплоты	Изменение внутренней энергии	Работа, совершенная газом
Изохорный $V = const$	$\frac{P}{T} = const$	$Q = C_V \frac{m}{\mu}\Delta T$, $C_V = \frac{i}{2}R$	$\Delta U = \frac{i}{2}\frac{m}{\mu}R\Delta T$	$A = 0$
Изобарный $P = const$	$\frac{V}{T} = const$	$Q = C_P \frac{m}{\mu}\Delta T$ $C_P = \frac{i+2}{2}R$	$\Delta U = \frac{i}{2}\frac{m}{\mu}R\Delta T$	$A = P\Delta V$
Изотермический $T = const$	$PV = const$	$Q = A$	$\Delta U = 0$	$A = \frac{m}{\mu}RT\ln\frac{V_2}{V_1}$
Адиабатный $Q = 0$	$PV^{\gamma} = const$, $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$	$Q = 0$	$\Delta U = \frac{i}{2}\frac{m}{\mu}R\Delta T$	$A = -\Delta U$

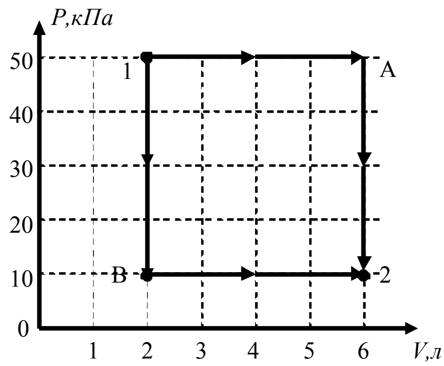
УПРАЖНЕНИЯ

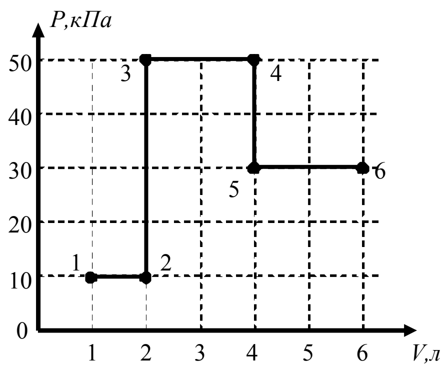
Упражнение 1. Решите задачи.

1. Идеальный газ с начальным давлением P_1, занимающий объём V_1, расширяется до объёма V_2. В каком случае газ совершает большую работу – при изотермическом или адиабатном расширении?

2. В цилиндре с подвижным поршнем при атмосферном давлении находятся 2 моля водорода. В процессе нагревания температура газа повысилась от 20 °С до 80 °С. Какое количество теплоты передано газу, какую работу совершил газ, как изменилась его внутренняя энергия?

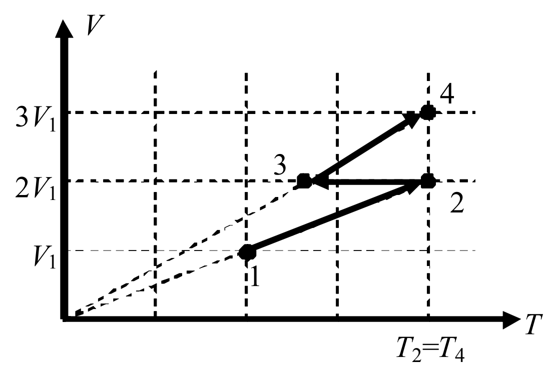
3. Газ переходит из состояния 1 в состояние 2 как показано на рисунке. Используя данные рисунка, найдите во сколько раз количество теплоты и работа в процессе 1–А–2 больше, чем процессе 1–В–2. Найдите изменение внутренней энергии при переходе газа из начального состояния в конечное состояние.





4. Определите работу, количество теплоты и изменение внутренней энергии кислорода при переходе из состояния 1 в состояние 6, как показано на рисунке.

5. Изменение состояния идеального газа изображено на рисунке. Начальное давление газа $P_1 = 10^5$ Па и его начальный объём $V_1 = 5$ м^3. Найдите работу, количество теплоты и изменение внутренней энергии при переходе газа из состояния 1 в состояние 4 в результате протекания процессов 1–2–3–4. Идеальным газом является кислород, в количестве 2 моля.



6. Два моля водорода сжимаются изотермически при температуре 300 К до половины первоначального объёма. Какая работа совершена газом? Чему равно изменение внутренней энергии? Какое количество теплоты подведено к газу?

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

Физические термины

1. Внутренняя энергия идеального <u>одноатомного газа</u> прямо пропорциональна его абсолютной температуре. Она не зависит от объёма и других макроскопических параметров системы.
   Изменение внутренней энергии идеального газа равно $\Delta U = \frac{3}{2}\frac{m}{\mu}R\Delta T = \frac{3}{2}\frac{m}{\mu}R(T_2 - T_1)$, то есть определяется температурами начального и конечного состояниями газа и не зависит от процесса.
2. Внутренняя энергия реальных газов, жидкостей и твердых тел зависит от объёма. Таким образом, температура и объём – макроскопические параметры системы, однозначно определяющие состояние системы и внутренней энергии.
3. *Изменение внутренней энергии системы при переходе её из одного состояния в другое равно разности теплоты, подведённой к системе и работы, совершённой системой против внешних сил* $\Delta U = Q - A$ *или* $Q = \Delta U + A$ *–* <u>*количество теплоты, переданное системе, идёт на изменение её внутренней энергии и на совершение системой работы против внешних сил.*</u>
   Уравнение $Q = \Delta U + A$ называют ***первым законом термодинамики (первое начало термодинамики).***

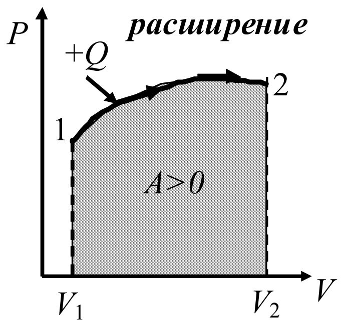
ТЕМА 9. **ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ**

Новые слова и словосочетания

круговой процесс	замкнутый цикл
цикл	циклический
нагреватель	холодильник
рабочее тело	полезная работа
обратимый процесс	необратимый процесс
коэффициент	
коэффициент полезного действия	
отопительный коэффициент	холодильный коэффициент
вероятный	наиболее вероятный
двигатель	кондиционер
тепловой насос	

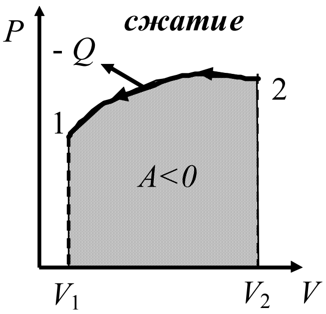
Работа при циклических процессах

Обратимые и необратимые процессы. Термодинамический процесс называется обратимым, если он может происходить в прямом и обратном направлении, при этом в окружающей среде никаких изменений не происходит.



прямой процесс

На рисунке система перешла из состояния 1 в состояние 2 (расширение). Системе сообщено количество теплоты $+Q$ и система совершила работу $+A$. Если теперь систему вернуть в начальное состояние *так, чтобы в результате процесса сжатия она проходила через те же промежуточные состояния,* то над системой должна быть совершена работа внешними силами. При этом система отдаёт количество теплоты $(-Q)$. Запишем закон сохранения энергии для замкнутого процесса 1–2–1 (расширении + сжатие):



обратный процесс

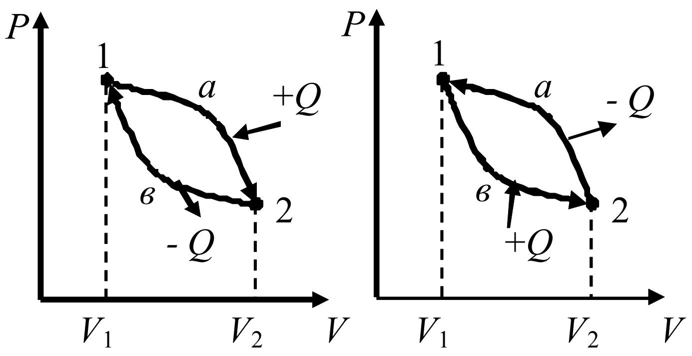
1) изменение внутренней энергии системы равно нулю $\Delta U = 0$, так как система вернулась в начальное состояние;

2) суммарная работа при протекании процесса 1–2–1 также равна нулю, так как работа расширения (работа, совершённая газом) $A = -A'$ равна работе сжатия;

3) суммарное количество теплоты, подведённое к системе также равно нулю, так как $Q = -Q$.

Система совершила замкнутый процесс, никаких изменений в окружающей среде не произошло.

Круговой процесс (цикл). Круговым процессом называется процесс, при котором система, пройдя ряд состояний, возвращается в начальное состояние. На диаграмме процессов цикл изображается замкнутой кривой (**<u>прямой цикл</u>**). Цикл, совершаемый термодинамической системой (идеальным газом), можно разбить на процессы расширения (1–2) и сжатия (2–1). Работа расширения газа положительная и пропорциональна площади фигуры под кривой расширения 1–*а*–2. При сжатии газа из состояния 2 в состояние 1 газ совершает отрицательную работу. Она равна площади фигуры под кривой сжатия 2–*в*–1. Полная работа за цикл равна сумме работ расширения и сжатия газа. На графике полная работа за цикл пропорциональна площади фигуры, ограниченной диаграммой кругового процесса 1–*а*–2–*в*–1. Обратите внимание, что расширение газа происходит при более высокой температуре, чем сжатие. **Поэтому полная работа за цикл – положительная.** *Круговые процессы, при которых расширение газа происходит при более высокой температуре, чем сжатие, используется в тепловых двигателях.* Процесс расширения газа в тепловых двигателях происходит в результате нагревания газа. Поэтому работа совершается за счёт теплоты, полученной газом от нагревателя.



прямой цикл **обратный цикл**

Если круговой процесс осуществляется в обратном направлении 1–*в*–2–*а*–1 (***обратный цикл***), то работа газа при расширении меньше работы, которую необходимо совершить для сжатия газа и возвращение его в начальное состояние. Так как работа внешних сил по сжатию газа больше работы при расширении, то **полная работа за цикл отрицательна.** *Круговые процессы, в которых расширение газа происходит при более низких температурах, чем сжатие, используется в холодильных машинах.*

<u>Тепловая машина (двигатель)</u>

Основной источник теплоты, используемый человеком – это внутренняя энергия топлива, которая получается в результате горения топлива. Преобразование теплоты в механическую работу осуществляется при помощи специальных устройств, которые называются тепловыми машинами или тепловыми двигателями. Таким образом, *тепловая машина – устройство, преобразующее внутреннюю энергию топлива в механическую работу.* Тепловая машина – это циклически действующее устройство, предназначенное для превращения тепла в механическую работу.

Существуют разные типы тепловых двигателей: паровые турбины, двигатели внутреннего сгорания, реактивные двигатели и др. Несмотря на различие конструкций двигателей и некоторые особенности их работы, принципы действия всех тепловых двигателей одинаковы. Принцип действия тепловой машины заключается в непрерывном повторении полного цикла (кругового процесса), в результате которого получают полезную механическую работу. *Круговой процесс – процесс, при котором система, пройдя через ряд состояний, возвращается в исходное состояние.*

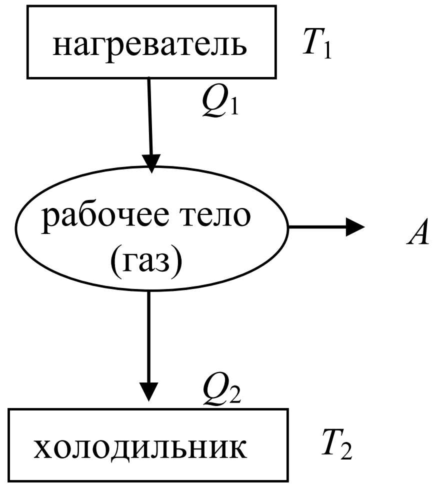
Работа тепловой машины основывается на втором законе термодинамики. Существует несколько формулировок II закона термодинамики.

Формулировка Кельвина:	Невозможен круговой процесс, единственным результатом которого является превращение теплоты, полученной от нагревателя, в эквивалентную ей работу.
Формулировка Клаузиуса:	Невозможен круговой процесс, единственным результатом которого является передача теплоты от менее нагретого тела к более нагретому телу.

Все тепловые двигатели имеют три части**:**

- **рабочее тело (газ или пар) – термодинамическая система, совершающая работу;**
- **нагреватель – устройство, сообщающее теплоту рабочему телу;**
- **холодильник – устройство, поглощающее часть внутренней энергии рабочего тела.**

Принципиальная схема тепловой машины:



При сгорании топлива в нагревателе выделяется энергия, которая передается рабочему телу (газу) Q_1. Газ расширяется и совершает механическую работу (A). Чтобы двигатель работал циклически, газ необходимо сжать до начального состояния. Для уменьшения работы над газом при сжатии его охлаждают, используя холодильник (передают тепло Q_2 холодильнику).

Коэффициент полезного действия тепловой машины

Рабочее тело в тепловой машине, получает некоторое количество теплоты Q_1 от нагревателя. При сжатии рабочего тела часть теплоты Q_2 передаётся холодильнику. Поэтому работа, совершаемая за цикл $A = Q_1 - Q_2$, называется полезной работой.

Отношение полезной работы к количеству теплоты, полученному рабочим телом от нагревателя, называется коэффициентом полезного действия тепловой машины: $\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$. Коэффициент полезного действия (КПД) тепловой машины всегда меньше единицы. Коэффициент полезного действия показывает, какая часть тепла, полученная от нагревателя, пошла на совершение полезной работы.

Эффективность некоторых тепловых двигателей

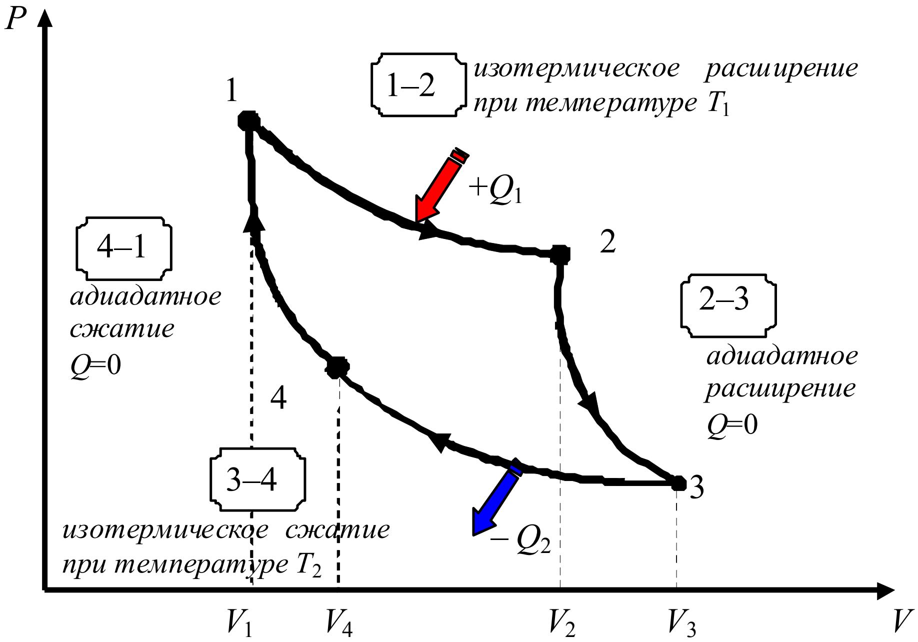
Тепловой двигатель	Коэффициент полезного действия (КПД), %
Паровая машина	1
Паровоз	8
Карбюраторный двигатель	20 – 30
Газовая турбина	36 – 40
Паровая турбина	35 – 46
Ракетный двигатель на жидком топливе	47 – 50

Коэффициент полезного действия идеальной тепловой машины. Коэффициент полезного действия тепловой машины всегда меньше единицы, так как

$$\frac{Q_2}{Q_1} < 1 \text{ , то } \eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

не может быть равен единице (или 100%).

Из-за того что часть теплоты при работе тепловых двигателей неизбежно передаётся холодильнику, КПД двигателя меньше единицы (меньше 100%). Представляет большой интерес нахождение максимально возможного КПД теплового двигателя, работающего с нагревателем, имеющим температуру T_1 и холодильником, имеющим температуру T_2.



Французский учёный С. Карно, решая проблему повышения эффективности тепловых двигателей, предложил модель идеального теплового двигателя. Рабочим телом в таком двигателе является **идеальный газ**. Цикл идеальной тепловой машины (цикл Карно) состоит из **двух изотермических и двух адиабатических процессов.** Эти процессы выбраны потому, что работа газа при изотермическом расширении совершается за счёт внутренней энергии нагревателя, а при адиабатном процессе за счёт внутренней энергии расширяющегося газа. На рисунке приведён график зависимости давления от объёма в идеальном тепловом двигателе, работающем по циклу Карно. *Цикл Карно – самый эффективный (из всех возможных) цикл, имеющий максимальный КПД.*

Рассмотрим термодинамические процессы цикла Карно и определим КПД цикла.

Процесс 1–2 – изотермический процесс расширения при температуре T_1. Внутренняя энергия газа при изотермическом процессе не меняется. В этом процессе совершается газом работа за счёт теплоты, подведённой к газу от нагревателя, имеющего температуру T_1: $A_{1-2} = Q_1$.

Процесс 2–3 – адиабатный процесс расширения газа $Q = 0$. В результате этого процесса работа газа A_{2-3} совершается за счёт изменения внутренней энергии газа ΔU_{2-3}. Температура газа при адиабатном расширении понижается до температуры T_2 (температуры холодильника): $A_{2-3} = -\Delta U_{2-3} = U(T_1) - U(T_2)$.

Процесс 3–4 – изотермический процесс сжатия газа при температуре T_2 (температура холодильника). Внутренняя энергия газа при изотермическом процессе не меняется. При сжатии газ совершает отрицательную работу, поэтому газ передаёт холодильнику количество теплоты Q_2: $-A_{3-4} = -Q_2$.

Процесс 4–1 – адиабатный процесс сжатия газа $Q = 0$. В результате этого процесса работа газа A_{4-1} совершается за счёт изменения внутренней энергии газа ΔU_{4-1}. Температура газа при адиабатном сжатии повышается до температуры T_1 (температуры нагревателя): $A_{4-1} = -\Delta U_{4-1} = U(T_2) - U(T_1)$.

В результате замкнутого цикла система (газ) возвращается в начальное состояние, поэтому суммарное изменение внутренней энергии системы равно нулю: $\Delta U_{1-2-3-4} = U(T_1) - U(T_2) + U(T_2) - U(T_1) = 0$.

Суммарная работа за цикл равная сумме работы расширения $A_{1-2} = Q_1$ и работы сжатия $-A_{3-4} = -Q_2$ называется полезной работой A, которая равна:

$$A_{1-2} + (-A_{3-4}) = A = Q_1 - Q_2 \text{ или } A_{1-2} - |A_{3-4}| = A = |Q_1| - |Q_2|.$$

Полезная работа численно равна площади фигуры, ограниченной кривой цикла Карно.

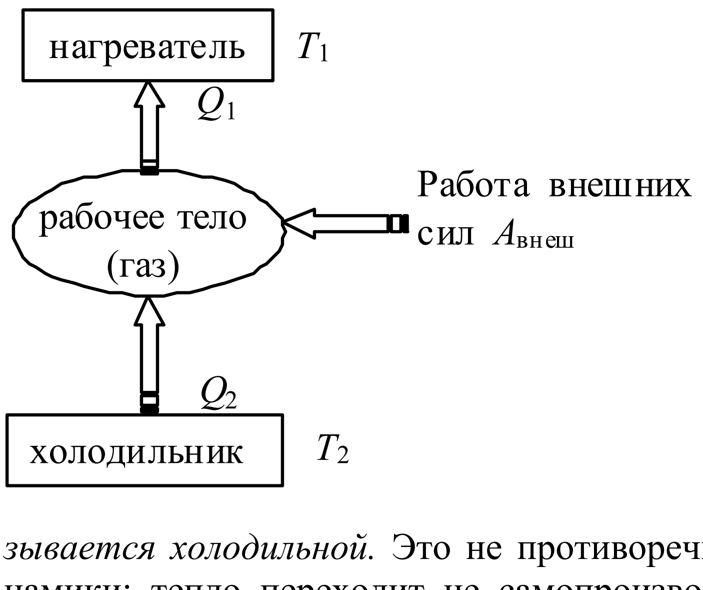
Отношение полезной работы к количеству теплоты, полученному рабочим телом от нагревателя, называется коэффициентом полезного действия тепловой машины: $\eta = \dfrac{A}{Q_1} = \dfrac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$. Для вычисления коэффициента полезного действия тепловой машины, работающей по циклу Карно нужно вычислить работы при изотермических процессах 1–2 и 3–4: $A_{1-2} = \frac{m}{\mu} RT_1 \ln\frac{V_2}{V_1} = |Q_1|$ и $A_{3-4} = \frac{m}{\mu} RT_2 \ln\frac{V_4}{V_3}$, а $|A_{3-4}| = \frac{m}{\mu} RT_2 \ln\frac{V_3}{V_4} = |Q_2|$. Используя уравнение адиабаты для процессов 2–3 и 4–1 можно доказать, что $\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$. Расчеты коэффициента полезного действия тепловой машины, работающей по циклу Карно приводят к следующему результату: $\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$.

Коэффициент полезного действия тепловой машины Карно равен отношению разности абсолютных температур нагревателя и холодильника к абсолютной температуре нагревателя.

Можно определить работу A, совершаемую машиной за цикл и количество теплоты, отданное холодильнику Q_2 через КПД и количество теплоты, полученной от нагревателя Q_1. Согласно определению КПД: $A = \eta Q_1$, тогда $Q_2 = A - Q_1 = \eta Q_1 - Q_1 = Q_1(\eta - 1)$. Так как $\eta < 1$, то $|Q_2| = (1 - \eta) Q_1$.

Идеальная холодильная машина

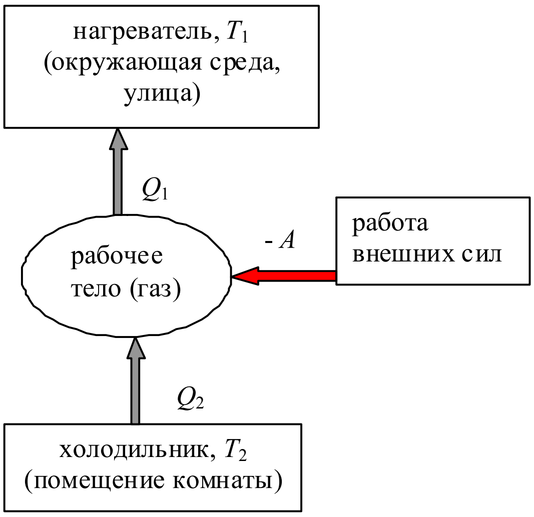
Цикл Карно обратимый цикл, поэтому его можно провести в *обратном направлении.* Это будет уже **не тепловая машина, а идеальная холодильная машина.**



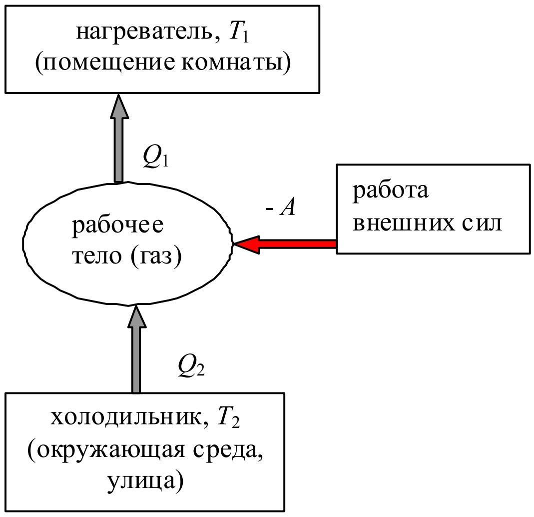
Для приведения машины в действие совершается работа внешними силами $A_{внеш}$. Количество теплоты Q_1 передаётся рабочим телом нагревателю, а количество теплоты Q_2 поступает к рабочему телу от холодильника ($T_1 > T_2$). *Теплота передаётся от холодного тела к горячему, поэтому машина называется холодильной.* Это не противоречит второму началу термодинамики: тепло переходит не самопроизвольно, а за счёт совершения работы.

В холодильной машине работу совершают внешние силы. Работа газа $A = -A_{внеш}$. Так как $A = \eta Q_1 = -A_{внеш}$, то $Q_1 = -\dfrac{A_{внеш}}{\eta}$ (передаваемое количество теплоты отрицательно). Очевидно, $|Q_1| = \dfrac{A_{внеш}}{\eta}$. Согласно выражению $Q_2 = Q_1(\eta - 1)$ или $Q_2 = \dfrac{1-\eta}{\eta}A > 0 \Longrightarrow$ количество теплоты, полученное рабочим телом от холодильника.

В зависимости от назначения, тепловая машина, работающая по обратному циклу, может использоваться как холодильная машина или как тепловой насос. Холодильная машина и тепловой насос – это одно и то же.



Холодильная машина (кондиционер)



Холодильная машина (тепловой насос)

Назначение холодильной машины – охлаждать некоторый резервуар (например, комнату), передавая тепло окружающей среде (на улицу). Горячему телу передаётся количество теплоты Q_1, большее того количества теплоты, которое забирается от холодильника $|Q_1| = A + Q_2$. Эффективность холодильной машины определяется отношением количества теплоты Q_2 к работе, затраченной на проведение цикла: $\varepsilon = \dfrac{Q_2}{A} = \dfrac{T_2}{T_1 - T_2}$. Величина ε называется холодильным коэффициентом. Холодильный коэффициент тем больше, чем меньше разность температур T_1 и T_2. Холодильный коэффициент может быть больше единицы. Пример холодильной машины – кондиционер – он забирает теплоту из комнаты и передает её в окружающую среду (на улицу).

Назначение теплового насоса – нагревать резервуар (например, комнату), забирая тепло из окружающей среды (с улицы). При использовании тепловой машины, работающей по обратному циклу в качестве теплового насоса, важнейшей величиной является количество теплоты Q_1, получаемое нагреваемым телом. Поэтому характеристикой теплового насоса является отопительный коэффициент $\varepsilon_{от} = \frac{Q_1}{A} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$. Отопительный коэффициент всегда больше единицы.

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 1. *Решите задачи.*

1. В идеальной тепловой машине газ отдал холодильнику 55% количества теплоты, полученной от нагревателя. Определите температуру холодильника, если температура нагревателя равна 327 °С.

2. Определите количество теплоты, которое необходимо отвести из морозильной камеры, чтобы превратить в лёд при температуре 0° С воду массой 0,5 кг, первоначально имеющую температуру 20° С.

3. Холодильный коэффициент холодильника равен 3. Определить работу, которую должен совершить компрессор холодильника, чтобы отвести из морозильной камеры количество теплоты 300 Дж. Какое количество теплоты отдаст холодильник в окружающую среду?

4. Количество теплоты, получаемое рабочим телом от нагревателя равно 100 Дж, а отдаваемое холодильнику 75 Дж. Определите КПД тепловой машины и работу, совершаемую машиной за цикл.

5. Тепловая машина работает в интервале температур $t_1 = 120°$ С, $t_2 = 320°$ С, получая от нагревателя 200 кДж теплоты за каждый цикл. Найдите КПД машины, работу, совершаемую за цикл, количество теплоты, отданное холодильнику.

6. Двигатель автомобиля расходует за час работы 5 кг бензина. При этом температура газа в цилиндре двигателя $T_1 = 1200$ K, а отработанного газа $T_2 = 370$ K. Удельная теплота сгорания бензина $q = 46\ МДж/кг$. Определите мощность, развиваемую двигателем.

ЭТО НУЖНО ЗНАТЬ!

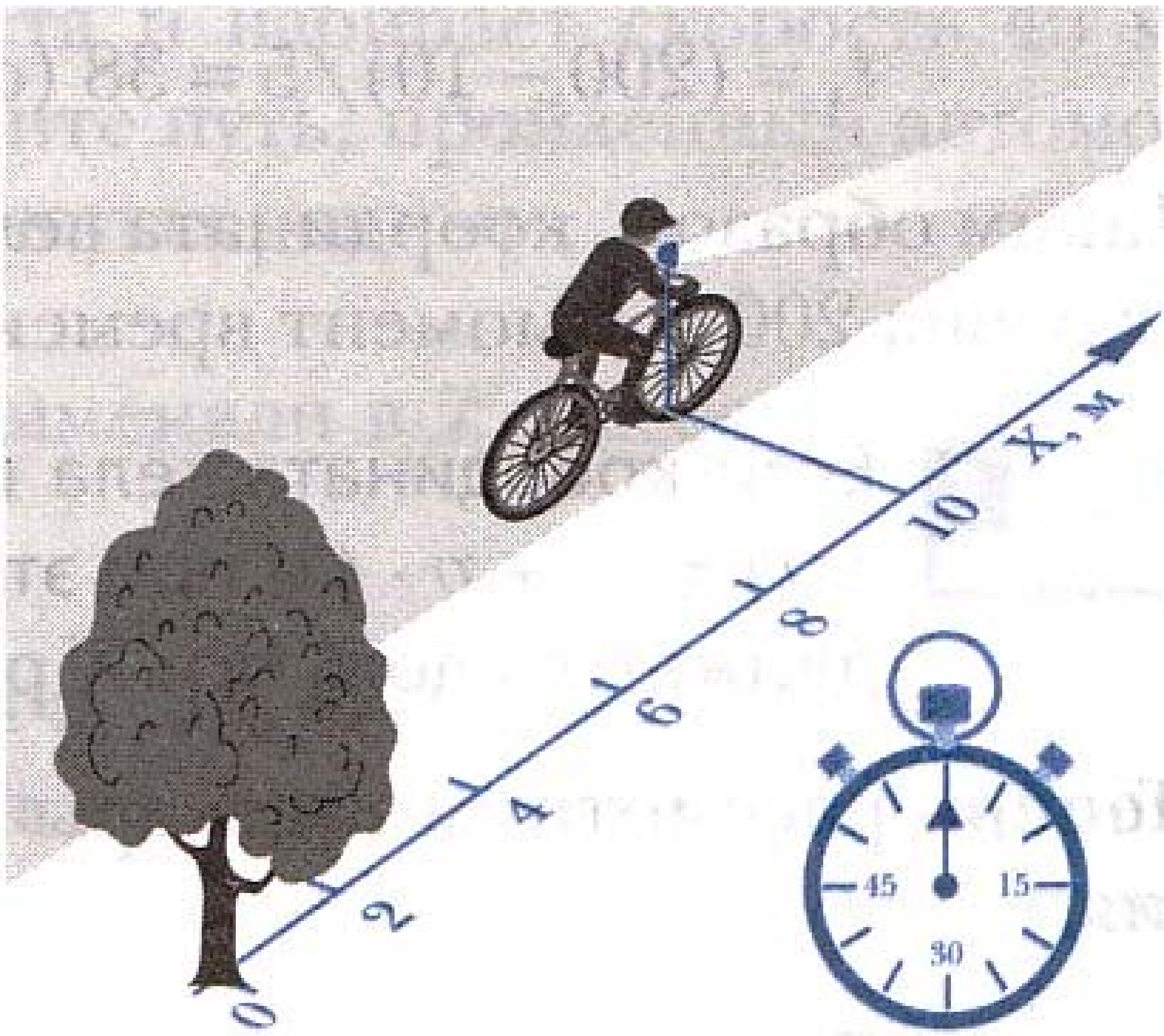
Физические термины

1. Термодинамический процесс называется обратимым, если он может происходить в прямом и обратном направлении, при этом в окружающей среде никаких изменений не происходит.
2. Круговым процессом называется процесс, при котором система, пройдя ряд состояний, возвращается в начальное состояние.
3. *Тепловая машина – устройство, преобразующее внутреннюю энергию топлива в механическую работу.*
4. Отношение полезной работы к количеству теплоты, полученному рабочим телом от нагревателя, называется **коэффициентом полезного действия тепловой машины:**
$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$
5. Все тепловые двигатели имеют три части:
   - **рабочее тело (газ или пар) – термодинамическая система, совершающая работу;**
   - **нагреватель – устройство, сообщающее теплоту рабочему телу;**
   - **холодильник – устройство, поглощающее часть внутренней энергии рабочего тела.**
6. Модель идеального теплового двигателя предложена С. Карно. Рабочим телом в таком двигателе является **идеальный газ**. Цикл идеальной тепловой машины (цикл Карно) состоит из **двух изотермических и двух адиабатических процессов.**
7. Коэффициент полезного действия тепловой машины Карно равен отношению разности абсолютных температур нагревателя и холодильника к абсолютной температуре нагревателя:
$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$
8. *Идеальная холодильная машина – это машина, работающая по циклу Карно в обратном направлении. В зависимости от*

назначения, тепловая машина, работающая по обратному циклу, может использоваться как холодильная машина или как тепловой насос.

9. Эффективность холодильной машины определяется отношением количества теплоты Q_2 к работе, затраченной на проведение цикла: $\varepsilon = \frac{Q_2}{A} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$. Величина ε называется холодильным коэффициентом.
10. Характеристикой теплового насоса является отопительный коэффициент $\varepsilon_{от} = \frac{Q_1}{A} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$. Отопительный коэффициент всегда больше единицы.

Глава 6.
РУССКО-АНГЛИЙСКИЙ СЛОВАРЬ ФИЗИЧЕСКИХ ТЕРМИНОВ



А

абсолютно	absolutely
абсолютный	absolute
абсолютный показатель преломления	*absolute index of refraction*
абсцисса	abscissa
агрегатный	aggregate
аккомодация (глаза)	accommodation (of eye)
ближняя точка аккомодации	*near point of accommodation*
дальняя точка аккомодации	*far point of accommodation*
алгебраический	algebraic
алмаз	diamond
ампер	ampere
аккумулятор	accumulator, battery
амперметр	amperemeter, ammeter
амплитуда	amplitude, range
аналогично	in similar way, analogically
аналогичный	analogous
аналогия	analogy, correspondence
анион	anion
анод	anode
антенна	antenna
аппликата	applicate, z-coordinate
атмосфера	atmosphere
атмосферный	atmospheric
атом	atom
аэродинамика	aerodynamics
аэродинамический	aerodynamic(al)
аэростатика	aerostatics

Б

баланс	balance
барометр	barometer
батарея	battery
безвоздушный	airless, vacuum
белок (вещество)	protein
бесконечно	infinitely
бесконечность	infinity
бесконечный	infinite, endless
бинокль	binoculars

ближайший	nearest, proximate, the next, immediate
ближе	nearly
ближний	near, nearest
близкий	approximate, close
близко	near, close to
близорукий	shortsighted
близорукость	miopia, nearsightedness
броуновское движение	Brownian motion, random motion
бросать (бросить)	throw, give up, abandon, desert, quit
брошенный	thrown, abandoned, deserted
брошенное тело	*thrown, abandoned, deserted body; projectile*
брошено	*it has thrown*
быстро	quickly
быстрый	fast, quick

В

вакуум	vacuum
вверх	up, upwards, to the top
вдоль	along
вебер	weber
вектор	vector
вектор перемещения	*vector of displacement, vector of movement*
вектор напряженности эл. поля	*field vector*
векторный	vector, vectorial
величина	value, quantity, size
вертикально	vertically
вертикальный	vertical
верхний	upper
вес	weight
весы	scales, balance
вещество	substance
взаимодействие	interaction
взаимодействовать	interact
взвешивать (взвесить)	weigh
вибратор	oscillator, vibrator
вид	view, appearance, form, type, kind, aspect
винт	screw
виток	loop, spire, wind
внешний	external, outward
вниз	down, downward

внутренний	inside, inner, inward
внутри	inside
вогнутый	concave
вода	water
водород	hydrogen
водянистая жидкость	waterish liquid
воздух	air
возвращаться (возвратиться)	come back, return
возникать (возникнуть)	arise, originate, come up
возникновение	genesis, origin, beginning
волна	wave
волновой	wave
волновой фронт	*wave front*
волновая оптика	*wave optics*
Вольт	Volt
вольтметр	voltmeter
восток	east
вращательный	rotatory, rotational
вращаться	rotate, turn, revolve
вращение	rotation, revolution
время	time
всегда	always
всемирный	universal, world
встреча	meeting
встречаться (встретиться)	meet
выводить (вывести)	deduce, conclude, infer, derive
выключатель	switch
вынужденный	forced, constrained
выпуклый	convex
вырывать (вырвать)	tear out, tear up
высота	height, altitude
высота (звука)	tone
выстрел	shot
выталкивать (вытолкнуть)	push up, eject
выталкивающая сила	buoyant force, pushed up force
вычисление	calculation
вычислить (вычислять)	calculate
вычитание	subtraction
вычитать (вычесть)	subtract

Г

газ	gas
газовый	gaseous
газообразный	aeriform, gaseous, gasiform, vapoury
гальванический элемент	galvanic element
гармонический	harmonic
Гаусс	Gauss
Генри	Henry
геометрический	geometric(al)
гидравлический	hydraulic
гидравлический пресс	*hydraulic press*
гидродинамика	hydrodynamics
гидродинамический	hydrodynamics
гидролиз	hydrolysis
гидростатика	hydrostatics
гидростатический	hydrostatics
гипербола	hyperbola
главный	main, fundamental, principal
глаз	eye
глазное дно	*eye-ground, bottom of eye*
глицерин	glycerine
глубина	depth, deepness
голубой	blue
горизонт	horizon
горизонтальный	horizontal
горячий	hot
гравитационный	gravitation(al)
гравитация	gravitation
градус	degree, grade
граница	boundary, border, line
грань	edge, face, plane
график	graph, diagram
графический	graphic

Д

давать (дать)	give
давить	press
давление	pressure
дальнозоркий	far-sighted, longsighted
дальнозоркость	long sight

дальность	distance, range
дальше	farther
дан	it is given
данный	given
дано, нам дано	it is given, we are given
двигать(ся)	move
движение	movement
действие	operation, action, effect
действительный	real, actual
действующее значение	effective value
делать (сделать)	do, make, carry out
деление	division
делить(ся)	divide
деталь	detail, part
дефект	defect
дефект зрения	*bad eye sight (lack of vision)*
деформация	deformation
деформировать(ся)	deform
Джоуль	Joule
диагональ	diagonal
диамагнетик	diamagnetic
диаметр	diameter
динамика	dynamics
динамический	dynamic
диоптрия	diopter
диполь	dipole
дисперсия	dispersion
дифракция	diffraction
дифракция волн	*wave diffraction*
дифракция на отверстии	*diffraction by aperture*
дифракция на решётке	*diffraction by grid*
дифракция на щели	*diffraction by slit*
дифракционный	diffractive
дифракционная решетка	diffraction grating, multiple slit
дифференциальный	differential
диффузия	diffusion
диэлектрик	dielectric, non-conductor
диэлектрическая проницаемость	dielectric penetrability, permittivity
длина	length
дно	bottom

до (по времени)	before, until
догонять (догнать)	run down, catch up
достаточно	enough, sufficiently
дополнять (дополнить)	add, complete
другой	another, other
дуга	arc
думать	think
Е	
единица	unit
единица измерения	*unit of measuring*
ёмкость	capacity
Ж	
железо	ferrum, iron
желтый	yellow
жесткость	hardness, rigidity
жидкий	fluid, liquid
жидкость	fluid, liquid
З	
зависеть (от)	depend on (upon)
зависимость	dependence
задача	problem, task
задерживаться	(be) detain(ed), delay(ed) retard
задерживающий	delayed
заключать (заключить)	conclude, deduce
задний	back
закон	law
закон Ампера	*Ampere's law*
закон всемирного тяготения	*law of universal gravitation*
закон Кулона	*Coulomb's law*
закон Ньютона	*Newton's law*
закон Паскаля	*Pascal's principle (law)*
закон сохранения импульса	*momentum conservation law*
закон сохранения энергии	*(law of) conservation of energy*
закон Ома	*Ohm's law*
замедленно	decelerated
замедленный	decelerated
замедлять(ся)	decelerate
заменять (заменить)	change, replace, substitute
замерзание	freezing

замерзать (замерзнуть)	freeze
замкнутый	closed, reserved
запад	west
заполнять (заполнить)	fill, fill in
запуск	starting, launching
заряд	charge
заряженный	charge
затухать	damp
затухающий	damped
затухающие колебания	*damped vibrations*
звук	sound
зеленый	green
Земля	Earth
зеркало	mirror
зеркало плоское	*plain mirror*
зеркало вогнутое	*concave mirror*
зеркало выпуклое	*convex mirror*
зеркальный	mirror, specular
знак	sign
знать	know
значение	value
зона	area, belt, range, zone
зрачок	pupil of the eye
зрение	vision, sight
зрительный нерв	visual nerve, (optic nerve)

И

идеальный	ideal
идти (пройти)	go, work, pass
избыток	abundance, excess, surplus, plenty
избыточный	overabundant, surplus
известно	it is known
излучать	emit, send out, radiate
изменение	change
изменять (изменить)	change
измерение	measuring, measurement
измерять (измерить)	measure
изобара	isobar
изобарный	isobaric
изображать(ся) (изобразить)	picture, represent, portray
изображение	image

изображение действительное	real image
изображение мнимое	virtual (imaginary) image
изолированный	isolated , insulated , separated
изолированная система	isolated , insulated , separate system
изолировать	isolate , insulate , separate
изолятор	isolateur, insulator, dielectrique
изопроцесс	process where one of parameters is unchanging
изотерма	isotherm
изотермический	isothermal
изохора	isochor
изохорный	isochoric
изучать (изучить)	study, learn
иметь	have
импульс	impulse
индуктивность	inductance
индукционный ток	inductance current
индукция	induction
инертность	inertia, inactivity
инерциальный	inertial
инерция	inertia
интеграл	integral
интегрирование	integration
интегрировать (проинтегрировать)	integrate
интерференция	interference
интерфереционный	interference
интерефереционная картина	interferogram
интерефериционный максимум	interference maximum
интерефериционный минимум	interference minimum
интерферировать	interfere
инфракрасный	infrared
ионы	ions
искусственный	artificial
испарение	evaporation
испарять(ся)	evaporate
использовать(ся)	use, utilize
испускание	emission, irradiation
испускать	emit, throw out, give off
источник	source
источник света	*source of light*

источник тока	*current source*
исчезать (исчезнуть)	disappear, vanish

К

капля	drop
касаться	touch
катион	cation
катод	cathode
касательный	tangent
катушка	coil, bobbin
квадрат	square
квадратично	squarely
квадратичный	square
квант	quantum
квантовый	quantum
кварц	quartz
керосин	kerosene
килограмм	kilogram
километр	kilometer
кинематика	kinematics
кинематический	kinematic(al)
кинетический	kinetic
кипение	boiling
кипеть	boil
кислород	oxygen
классический	classic(al)
когерентность	coherence
когерентный	coherent
колбочка	cone of retina
колебание	vibration, oscillation
колебательный	vibrating, oscillating
колебательный контур	*LC-circuit*
колебаться	vibrate, swing, oscillate
колеблющийся	vibrating
количественный	quantitative
количество	quantity
конденсатор	condenser, capacitor
конденсация	condensation
конденсировать(ся)	condense
конец	end

конечный	ending, final
консервативный	conservative
константа	constant
контакт	contact
контур (эл. цепи)	circuit, contour
концентрация	concentration
координата	coordinate
косинус	cosine
косинусоида	cosinusoidal curve
космический	space, cosmic
космос	space, cosmos
который	which, what, that, who
коэффициент	factor, coefficient
край	edge, end
крайняя точка	outside, supreme, utmost point
красный	red
кратко	briefly
кривой	curve
криволинейно	curvilinearly
криволинейный	curvilinear
кристалл	crystal
кристаллизация	crystallisation
кристаллический	crystal, crystalline
круговой	circular, round
Кулон	Coulomb
Л	
лазер	laser
лампа	lamp
лед	ice
лежать	lie, be situated
лестница	stairs
лимит	limit
линейно	linearly
линейный	linear
линия	line
линза	lens
линза собирающая	*converging lens*
линза рассеивающая	*diverging lens*
логика	logic

логически	logically, rationally
логический	logical
лодка	boat
Луна	moon
лупа	magnifying glass, loupe
луч	ray, beam
лучевая оптика	ray optics
любой	any
люминесценция	luminescence
М	
магнит	magnet
магнитный	magnetic
магнитная индукция	*magnetic induction*
магнитное поле	*magnetic field*
магнитный поток	*magnetic flux*
макропараметр	macroparameter
максимальный	maximum
максимум	maximum, peak
маленький	small
малый	small, little
манометр	manometer
масса	mass
математический	mathematical
материал	material
материальный	physical, material
материя	substance, matter
маятник	pendulum
мгновенный	instantaneous
медленно	slowly
медленный	slow
межатомный	interatomic
между	between
мелкий	small
менять	change
мера	measure, scale
металл	metal
металлический	metallic
метр	meter
механика	mechanics

механический	mechanical
мешать	mix
микропараметр	microparameter
микроскоп	microscope
минимум	minimum
минимальный	minimum
минута	minute
мнимое (изображение)	virtual, imaginary (image)
множество	set
модуль	module
можно	it is possible, one may
мозг	brain, cerebrum
молекула	molecule
молекулярный	molecular
молекулярно кинетическая теория	*molecular kinetic theory*
моль	mole
молярный	mole
момент	moment, instant
монохроматический	monochromatic
мышца	muscle

Н

наблюдать	observe
навстречу	towards, go to meet
нагревание	heating
нагревать(ся),	heat, warm
нагреть(ся)	heat, warm
нагретость (нагрев)	heating
называть(ся)	call, name
наименьший	the least
наилучший	the best
найти	find
накладывать(ся)	put on
наклон	slope
наклонный	oblique, slope
наложение	superposition, application
наложить(ся)	put on
написать	write
направление	direction

направленный	directed
направлять(ся)	direct
например	for example
напрягать(ся)	strain, force
напряжение мышцы	muscle strain
напряжение (эл.)	voltage
напряжённость	intensity, strength
натяжение (нити)	strain, tension
наука	science
научный	scientific
находить	find
находиться	be in, be located
начало	beginning, source, start
начальный	opening, initial, first
невесомость	weightlessness, zero-gravity
недостаток	lack
незамкнутый (контур)	open (circuit)
незатухающий	non-damped, maintained
неинерциальный	non-inertial
неконсервативный	nonconservative
необходимо	it is necessary
необходимость	necessity
неоднородный	impure, heterogeneous
неподвижный	immovable, motionless
неполярный	non-polar
непрерывный	persistent
неравенство	inequality
нерв	nerve
зрительный нерв	*visual nerve*
нервный	nerve
нервное окончание	*nerve end*
нижний	lower
нить	thread
нормаль	normal
нормальный	normal
ноль (нуль)	zero
нужно	it is necessary
Ньютон	Newton

О

обкладка	coat, lining
обладать	possess, have
обмотка	winding
обмотка первичная	*primary winding*
обмотка вторичная	*secondary winding*
обнаружить	discover, find
обозначать(ся)	designate, mark, denote
обозначение	designation, denotation
оболочка	cover, membrane
оборот	turn, circulation
обработка	refinement, treatment, processing
обратно	back, backward
обратный	reverse
общий	general, common
общий вид	*general view*
объект	object
объектив (опт.)	objective (optic)
объем	volume
огибающая	surrounding curve
огибать (обогнуть)	turn, double
ограниченный	limited
ограничить	limit
одинаковый	same, equal, identical
одновременно	simultaneously, at the same time
одновременный	simultaneous
одноимённые заряды	like charges, similar charges
однородный	homogeneous, smooth
окружающий	environmental, surrounding
окружность	circle
окуляр	ocular
Ом	Ohm
описывать	describe
опора	footing, shore, stay, support
определять (определить)	determine
оптика	optics
оптически более плотная среда	*medium optically more dense*
оптически менее плотная среда	*medium optically less dense*
оптический	optical
оптический прибор	*optical device*

оптический центр	*optical centre*
оптическая ось	*optical axis*
оптическая сила	*optical force*
опыт (физический)	experiment (physical)
оранжевый	orange
ордината	ordinate, y-coordinate
ориентация	orientation
ориентировать(ся)	orient
ослабление	weakening, slackening
ослаблять	weaken, loosen
основание	base, foot
основной	main
останавливать(ся)	stop, check
остановка	stop, station
ось	axis
ось абцисс	*axis of abscissas*
ось ординат	*axis of ordinates*
от … до… (в пространстве)	from... to (before)
от…до… (во времени)	since... till
отвердевать	harden, become firm
отвердевание	hardening
отверстие	aperture, orifice, hole
ответ	answer
отвечать	answer
отдавать (отдать)	return, give back
откладывать (отложить)	delay, put aside, postpone
отклонение	deviation, displacement
отклонять(ся)	deviate
отличать(ся), отличить(ся)	distinguish (oneself), differ
относительно	relatively
относительный	relative
относительный показатель преломления	*relative refraction index*
отношение	ratio
отпускать (отпустить)	let go, release
отражать(ся)	reflect
отражение	reflection
полное отражение	*total reflection*
отражённый	reflected ray
отрезок	segment
отрицательный	negative

отсчет	start position
тело отсчета	*reference body*
система отсчета	*reference system*
отталкивать(ся)	push away, repulse
охарактеризовать	characterize, describe
охлаждать(ся) охладить(ся)	(become) cool, cool down
охлаждение	cooling
очки	glasses, eye-glasses
П	
падать	fall, incidence
падающий	incidence
падение	incidence, fall
падение напряжения	*voltage drop, drop of potential*
пар	vapour
парабола	parabola
параллелограмм	parallelogram
параллельно	parallel
параллельный	parallel
параметр	parameter
парообразование	vaporization, evaporation
Паскаль	Pascal
перед	in front of, before
передний	front
передавать	pass, transmit
передача	transmission
переменно	variably
переменный	variable
переменный ток	*alternating current*
перемещать(ся), переместить(ся)	displace, change place, move
перемещение	displacement, movement, transposition
перенос (физ.)	transportation, transposition
переносить(ся)	transport, transfer
переносный (физ.)	transposing
перераспределение	redistribution
пересекать(ся)	cross
пересечение	crossing, intersection
переход	passage, transition
переходить	pass, pass over, go over
период	period
периодический	periodical

перпендикуляр	perpendicular
перпендикулярный	perpendicular
плавание (плавучесть)	flotation (buoyancy, floatability)
плавать	float, swim
плавить(ся)	melt
плавление	melting
пластина	plate
пленка	film
плечо	arm, shoulder
плоский	plain
плоское зеркало	*plain mirror*
плоскость	plain
плотность	density
плотный	dense
плотная среда	*dense medium*
площадка (элементарная)	area, square, platform, place
площадь	area, square
побочный	side, secondary
побочная ось	*secondary axis*
поверхностный	surface
поверхность	surface
поворачивать(ся)	turn
поворот	turning
повторяемость	frequency, repetition
повторять(ся)	repeat
поглощать(ся)	absorb
поглощение	absorption
подвес	hanger, hangholder
подвижный	agile, movable, mobile
поднимать(ся), поднять(ся)	lift, bring up, elevate, raise
подобно	similarly
подобный	similar
подъем	lifting
позже	later, then
показатель	index
показатель преломления	*refraction index*
показывать (показать)	show
покой	rest
покрывать	cover
пол	floor

поле	field
полезный	useful
полет	flight
полный	complete, total, full
полное отражение	*complete reflection*
положение	position
положительный	positive
полужидкий	semi-liquid
получать(ся), получить(ся)	get, receive, obtain
полюс	pole
поляризация	polarization
поляризовать	polarize
полярный	polar
понимать (понять)	understand
попадать (попасть)	get, catch
поперечный	transverse
поперечное сечение	transverse section
порядок	order
после	after
последовательно	successively, consequently, in series
постоянный	constant
постоянная величина	*constant value*
постоянная Планка	*Planck's constant*
построение	construction
построить	construct
поступательно	progressively
поступательный	progressive
потенциал	potential
потенциальный	potential
поток	flux, flow
потом	afterwards, after
почти	near, about, almost, approximately
правдоподобность	look like a true
правило	rule, law
правило буравчика руки	*gimlet rule*
правило левой	*rule of the left hand*
правило Ленца	*Lentz principal*
правило треугольника	*triangle method (rule)*
правило параллелограмма	*parallelogram method (rule)*
правый	right
практически	practically

превращать(ся)	convert, transform, turn (into)
превращение	transformation
предел	limit
предельный угол	limit angle
предмет	object
преломление	refraction
преломлённый (луч)	refracted (ray)
преломлять(ся)	refract
преломляющий	refracting
препятствие	obstacle, hindrance
препятствовать	block, resist, prevent (from), hinder (from)
приближать(ся)	aproximate, drive to, approach, bring nearer
приближение (движ.)	close to, approach
приближение (матем.)	approximation
прибор	device, instrument
призма	prism
грань призмы	*prism plane*
треугольная призма	*triangle prism*
принимать (принять)	take, decide, accept, assume
принцип Гюйгенса	Huygens's principle
принцип суперпозиции	superposition principle
природа	nature
притягивать(ся)	attract
гравитационное притяжение	*gravitation*
причина	reason
пробный заряд	probe charge
провод	wire, line, conductor, cable
проводить	conduct
проводник	conductor
продолжать(ся)	continue
продолжение	continuation
продольный	longitudinal
проекция	projection
прозрачный	transparent
произведение	multiplication
производная	derivative
проинтегрировать	integrate

пройденный	passed
пройти	pass
промежуток	distance, interval
проницаемость	penetrability, permeability
пропорционально	proportionally
пропорциональный	proportional
пространственный	spatial, dimensional
пространство	space, area
против	against
противодействие	resistance
противоположно	opposite, contrary, contrarily
противоположный	contrary
протон	proton
проходить	pass over, pass along
процесс	process
пружина	spring
прямо	straightly, directly
прямой	straight, direct
прямолинейно	rectilinearly
прямолинейный	rectilineal (-r)
прямоугольный	rectangular
пузырек (физ.)	buble
пусть	let
путь	way, path, road
пучок	bundle, bunch
пушка	cannon, gun
Р	
работа	work
работа выхода (фотоэф.)	*work function*
работа потерь	*work for overcome friction*
работа силы	*work done by the force*
полезная работа	*useful work output*
совершённая работа	*work input*
равенство	equality
равновесие	equilibrium
равнодействующий	resultant
равнозамедленно	uniformly reducing velocity
равнозамедленный	uniformly retarded
равномерно	uniformly
равномерный	equable

равнопеременно	uniformly varying (changing) velocity
равнопеременный	uniformly variable
равноускоренно	uniformly increasing velocity
равноускоренный	uniformly accelerated
равный	equal
равнять(ся)	be equal to
радиан	radian
радио	radio
радиоволна	radio wave
радиус	radius
радиус-вектор	radius-vector
радужка (радужная оболочка глаза)	iris
разделить	divide
раздражать	innervate
различать	distinguish, distinct
различный	different, diverse, various
разложение	decomposition
разложить (раскладывать)	decompose
разноимённые заряды	opposite charges
размер	size
разность	difference
разность потенциалов	*potential difference, voltage*
разность хода лучей (для дифракц. реш.)	*difference in path length for two diffracted beams*
разный	different
разрешающая способность	resolution (permissive) ability
ракета	missile, rocket
рамка	frame
раньше	before
распространение	propagation
распространять(ся)	propagate, disperse
рассеивать(ся)	diffuse, dissipate
рассматривать (рассмотреть)	examine, see
расстояние	distance
расстояние наилучшего зрения	*distance of the best vision for normal eye = 25 cm*
растворение	dissolution
растворять(ся)	dissolve
реактивный	jet

реактивное движение	*reactive motion*
реакция	reaction
реальный	real
резонанс	resonance
результат	result
результирующий	resultant
река	river, stream
рентгеновский	X-ray
реостат	rheostat
решать (решить)	solve, decide
решение	solution, decision
решётка	grid, lattice, grating
рисунок	figure, design
роговица (роговая оболочка глаза)	cornea
ртутный	mercury
ртуть	mercury

С

самоиндукция	self-induction
самостоятельно	independently
самостоятельная работа	*singly independent work*
сверхпроводимость	superconductivity
сверхпроводящее состояние	superconductive condition
свет	light
световой	light
светочувствительный	light-sensitive
свободно	freely
свободный	free
свободные колебания	*sustained oscillations*
свободный заряд	*free charge*
свойство	property, character feature
связывать (связать)	connect
связанный заряд	*connected charge*
связь	connection, link
сгорать (сгореть)	burn, burn away
сдвиг	shift, displacement
сделать вывод	make a conclusion
север	North
секунда	second
сетчатка (глаза)	retina
серебро	silver

сжатие	compression
сжимать(ся), сжать(ся)	compress
сигнал	signal
сила	force
сила Ампера	*Ampere's force*
сила внешняя	*external force*
сила внутренняя	*internal force*
сила выталкивающая	*buoyant force*
сила давления	*pressure force*
сила Лоренца	*Lorentz's force*
сила натяжения нити	*thread tension force*
сила реакции опоры	*supporting force*
сила тока	*current intensity*
сила трения	*friction force*
сила трения покоя	*static friction force*
сила трения скольжения	*kinetic (sliding) friction force*
сила тяжести	*gravity force, force of gravity*
сила упругости	*tension in a string*
силовая линия	force line
симметрично	symmetrically
симметричный	symmetric
синий	blue
синус	sine
синусоида	sinusoidal line
система	system
система отсчета	*reference system*
скаляр	scalar
скалярный	scalar
складывать	add
скольжение	slide
скользить	slide
скорость	speed, velocity
следовательно	consequently
следовать	fallow
сложение	addition
слоистый	foliated, lamellar, stratified
сложить	add
случай	case
в этом случае	*in that case*
смещаться	shift
смещение	shifting
снаряд	shell, bullet

собирать	collect
собирающая (линза)	converging
собственный	own
совершать (совершить)	accomplish, perform, carry on
совершить работу	*do work, carry out a work*
совершение	performing
совпадать (совпасть)	coincide
соединение	connection
соединение параллельное	*connection in parallel*
соединение последовательное	*connection in series*
соединять (соединить)	connect, join, combine
создавать	create, make
соленоид	solenoid
Солнце	sun
сообщающийся	communicated
сообщающиеся сосуды	*U-tube, connected vessels*
соответствовать	accord, match, correspond
соприкасаться (соприкоснуться)	contact, touch, come into contact (with)
соприкосновение	contact, contiguity, touch
сопротивление	resistance
сопротивление воздуха	air resistance
сопротивление проводника	conductor resistance
составляющий	component
состояние	state, situation
состоять из	consist of
сосуд	vessel, container
сохранение	conservation, maintenance
сохранять(ся), сохранить(ся)	conserve, keep, maintain
спектр	spectrum
спектральный	spectral
спирт	spirits, alcohol
способность	ability
спутник	satellite, sputnik
сравнение	comparison
сравнивать (сравнить)	compare
среда	medium
среднеквадратичный	root mean square
средний	middle, average
статика	statics
статистический	statistic

стационарный	stationary, fixed, immovable
стекло	glass
стекловидный	glassy, hyaloid
стекловидное тело	*hyaloid membrane*
стеклянный	glass
стенка	wall, side
стол	table
столб	column, pillar
сторона	side
сторонние силы (электр.)	electromotive force of nonelectromagnetic origin, extraneous forces
стрелка	arrow
стрелять	fire (at), shoot (at)
стремиться	long (to, for); look (to, forward); aspire
строение	structure
строить	construct
сумма	sum
суммарный	total
суперпозиция	superposition
принцип суперпозиции	*superposition principle*
существовать	exist, be, there is, there are
сфера	sphere
сферический	spherical
сферическая поверхность	*spherical surface*
сферическое зеркало	*spherical mirror*
Т	
таблица	table
тангенциальный	tangential
твердый	solid, rigid
текучесть	fluidity
тележка	small cart, truck
тело	body
тело отсчета	*reference body*
температура	temperature
температурный	temperature
тень	shadow
теория	theory
тепло	heat
тепловой	caloric, thermic

теплоемкость	heat capacity
теплопередача	heat transmission
теплота	heat
теплый	warm
термодинамика	thermodynamics
термодинамический	thermodynamics
терять	lose
тесла	tesla
течение	flow, current
течь	flow, stream
тихий	calm, quiet
ток	current
тонкий	thin
топливо	fuel
тормозить	apply the brake, brake
точечный	dotty
точечный заряд	*dotty charge*
точечный источник	*point source*
точка	point
траектория	trajectory
трансформатор	transformer
трение	friction
треугольная призма	triangular prism
треугольник	triangle
трубка	tube
тяготение	gravity, gravitation
тяжесть	heaviness, weight
У	
убедить(ся)	convince, make sure
увеличение	magnification, increase
увеличенный	enlarged
увеличивать(ся), увеличить (ся)	enlarge, increase, magnify
угловой	angular
угол	angle
угол дифракции	*angle of diffraction*
угол зрения	*angle of view*
угол наклона	*slope angle, angle of inclination*
угол отражения	*angle of reflection*
угол падения	*angle of incidence*

угол преломления	*angle of refraction*
предельный угол	*critical angle*
удар	impact, knock
удельный	specific
удельное сопротивление	*specific resistance*
удельная теплоемкость	*specific capacity*
удобный	comfortable, convenient
ультрафиолетовый	ultraviolet
уменьшаться (уменьшится)	decrease, diminish, reduce
уменьшение	diminution, decrease
уменьшенный	diminished, reduced
уметь	can, be able, know
умножать (умножить)	multiply
умножение	multiplication
универсальный	universal, multipurpose
упорядоченный	well-regulated, arrange, well-ordered
упругий	elastic
упругость	elasticity
уравнение	equation
уравновешенный	well-balanced, equalized
уравновешивать	balance
уровень	level
ускорение	acceleration
ускоренно	increasing velocity
ускоренный	accelerated
ускорять(ся)	accelerate
усиление	amplification, reinforcement, strengthening, intensification
усиливать(ся)	become stronger, reinforce, intensify
условие	condition
условие задачи	*task, problem*
упасть (пасть, падать)	fall, drop, sink
участок	part, section
участок цепи	*part of chain*
учитывать (учесть)	take into account, take into consideration
Ф	
фаза	phase, stage
одинаковая фаза	*identical phase, the same phase*
противофаза	*opposite phase*

фазовый	phase
Фарада	Farad
ферромагнетик	ferromagnetic
физика	physics
физик	physicist
физический	physical
фиолетовый	violet
фокальная плоскость	focal plane
фокус	focus
фокус мнимый	*imaging (virtual) focus*
фокус действительный	*real focus*
фокус побочный	*additional, secondary focus*
фокусное расстояние	*focal distance*
форма	form
формула	formula
фотографировать(ся)	take picture, photograph
фотография	photo, picture
фотолюминесценция	photoluminescence
фотон	photon
фототок	photocurrent
фотохимическое превращение	photochemical transformation
фотоэлектрический эффект	photoelectric effect
фотоэлемент	photocell
функция	function
Х	
хаос	chaos
хаотический	chaotic
характеризовать(ся)	characterize
характеристика	characterization
ход	motion, run
холодный	cold
хрусталик (глаза)	crystalline lens
Ц	
цвет	color
центр	centre
центральный	central
центростремительный	centripetal
цепь	chain
циклический	cyclic

Ч

час	hour
часовой	per hour
частица	particle, fraction
частный (случай)	particular, local
частота	frequency
часть	part
часы (мех.)	watch, clock
через	over
чёткий	clear-cut, well-defined
чётко	clearly
чёткость изображения	clearness of image
численный	numerical
число	number

Ш

шар	ball, balloon, sphere
широта	latitude
шкала	scale
шнур	cord, line
штрих (для дифрак. решетки)	diffraction line

Щ

щель	slit

Э

экватор	equator
эквивалентный	equivalent
эквипотенциальная поверхность	equipotential surface
экран	screen
эксперимент	experiment
экспериментальный закон	*experiment law*
электризация	electrization
электризовать(ся)	electrify
электрический	electric
электрическая дуга	*voltaic arc*
электрическая искра	*electric spark*
электрическая лампочка	*lamp, bulb*
электрическая постоянная	*electric constant*
электрический ток	*electric current*
электрическое поле	*electric field*
электричество	electricity

электродвижущая сила	electromotive force
электродинамика	electrodynamics
электроемкость (емкость)	capacity
электролиз	electrolysis
электромагнитный	electromagnetic
электрон	electron
электроскоп	electroscope
электростатика	electrostatics
электростатический	electrostatic
элементарный	elementary
энергия	energy
Ю	
юг	South
Я	
явление	phenomenon
ядро	nucleus

Дополнительная литература

1. *Американцев А.А., Афанасьев С.Б., Бубликов С.В., Сашов С.Н.* Краткий справочник по физике. – СПб.: Питер, 2007. – 352 с.: ил.

2. *Богатин А.С.* Пособие для подготовки к единому государственному экзамену и централизованному тестированию по физике. – Ростов н/Д: Феникс, 2003. – 416 с.

3. *Касаткина И.Л.* Мы повторяем физику. В 2-х томах. – Ростов н/Д.: Издательство «Феникс», 1996. – 480 с.

4. *Павленко Ю.Г.* Физика. Полный курс для школьников и поступающих в вузы: Учеб. пособие. – М.: Большая Медведица, 2001. – 576 с.: ил.

5. *Трофимова Т.И.* Курс физики с примерами решения задач. В 2–х томах. Т.1.: учебник / Т.И. Трофимова, А.В. Фирсов. – М.: КНОРУС, 2010. – 584 с.

6. *Трофимова Т.И.* Курс физики с примерами решения задач. В 2–х томах. Т.2.: учебник / Т.И. Трофимова, А.В. Фирсов. – М.: КНОРУС, 2010. – 384 с.

7. *Трофимова Т.И.* Физика 7–11 кл.: теория и задачи / Т.И. Трофимова. – М.: ООО Издательский дом «Оникс 21 век»: ООО Издательство «Мир и образование», 2005. – 416 с.: ил.

8. *Яворский Б.М., Детлаф А.А.* Физика: для школьников старших классов и поступающих в вузы: Учеб. пособие. – М.: Дрофа, 2001. – 800 с.: ил.

Содержание

Учебное издание

КРАВЧЕНКО Надежда Степановна

ПРОПЕДЕВТИЧЕСКИЙ КУРС ФИЗИКИ ДЛЯ ИНОСТРАННЫХ СТУДЕНТОВ

Учебник

Издано в авторской редакции

Научный редактор доктор физ.-мат. наук, профессор В.Ф. Пичугин
Дизайн обложки И.О. Фамилия

Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии с качеством предоставленного оригинал-макета

Подписано к печати __.__.2013. Формат 60х84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл.печ.л. 32,61. Уч.-изд.л. 29,53.
Заказ . Тираж _____ экз.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008

ИЗДАТЕЛЬСТВО ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru