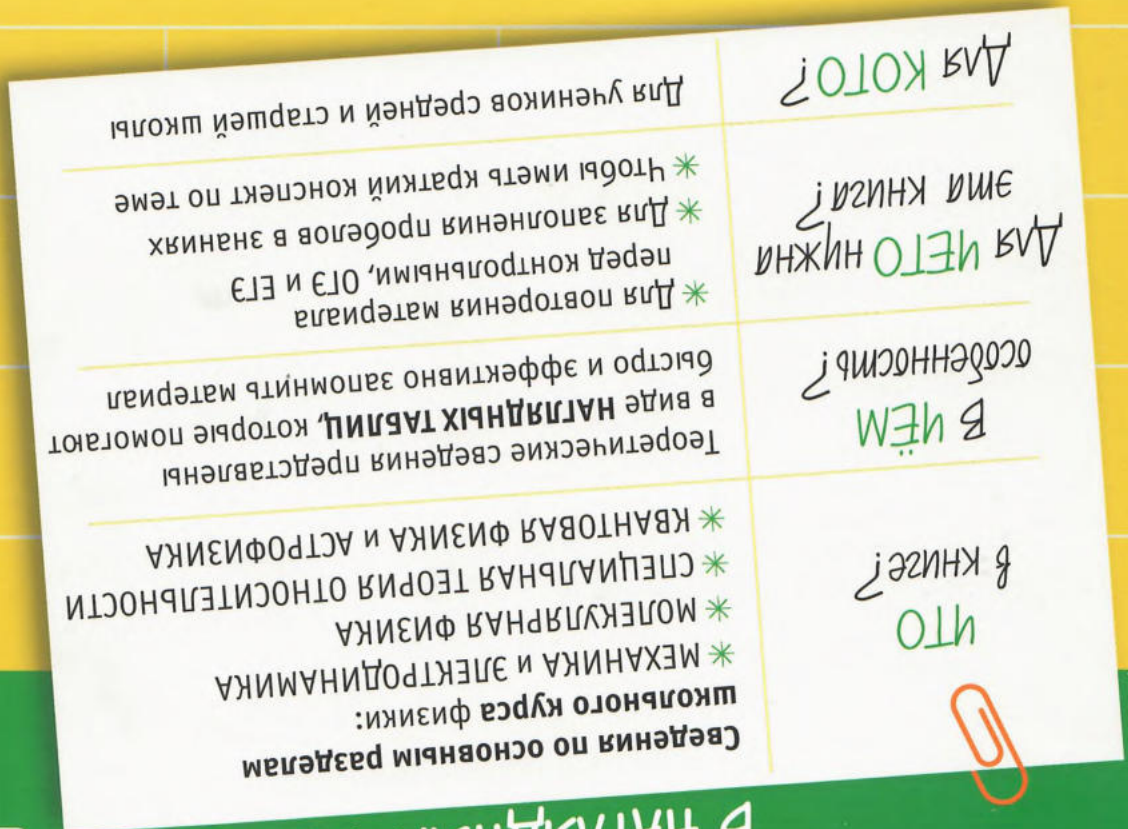




ФИЗИКА

ШКОЛЬНЫЙ КУРС
В НАГЛЯДНЫХ ТАБЛИЦАХ

ШКОЛЬНЫЙ КУРС
ФИЗИКА
В НАГЛЯДНЫХ ТАБЛИЦАХ

ШКОЛЬНЫЙ КУРС В НАГЛЯДНЫХ ТАБЛИЦАХ

ФИЗИКА

Законы

Понятия

Формулы



7-11
КЛАССЫ



ШКОЛЬНЫЙ КУРС В НАГЛЯДНЫХ ТАБЛИЦАХ

С. В. ВАХНИНА, К. Г. ЧЕРЕПОВА

ФИЗИКА: **7-11 КЛАССЫ**




Москва
2023

УДК 373.5:53
ББК 22.3я721
В22

Макет подготовлен при содействии ООО «Айдиономикс»

Вахнина, Светлана Васильевна.

В22 Физика: 7–11 классы / С. В. Вахнина, К. Г. Черепова. — Москва : Эксмо, 2023. — 224 с. — (Школьный курс в наглядных таблицах).

ISBN 978-5-04-179904-5

В пособии школьный курс физики представлен в виде наглядных таблиц, схем и рисунков, что заметно ускоряет и упрощает процесс усвоения материала. Использование таблиц в качестве опорного конспекта не даст школьникам запутаться в большом объеме информации и позволит без труда найти ответ на интересующий их вопрос.

Книга окажет помощь учащимся 7–11 классов при подготовке к контрольным и экзаменам ОГЭ и ЕГЭ, а также будет полезна учителям при организации работы на уроках.

УДК 373.5:53
ББК 22.3я721

ISBN 978-5-04-179904-5

© Вахнина С.В., Черепова К.Г., 2023
© ООО «Айдиономикс», 2023
© Оформление. ООО «Издательство
«Эксмо», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7	Сила трения	44
ФИЗИКА.....	8	Архимедова сила	46
Физические явления и термины	8	Статика	48
Измерение физических величин	10	Основные понятия	48
Действия с векторами	12	Механизм	51
МЕХАНИКА.....	14	Гидростатика	52
Кинематика	15	Закон Паскаля и его проявление	53
Материальная точка	16	Законы сохранения	55
Основные термины кинематики	18	Основные понятия	55
Относительность движения	19	Импульс	56
Равномерное прямолинейное движение тела	20	Механическая работа	57
Равноускоренное движение	22	Геометрический смысл работы силы	59
Изменение кинематических величин	22	Механическая энергия	60
Движение под действием силы тяжести	24	Изменение механической энергии	61
Криволинейное движение	28	Закон сохранения энергии	62
Динамика	30	Механические колебания и волны	63
Сила	30	Механические колебания	63
Явление инерции, инертность	32	Величины, характеризующие колебательное	
Принцип суперпозиции сил	33	движение	64
Законы Ньютона	33	Графики изменения физических величин	
Сила тяжести, ускорение свободного падения... 37		при гармонических колебаниях	66
Движение небесных тел и искусственных		Маятники	67
спутников	38	Волны	68
Различия силы тяжести и веса тела	39	Основные характеристики механических волн ...	70
Перегрузка и невесомость	40	Звук	71
Сила упругости	41	Свойства механических волн	72
		МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА	74

Молекулярно-кинетическая теория.....	74
Основные положения МКТ	74
Химические характеристики вещества.....	75
Агрегатное состояние вещества	76
Тепловое движение атомов и молекул вещества	76
Характеристика идеального газа.....	77
Основное уравнение МКТ	78
Уравнение состояния идеального газа	79
Закон Дальтона для давления смеси разреженных газов	80
Изопроцессы в разреженном газе.....	80
Насыщенные и ненасыщенные пары	82
Влажность воздуха	82
Изменение агрегатных состояний вещества	83
Преобразование энергии в фазовых переходах	85
Термодинамика	86
Тепловое равновесие и температура.....	86
Шкалы температур	87
Внутренняя энергия.....	88
Способы изменения внутренней энергии.....	89
Теплопередача.....	89
Количество теплоты, удельная теплоёмкость вещества	90
Элементарная работа в термодинамике.....	92
Графическое определение работы	93
Первый закон термодинамики.....	94
Термодинамика изопроцессов	95
Второй закон термодинамики	96
Принцип действия тепловых машин. КПД	97

Основные формулы.....	97
Тепловые двигатели. Принцип работы	98
ЭЛЕКТРОДИНАМИКА.....	99
Электрическое поле.....	99
Электризация тел и её проявление.....	99
Электрический заряд	100
Элементарный электрический заряд	101
Действие электрического поля на электрические заряды	102
Закон Кулона	102
Электрическое поле	104
Напряжённость электрического поля.....	104
Поле точечного заряда. Картины линий полей.....	106
Энергия и потенциал электростатического поля.....	107
Проводники, диэлектрики и полупроводники....	108
Емкость	109
Конденсатор	109
Виды конденсаторов.....	110
Соединение конденсаторов.....	111
Энергия заряженного конденсатора.....	112
Законы постоянного тока.....	113
Характеристики тока.....	114
Электрическое сопротивление	115
Источники тока.....	116
ЭДС и внутреннее сопротивление источника тока	118
КПД источника тока	119

Закон Ома для полной электрической цепи.....	119
Соединение источников тока	121
Закон Ома для неоднородного участка цепи.....	121
Соединение проводников.....	122
Работа и мощность электрического тока.....	122
Магнитное поле.....	123
Основные свойства магнитного поля.....	124
Вектор магнитной индукции.....	125
Силовые линии магнитного поля	127
Сравнение магнитного и электрического полей.....	128
Сила Ампера, её направление и величина	129
Сила Лоренца, её направление и величина	131
Электромагнитная индукция.....	133
Поток вектора магнитной индукции.....	133
Явление электромагнитной индукции	134
ЭДС индукции.....	135
Правило Ленца.....	136
Вихревое электрическое поле	138
Вихревые токи	139
Индуктивность.....	140
Направление тока самоиндукции	141
Аналогия между самоиндукцией и инерцией ...	142
Соединение катушек индуктивности.....	143
Энергия магнитного поля катушки с током	143
Электромагнитные колебания и волны	144
Колебательный контур	144
Сравнение механических и электромагнитных колебаний.....	147

Свободные электромагнитные колебания в идеальном колебательном контуре.....	148
Вынужденные электромагнитные колебания	150
Резонанс.....	151
Переменный ток.....	152
Трансформатор.....	155
Электромагнитные волны и их характеристики	157
Применение электромагнитных волн в технике и быту.....	159
Оптика	160
Прямолинейное распространение света.....	160
Основные законы геометрической оптики	162
Фотометрия.....	163
Сила света различных источников	165
Освещённость	165
Яркость.....	166
Законы отражения и преломления света.....	167
Ход луча через треугольную призму.....	170
Плоское зеркало	170
Изображение в плоском зеркале	171
Сферическое зеркало.....	172
Дисперсия	173
Линзы	174
Виды линз по внешней форме	175
Формула тонкой линзы	177
Виды изображений в тонкой линзе.....	177
Собирающая линза	178
Рассеивающая линза	179
Интерференция света.....	180

Условия наблюдения максимумов и минимумов в интерференционной картине от двух синфазных когерентных источников.....	182	Планетарная модель атома.....	202
Просветление оптики.....	183	Постулаты Бора.....	203
Дифракция света.....	184	Линейчатые спектры.....	205
Принцип Гюйгенса — Френеля.....	185	Закономерности излучения атомов.....	206
Дифракционная решётка.....	186	Лазер.....	207
Дисперсия света.....	187	Физика атомного ядра.....	208
СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ.....	188	Нуклонная модель ядра Гейзенберга — Иваненко.....	208
Основные понятия специальной теории относительности.....	188	Энергия связи нуклонов в ядре.....	210
Принцип относительности Эйнштейна.....	189	Радиоактивность.....	211
Следствия постулатов Эйнштейна.....	189	Основные виды излучений различной физической природы.....	211
Энергия свободной частицы. Импульс частицы.....	190	Закон радиоактивного распада.....	213
КВАНТОВАЯ ФИЗИКА.....	191	Ядерные реакции.....	214
Корпускулярно-волновой дуализм.....	191	Деление тяжёлых ядер.....	214
Гипотеза Планка о квантах.....	192	АСТРОФИЗИКА.....	215
Фотоны.....	192	Солнечная система.....	215
Фотоэффект.....	193	Единицы измерения.....	216
Опыты А. Г. Столетова.....	194	Небесная механика.....	217
Законы фотоэффекта.....	195	Законы Кеплера.....	217
Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.....	197	Основные формулы небесной механики.....	218
Волновые свойства частиц.....	198	Малые тела Солнечной системы.....	219
Корпускулярно-волновой дуализм.....	200	Звёзды и галактики.....	220
Дифракция электронов на кристаллах.....	200	Классификация звёзд.....	222
Давление света.....	201	Жизненный цикл звёзд.....	223
Физика атома.....	202	Современные представления о происхождении и эволюции Солнца и звёзд.....	223

ВВЕДЕНИЕ

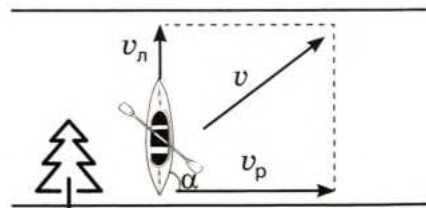
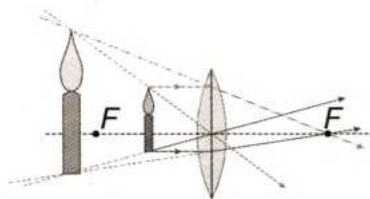
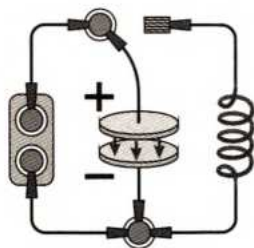
Данное пособие является помощником в изучении, систематизации и обобщении знаний по физике за курс средней школы. Материал представлен в наглядной и удобной для восприятия форме — в виде таблиц, что существенно упрощает его запоминание.

Обобщающий курс изложен последовательно — от простого к сложному. Книга содержит практически все изучаемые в школьной программе физические законы, определения, основные формулы, изложенные в разделах «Механика», «Молекулярная физика», «Электродинамика», «Специальная теория относительности», «Квантовая физика» и «Астрофизика».

Теоретический материал проиллюстрирован примерами, поясняющими рисунками и графиками, которые позволяют детально разобраться в темах школьного курса и отработать навыки выполнения различных заданий.

Пособие предназначено для учащихся средней школы при самоподготовке к различным видам контроля, основному и единому государственному экзаменам, а также для учителей физики.

Желаем успехов!



ФИЗИКА



Физика — наука о наиболее общих закономерностях, определяющих строение и развитие окружающего мира. **Задача физики** — открывать и изучать законы, которые связывают различные физические явления, происходящие в природе.

ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ТЕРМИНЫ



Физические явления — изменения в природе при сохранении состава вещества.

Виды физических явлений	Примеры
Механические	Движение и деформация тел
Оптические	Отражение светового луча, радуга
Магнитные	Притяжение булавок к магниту, северное сияние
Тепловые	Таяние снега, работа двигателя машины
Акустические	Шелест листьев, УЗИ в медицине, технике
Электрические	Удар молнии, электризация тел
Атомные	Процессы внутри звёзд, работа атомного реактора



Способы изучения физических явлений: **наблюдение** как один из источников физических знаний, **опыт** (гипотеза, практический эксперимент, выводы). Опыты проводятся с определённой целью по заранее составленному плану, при этом выполняются измерения.

Термин	Определение, примеры
Физическое тело	Любое из окружающих нас тел. ✓ Трактор, капля воды, мяч, Солнце
Вещество	Особый вид материи, из которой состоит тело. ✓ Железо, вода, резина, гелий
Материя	Всё, что реально существует во Вселенной независимо от наших знаний о нём. ✓ Вещество, свет, радиоволны
Физическая величина	Характеристика одного из свойств физического тела, явления, процесса. ✓ Скорость, время, масса, температура
Единица измерения физической величины	Физическая величина, которой условно присвоено числовое значение, равное 1, применяемая для количественного выражения однородных с ней физических величин
Основные единицы измерения	Длина — 1 м (метр), время — 1 с (секунда), масса — 1 кг (килограмм), температура — 1 К (кельвин), сила тока — 1 А (ампер), давление света — 1 кд (кандела), количество вещества — 1 моль
Производные единицы измерения	Сила — 1 Н (ньютон), давление — 1 Па (паскаль), заряд — 1 Кл (кулон)

ИЗМЕРЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Измерить физическую величину — значит сравнить её с однородной физической величиной, принятой за единицу.

Параметр	Определение	Примеры
Прямое измерение физической величины	Позволяет получить искомое значение физической величины с использованием приборов	Длина — линейка, время — секундомер, скорость — спидометр, напряжение — вольтметр
Цена деления прибора	Показывает, какому значению величины соответствует самое малое деление шкалы	Разность двух ближайших числовых значений на числовой шкале разделить на количество делений между ними.  Цена деления: $\frac{10-0}{10} = \frac{10}{10} = 1 \text{ см}$
Погрешность измерения прибора	Равна половине цены деления измерительного прибора (если нет иных указаний, как, например, равна цене деления прибора): $A = a \pm \Delta a,$ где A — измеряемая величина, a — результат измерения, Δa — погрешность измерения	$16,0 \pm 0,5 \text{ (см)}$ — погрешность равна половине цены деления прибора. $16 \pm 1 \text{ (см)}$ — погрешность равна цене деления прибора

Десятичные приставки к названиям единиц измерения

Типы приставок	Обозначение (наименование)	Множитель (пример)
Кратные приставки — увеличивают в 100, 1000 раз и т. д.	г (гекто) к (кило) М (мега) Г (гига)	10^2 (1 гПа = 100 Па) 10^3 (1 кг = 1000 г) 10^6 (1 МДж = 1 000 000 Дж) 10^9 (1 ГВт = 1 000 000 000 Вт)
Дольные приставки — уменьшают в 10, 100, 1000 раз и т. д.	д (деци) с (санти) м (милли) мк (микро) н (нано)	10^{-1} (1 дм = 0,1 м) 10^{-2} (1 см = 0,01 м) 10^{-3} (1 мг = 0,001 г) 10^{-6} (1 мкм = 0,000001 м) 10^{-9} (1 нм = 0,000000001 м)

Виды физических величин	Характеристика	Примеры
Скалярные величины	Характеризуются только численным значением	Время, масса, объём, плотность
Векторные величины	Кроме численного значения, характеризуются направлением в пространстве	Скорость, перемещение, ускорение, сила, импульс

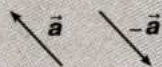


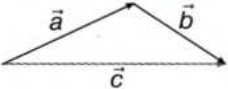
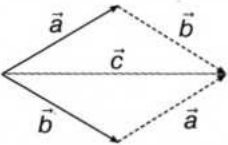
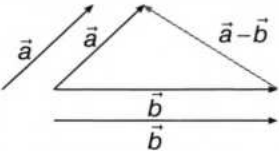
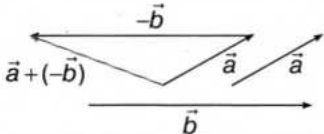
- Приставка пишется слитно с единицей, к которой она присоединяется.
- Не разрешается использовать две приставки и более, идущие друг за другом (запись вида «ммкм — миллимикрометр» некорректна).

ДЕЙСТВИЯ С ВЕКТОРАМИ

ПРОТИВОПОЛОЖНЫЕ ВЕКТОРЫ

Модули векторов равны, направления противоположны.



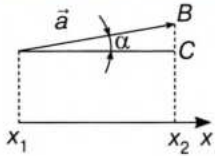
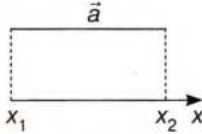
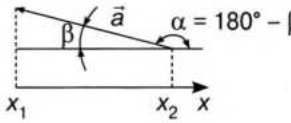
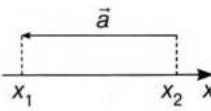
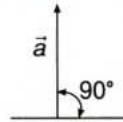
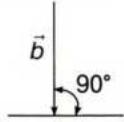
Действие	Правило	Выполнение
Сумма векторов	Правило треугольника	 $\vec{a} + \vec{b} = \vec{c}$
	Правило параллелограмма	 $\vec{a} + \vec{b} = \vec{c}$
Разность векторов	Правило треугольника	 $\vec{a} - \vec{b} = \vec{c}$
	Вычесть из вектора $\vec{a}$ вектор $\vec{b}$ — значит прибавить к вектору $\vec{a}$ вектор $-\vec{b}$	 $\vec{a} + (-\vec{b}) = \vec{c}$

ПРОЕКЦИЯ ВЕКТОРА

Проекция вектора на ось равна разности координат его конца и начала.

$$a_x = x_2 - x_1 = |\vec{a}| \cdot \cos \alpha, \quad a_y = y_2 - y_1 = |\vec{a}| \cdot \sin \alpha,$$

где α — угол, образованный вектором и осью координат

Определение проекции вектора на ось Ox	Пример
$a_x > 0$, если направление вектора совпадает с направлением оси Ox	 $a_x = \vec{a} \cos \alpha$  $a_x = \vec{a} $
$a_x < 0$, если вектор направлен в сторону, противоположную направлению оси Ox	 $a_x = - \vec{a} \cos \beta$  $a_x = - \vec{a} $
$a_x = 0$, если направление вектора перпендикулярно оси Ox	 $a_x = 0$  $b_x = 0$

МЕХАНИКА



Механика — раздел физики, изучающий законы движения и взаимодействие материальных тел (или частей тела). **Основная задача механики** — определение положения тела в любой момент времени.

Раздел механики	Что изучает	Пример
Кинематика	Способы математического описания движения тел	
Динамика	Причины возникновения движения	
Законы сохранения	Превращение одного вида энергии в другой	
Статика и гидростатика	Условия равновесия тел	
Механические колебания и волны	Причины возникновения и распространения колебаний в пространстве	

КИНЕМАТИКА



Кинематика изучает механическое движение тел и физические величины, характеризующие это движение, и не рассматривает причины, которыми вызвано такое движение. **Механическим движением** тела называют изменение его положения в пространстве относительно других тел с течением времени.

Классификация механического движения	Виды механического движения	Пример
По траектории	Прямолинейное	Тело движется вдоль прямой линии
	Криволинейное	Тело движется по окружности или дугам окружности
По скорости	Равномерное	Тело за любые равные промежутки времени проходит равные расстояния
	Неравномерное	Тело за равные промежутки времени проходит разные расстояния
По траектории точек тела	Поступательное	Все точки тела движутся одинаково
	Вращательное	Все точки тела движутся по окружностям, центры которых лежат на одной прямой (оси вращения)
	Колебательное	Повторяющийся во времени процесс около точки равновесия

Материальная точка

Модели	Примеры	
	Материальная точка	Не материальная точка
Тело, размерами (но не массой) которого в данных условиях можно пренебречь	Самолёт совершает перелёт Москва — Екатеринбург	Самолёт совершает разворот в небе
Тело, которое движется поступательно	Машина движется по прямолинейному участку дороги	Машина совершает поворот на перекрёстке



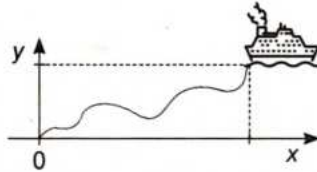
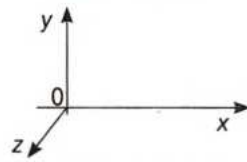
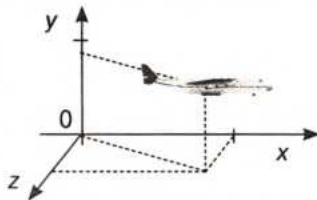
Система отсчёта — совокупность системы координат, связанной с телом отсчёта, и прибора для измерения времени (например, часов).



Тело отсчёта — произвольно выбранное тело, относительно которого определяется положение движущейся материальной точки (или тела).

✓ Дорога, машина, Земля



Система координат, связанная с телом отсчёта	Пример
Одномерная 	 Тело движется вдоль прямой (велосипедист, автомобиль на шоссе, лифт в шахте)
Двухмерная 	 Тело движется по плоскости (корабль в море, комбайн в поле)
Трёхмерная 	 Тело движется в пространстве (самолёт, подводная лодка)

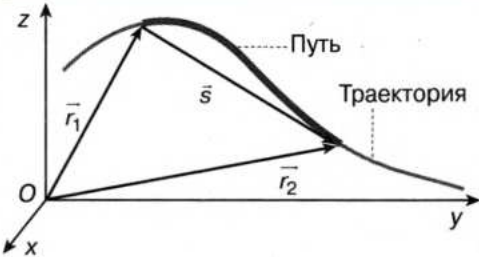


Инерциальные системы отсчёта (ИСО) — системы отсчёта, которые движутся равномерно и прямолинейно относительно друг друга.



Принцип относительности Галилея: все инерциальные системы равноправны. Это проявляется в том, что законы механики в них записываются одинаково.

Основные термины кинематики

Термины	Определения	Формулы, примеры
Радиус-вектор $\vec{r}$ (м)	Вектор, соединяющий начало координат с точкой, в которой находится тело	 $\vec{s} = \vec{r}(t_2) - \vec{r}(t_1) = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$
Перемещение $\vec{s}$ (м)	Вектор, соединяющий начальное и конечное положения материальной точки	
Траектория	Линия, которую описывает тело при движении	
Пройденный путь l (м)	Длина участка траектории, пройденного материальной точкой за данный промежуток времени	
Скорость материальной точки $\vec{v}$ (м/с)	Векторная величина, показывающая, какое перемещение совершило тело за единицу времени	$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}$
Мгновенная скорость $\vec{v}_{\text{мгн}}$ (м/с)	Скорость движения тела в данный момент времени	$\vec{v}_{\text{мгн}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t} = \vec{s}'_t = (v_x, v_y, v_z)$
Средняя (путевая) скорость $v_{\text{ср}}$ (м/с)	Скалярная величина, равная отношению пути к промежутку времени, за которое данный путь пройден	$v_{\text{ср}} = \frac{l}{t},$ где l — пройденный путь, t — время, затраченное на его прохождение. $v_{\text{ср}} = \frac{s_1 + s_2 + \dots + s_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}$

Ускорение $\vec{a}$ (м/с ²)	Характеризует быстроту изменения скорости по модулю и направлению	$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t},$ где $\vec{v}$ — конечная скорость тела, $\vec{v}_0$ — начальная скорость
---	---	--

Относительность движения

Виды физических величин	Определения	Примеры
Инвариантные	Неизменные физические величины при движении в разных системах отсчёта со скоростью, которая во много раз меньше скорости света	Время, масса, ускорение
Относительные	Физические величины, которые изменяются при переходе из одной инерциальной системы отсчёта в другую	Траектория, описываемая лопастью вертолётa, будет различной для пилота вертолётa и наблюдателей на земле 



При движении тела в двух системах отсчёта, движущихся относительно друг друга, его скорость относительно неподвижной системы отсчёта (СО) $\vec{v}$ равна векторной сумме скорости тела относительно подвижной СО ($\vec{v}_1$) и собственной скорости подвижной СО относительно неподвижной ($\vec{u}$).

Определение скорости и перемещения

Закон сложения скоростей

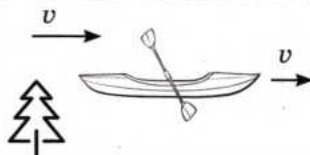
$$\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{u}$$

Закон сложения перемещений

$$\Delta \vec{r} = \Delta \vec{r}_1 + \Delta \vec{r}_0$$

Применение законов сложения скоростей и перемещения относительно берега при движении по реке

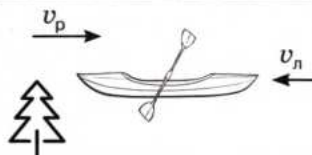
По течению реки



$$v = v_n + v_p$$

$$s = s_n + s_p$$

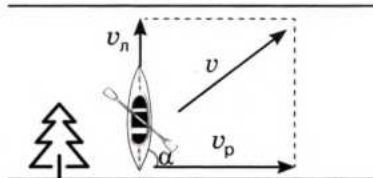
Против течения реки



$$v = v_n - v_p$$

$$s = s_n - s_p$$

Перпендикулярно к вектору скорости течения реки



$$v = \sqrt{v_n^2 + v_p^2}$$

$$s = \sqrt{s_n^2 + s_p^2}$$

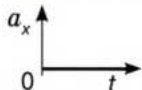
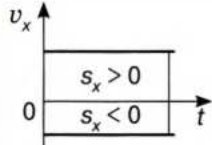
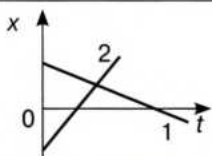
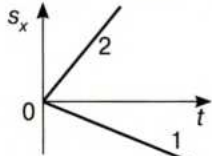
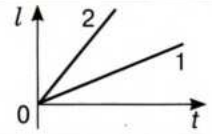
$$v = \sqrt{v_n^2 + v_p^2 - 2v_n v_p \cos \alpha}$$

где α — произвольный угол между векторами скорости лодки и скорости течения

Равномерное прямолинейное движение тела



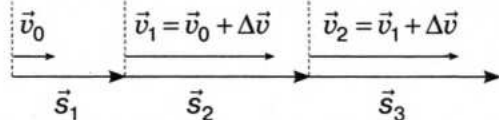
Равномерное прямолинейное движение тела — движение, при котором тело за любые равные промежутки времени проходит равные расстояния.

Физическая величина	Формула	График
Ускорение $\vec{a}$ (м/с ²)	$a_x = 0$	
Скорость $\vec{v}$ (м/с)	$v_x > 0$  $v_x < 0$  $v_x(t) = x'(t) = v_{0x} = \text{const}$	 Площадь фигуры, ограниченная графиком скорости и осью времени, численно равна перемещению тела за заданное время
Координата x (м)	$x(t) = x_0 + s_x = x_0 + v_{0x}t$	
Перемещение $\vec{s}$ (м)	$s_x = x - x_0$ $s_x = v_x t$	
Пройденный путь l (м)	$l = v_x t $	

Равноускоренное движение



Равноускоренное движение — движение, при котором скорость тела за любые равные промежутки времени увеличивается на одну и ту же величину.



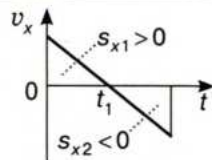
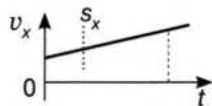
Закономерности равноускоренного движения	Схема	Математическая запись
Модули векторов перемещений, совершённых за последовательные равные промежутки времени, относятся как ряд нечётных чисел		$s_1 : s_2 : s_3 : s_4 \dots = 1 : 3 : 5 : 7 \dots$
При увеличении промежутков времени (отсчитываемых от начала движения) в целое число раз модули векторов перемещений относятся как ряд квадратов последовательных натуральных чисел		$s_1 : s_2 : s_3 : s_4 \dots = 1 : 4 : 9 : 16 \dots$

Изменение кинематических величин

Физическая величина, формула	Графики	
	Равноускоренное движение $\vec{v}_0 \uparrow \vec{a}, \vec{v}_0 \uparrow OX$	Равнозамедленное движение $\vec{v}_0 \downarrow \vec{a}, \vec{v}_0 \uparrow OX$
Ускорение $\vec{a}$ (м/с ²) $a_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v_x}{\Delta t} = (v_x)'_t = \text{const}$		

Скорость $\vec{v}$ (м/с)

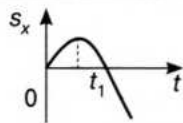
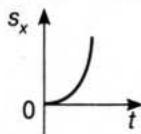
$$v_x(t) = v_{0x} + a_x t$$



Площадь фигуры, ограниченная графиком скорости и осью времени, численно равна перемещению тела за заданное время

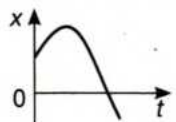
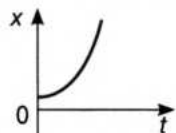
Перемещение $\vec{s}$ (м)

$$s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$$

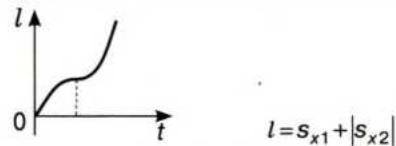
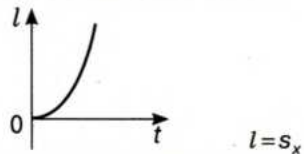


Координата x (м)

$$x(t) = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$$



Пройденный путь l (м)



Для определения пути (со сменой направления движения) нужно найти сумму перемещений (перемещения до остановки и модуля перемещения после остановки)

Движение под действием силы тяжести

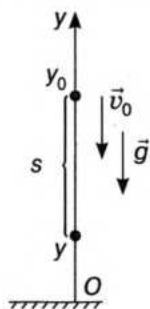


Свободное падение — движение тела под действием только силы тяжести (все остальные силы либо отсутствуют, либо уравновешивают друг друга). Это не только движение вниз (падение тела), но и любое движение тела под действием силы тяжести: брошенного как вертикально вверх или вниз, так и под любым углом к горизонту.



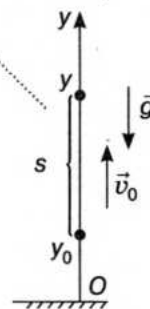
Движение тела, брошенного вертикально

Направление начальной скорости тела совпадает с направлением ускорения свободного падения (тело брошено вниз)

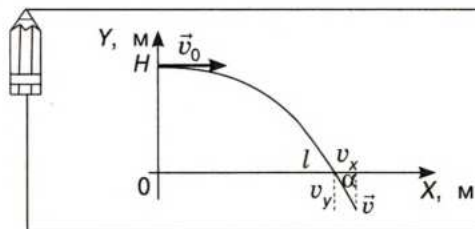


y_0 , y — начальная и конечная координаты, $\vec{v}_0$ — начальная скорость тела, $\vec{g}$ — ускорение свободного падения, s — модуль перемещения тела

Направление начальной скорости тела противоположно направлению ускорения свободного падения (тело брошено вверх)



Физическая величина	Кинематические уравнения при движении тела, брошенного вниз $\vec{v}_0 \uparrow \uparrow \vec{g}, \vec{v}_0 \downarrow \uparrow OY$	Кинематические уравнения при движении тела, брошенного вверх $\vec{v}_0 \uparrow \downarrow \vec{g}, \vec{v}_0 \uparrow \uparrow OY$
Ускорение свободного падения	$g_y = -g = -9,8 \text{ м/с}^2 \approx -10 \text{ м/с}^2$	$g_y = -g = -9,8 \text{ м/с}^2 \approx -10 \text{ м/с}^2$
Скорость	$v_y(t) = v_{0y} + g_y t = -v_0 - gt$	$v_y(t) = v_{0y} + g_y t = v_0 - gt$
Координата	$y(t) = y_0 + v_{0y} t + \frac{g_y t^2}{2} = y_0 - v_0 t - \frac{gt^2}{2}$	$y(t) = y_0 + v_{0y} t + \frac{g_y t^2}{2} = y_0 + v_0 t - \frac{gt^2}{2}$

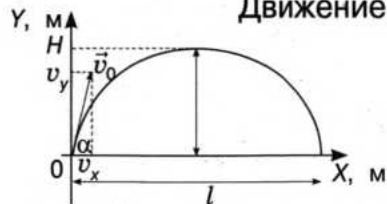


Движение тела, брошенного горизонтально

$\vec{v}_0$ — начальная скорость тела, l — дальность полёта, H — высота, с которой бросили тело, α — угол, под которым тело падает на землю

Физическая величина	Проекция физической величины на ось Ox	Проекция физической величины на ось Oy
Ускорение	$a_x = 0$	$g_y = -g$
Скорость	$v_x(t) = v_0 = \text{const}$	$v_y(t) = v_{0y} + g_y t = -gt$
Координата тела	$x(t) = x_0 + v_x t = x_0 + v_0 t$	$y(t) = y_0 + v_{0y} t + \frac{g_y t^2}{2} = H - \frac{gt^2}{2}$

Физическая величина	Формула
Модуль вектора скорости при падении тела	$ \vec{v} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_0^2 + (gt)^2}$
Угол между вектором скорости и горизонтом в момент времени t	$\alpha = \arctg\left(\frac{v_y}{v_x}\right) = \arctg\left(\frac{gt}{v_0}\right)$
Время полёта	$t = \sqrt{\frac{2H}{g}}$
Дальность полёта	$l = v_0 t = v_0 \sqrt{\frac{2H}{g}}$



Движение тела, брошенного под углом к горизонту

$\vec{v}_0$ — начальная скорость тела, v_x и v_y — проекции начальной скорости на оси координат, α — угол наклона начальной скорости к оси Ox , l — дальность полёта, H — максимальная высота подъёма



Максимальная дальность полёта достигается при броске тела под углом 45° .

Физическая величина	Проекция физической величины на ось Ox	Проекция физической величины на ось Oy
Ускорение	$a_x = 0$	$g_y = -g$
Проекция вектора скорости	$v_x = v_0 \cos \alpha = \text{const}$	$v_y = v_{0y} + g_y t = v_0 \sin \alpha - gt$
Координата	$x(t) = x_0 + v_{0x} t = x_0 + v_0 \cos \alpha \cdot t$	$y(t) = y_0 + v_{0y} t + \frac{g_y t^2}{2}$ $y(t) = y_0 + v_0 \sin \alpha \cdot t - \frac{gt^2}{2}$

Физическая величина	Формула
Время падения (подъёма)	$t_{\text{пад}} = t_{\text{под}} = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}$
Время полёта	$t = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}$
Высота подъёма	$H = \frac{gt_{\text{пад}}^2}{2} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}$
Дальность полёта	$l = v_{0x} t = v_0 \cos \alpha \cdot t$ $l = v_x t = \frac{v_0 \cos \alpha \cdot 2v_0 \sin \alpha}{g} = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}$

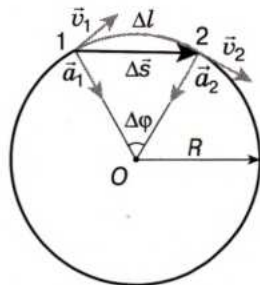
Криволинейное движение



Криволинейное движение тела — комбинация движения по прямолинейным участкам и дугам окружностей разных радиусов.



Движение материальной точки по окружности из точки 1 в точку 2 с постоянной по модулю скоростью:



R — радиус окружности, $\Delta\varphi$ — угол поворота, Δl — пройденный путь (длина пути), $\Delta\vec{s}$ — перемещение точки (хорда окружности), $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$ — линейные скорости, $\vec{a}_1$ и $\vec{a}_2$ — ускорения тела.



Ускорение тела, движущегося по криволинейной траектории (окружность или дуга окружности), всегда отлично от нуля.

Физическая величина	Определение	Формула
Ускорение $\vec{a}$ (м/с ²)	Векторная сумма нормального и тангенциального ускорений тела	$\vec{a} = \vec{a}_n + \vec{a}_\tau$
Центростремительное (нормальное) ускорение $\vec{a}_n$ (м/с ²)	Ускорение, возникающее при любом движении по окружности (либо дуге окружности), направлено к центру окружности (перпендикулярно вектору скорости)	$a_n = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R$
Тангенциальное (линейное) ускорение $\vec{a}_\tau$ (м/с ²)	Ускорение, характеризующее изменение модуля линейной скорости, направлено вдоль вектора скорости	$a_\tau = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{v - v_0}{\Delta t}$
Период T (с)	Время одного полного оборота	$T = \frac{2\pi R}{v}$
Частота ν (Гц, с ⁻¹)	Количество оборотов в единицу времени	$\nu = \frac{1}{T}$
Линейная скорость $\vec{v}$ (м/с)	Скорость, с которой точка движется по окружности, всегда направлена по касательной к окружности (либо к дуге окружности)	$v = \omega R, v = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi R \nu$
Угловая скорость ω (рад/с)	Характеристика быстроты угла поворота радиус-вектора	$\omega = \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}, \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \nu$

ДИНАМИКА

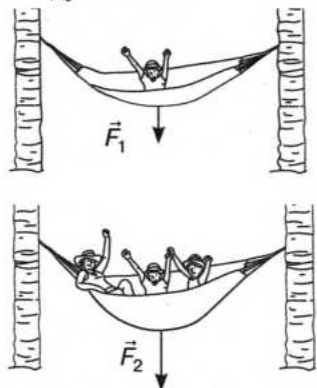
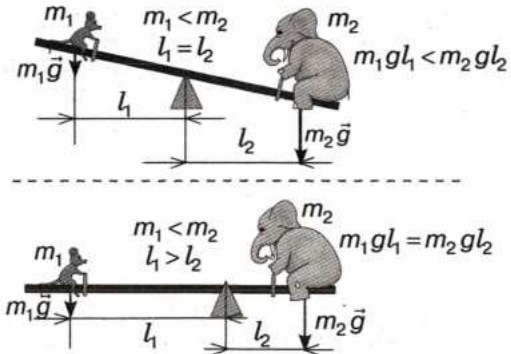


Динамика изучает законы движения тел в зависимости от действующих на них сил.

Сила



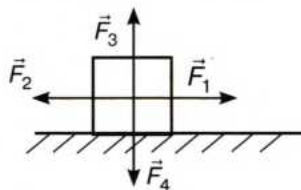
Сила $\vec{F}$ (Н) — векторная величина, характеризующая воздействие одного тела на другое (или воздействие внешнего поля на тело).

Характеристики, влияющие на результат действия силы	Результат действия силы
• Модуль силы  • Направление действия силы. • Точка приложения вектора силы 	• Изменение скорости тела (динамическое действие).  • Деформация тела (статическое действие) 



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

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



Классификация сил	Виды сил	Примеры
По природе	Гравитационные	Сила тяжести, сила тяготения
	Электромагнитные	Сила упругости, сила трения
	Ядерные	Слабое взаимодействие
По действию	На расстоянии	Сила тяжести, сила магнитного взаимодействия
	При соприкосновении	Сила трения, сила упругости
По направлению воздействия	Внутренние	Силы, возникающие между телами в системе
	Внешние	Силы, действующие извне на тела системы



Изолированная система тел — система, в которой действуют только внутренние силы (отсутствует взаимодействие с внешними телами).

Явление инерции, инертность



Инертность — свойство тела в большей или меньшей степени препятствовать изменению своей скорости относительно инерциальной системы отсчёта при воздействии на него внешних сил.

Физическая величина	Определение
Масса тела m (кг)	Мера инертности, собственная характеристика тела, не зависящая от его движения
Плотность вещества ρ (кг/м ³)	Для тела из однородного вещества массой m и объёмом V определяется как $\rho = \frac{m}{V}$



Явление инерции — явление сохранения скорости, если на него не действуют другие тела или действие тел скомпенсировано (равномерное прямолинейное движение либо покой).

Инерциальное движение	Не инерциальное движение
Пузырёк воздуха равномерно поднимается в жидкости (модуль и направление вектора скорости не меняются)	Спортсмен разбегается и, оттолкнувшись, совершает прыжок в длину (модуль и направление вектора скорости меняются)

Принцип суперпозиции сил

Определение	Векторный способ	Координатный способ
Если на тело действует несколько сил, то равнодействующую сил находят как векторную сумму всех сил, действующих на тело: $\vec{F}_{\text{равн}} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$		$Ox: F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} + F_{4x} = F_{\text{равн. } x}$ $Oy: F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} + F_{4y} = F_{\text{равн. } y}$ $F = \sqrt{F_{\text{равн. } x}^2 + F_{\text{равн. } y}^2}$

Законы Ньютона

ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

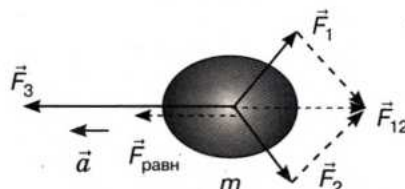
Существуют такие системы отсчёта, относительно которых тело движется прямолинейно и равномерно или покоится, если на него не действуют другие тела или действие тел скомпенсировано. Такие системы называются инерциальными системами отсчёта (ИСО).

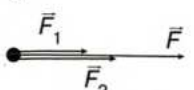
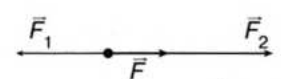
Тело покоится	Тело движется равномерно и прямолинейно
$\vec{N} + m\vec{g} = 0$ $\vec{T} + m\vec{g} = 0$	$\vec{F}_{\text{сопр}} + \vec{F}_{\text{тяги}} + \vec{N} + m\vec{g} = 0$ $\vec{F}_{\text{сопр}} + m\vec{g} = 0$

ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

В инерциальной системе отсчёта материальная точка постоянной массы m под действием силы $\vec{F}$ (равнодействующей сил, приложенных к телу) движется с ускорением.

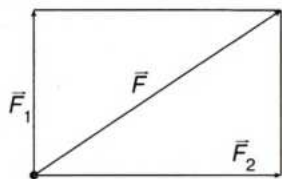
$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$$

Вывод	Свойства
Направление ускорения всегда совпадает с направлением силы: $\vec{a} \uparrow \vec{F}$ 	Ускорение, сообщаемое телу при одновременном действии на него нескольких сил, равно векторной сумме всех ускорений, которые сообщила бы этому телу каждая сила по отдельности: $\vec{a} = \vec{a}_1 + \vec{a}_2 + \vec{a}_3$

Сложение двух сил, направленных вдоль одной прямой	
В одном направлении	В противоположных направлениях
$\vec{F}_1 \uparrow \vec{F}_2, F = F_1 + F_2$ 	$\vec{F}_1 \uparrow \vec{F}_2, F = F_1 - F_2 $ 

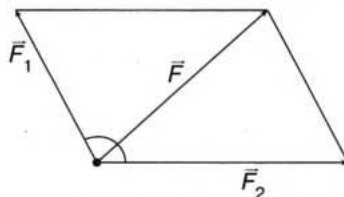
Сложение двух сил, направленных под углом друг к другу

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



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

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

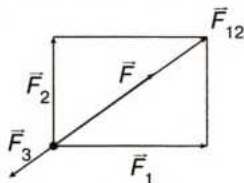


$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 - 2F_1 \cdot F_2 \cdot \cos \alpha}$$

Сложение трёх сил и более

Векторный способ

Используя правила сложения векторов (правило треугольника и параллелограмма):

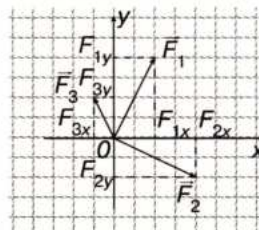


$$\vec{F}_{12} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

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

Координатный способ

Используя правило сложения проекций:



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

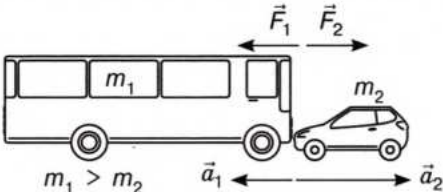
$$Oy: F_y = F_{1y} + F_{2y} + F_{3y}$$

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

ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

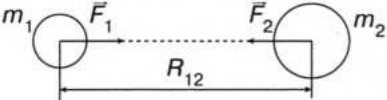
Для материальных точек: силы воздействия материальных точек друг на друга равны по модулю и противоположны по направлению.

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

Закон природы	Свойства
Ускорения, полученные при взаимодействии двух тел, обратно пропорциональны их массам: $\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}$ 	Данные силы: • направлены вдоль одной прямой; • имеют одну природу; • приложены к разным телам (не подлежат сложению)



Закон всемирного тяготения: все массивные тела притягиваются друг к другу с силой, модуль которой прямо пропорционален произведению их масс и обратно пропорционален квадрату расстояния между ними.

Формула	Условия применимости
$F = G \frac{m_1 m_2}{R_{12}^2},$ где m_1, m_2 — массы тел, R_{12} — расстояние между центрами масс тел, $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$ — гравитационная постоянная	Выполняется для материальных точек и сферических тел.  Данные силы лежат на одной прямой, соединяющей центры масс этих тел, и направлены навстречу друг другу

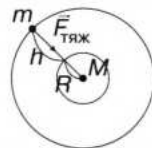
Сила тяжести, ускорение свободного падения



Сила тяжести — равнодействующая гравитационных сил, приложенных к телу. Сила тяжести возникает в результате притяжения Земли и направлена вниз, к центру Земли.

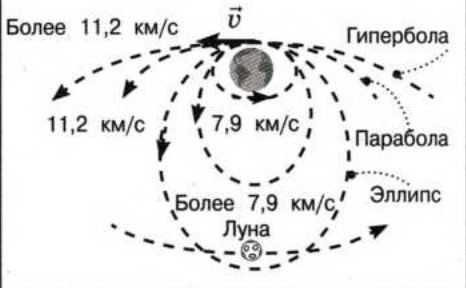


В формулах используются следующие физические величины: G — гравитационная постоянная, m — масса тела, g — ускорение свободного падения на поверхности планеты, R — радиус планеты, M — масса планеты.

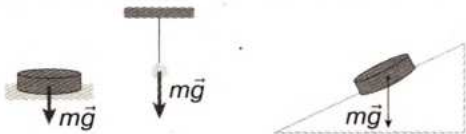


Физическая величина	Формулы, применимые для Земли	Формулы, применимые для любой планеты
Ускорение свободного падения g около поверхности планеты — ускорение, с которым движется любое тело в поле тяготения планеты, если на него действует только сила тяжести	$g = G \frac{M_3}{R_3^2}$	$g_{пл} = G \frac{M_{пл}}{R_{пл}^2}$
Зависимость силы тяжести от высоты h	$F_3 = G \frac{M_3 m}{(R_3 + h)^2}$	$F_{тяж. пл} = G \frac{M_{пл} m}{(R_{пл} + h)^2}$
Ускорение свободного падения на высоте h	$g' = G \frac{M_3}{(R_3 + h)^2}$	$g'_{пл} = G \frac{M_{пл}}{(R_{пл} + h)^2}$

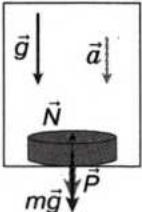
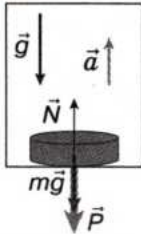
Движение небесных тел и искусственных спутников

Физическая величина	Определение	Формула, численное значение
Первая космическая скорость (круговая скорость) вблизи поверхности Земли 	Минимальная (для заданной высоты над поверхностью планеты) горизонтальная скорость, которую необходимо придать объекту, чтобы он совершал движение по круговой орбите вокруг планеты, не меняя высоты (объект становится искусственным спутником планеты)	$mg = G \frac{Mm}{R_0^2} = \frac{mv_{1к}^2}{R_0},$ $v_{1к}^2 = gR_0 = G \frac{M}{R_0},$ $v_{1к} = \sqrt{gR_0} = \sqrt{\frac{GM}{R_0}} \approx 7,91 \text{ км/с}$
Вторая космическая скорость (параболическая скорость)	Скорость, которую необходимо придать космическому аппарату, масса которого пренебрежимо мала по сравнению с массой планеты, для преодоления гравитационного притяжения планеты и покидания замкнутой орбиты вокруг неё (аппарат становится спутником Солнца)	$v_{2к} = \sqrt{2} \cdot v_{1к} = \sqrt{\frac{2GM}{R_0}} \approx 11,2 \text{ км/с}$
Третья космическая скорость	Скорость, при которой тело преодолевает притяжение Солнца и покидает пределы Солнечной системы	$v_{3к} \approx 16,7 \text{ км/с}$

Различия силы тяжести и веса тела

Параметры	Сила тяжести	Вес тела
Определение	Результирующая гравитационных сил, действующих на любое тело со стороны планеты Земля	Сила, с которой тело действует на опору или растягивает вертикальный подвес
Природа силы	Гравитационная (притяжение к Земле)	Электромагнитная (сила упругости тела)
Направление	 $m\vec{g}$ — сила тяжести. Направлена к центру Земли	 Направлена перпендикулярно опоре или вдоль подвеса
Точка приложения	Приложена к центру масс тела (см. рисунки выше). Действует на тело	Приложена к поверхности опоры или концу нити (см. рисунки выше). Действует на опору или подвес
От чего зависит приложение силы	Не изменяется вблизи поверхности Земли (незначительные изменения на экваторе и полюсах из-за эллиптической формы Земли)	Изменяется при движении тела с ускорением. При движении с ускорением вниз действие на опору уменьшается, при движении с ускорением вверх — увеличивается

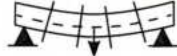
Перегрузка и невесомость

	Тело движется с ускорением вниз		Тело движется с ускорением вверх
Рисунок	 $m\vec{g}$ — сила тяжести, $\vec{P}$ — вес тела, $\vec{N}$ — сила реакции опоры, $\vec{g}$ — ускорение свободного падения, $\vec{a}$ — ускорение лифта		
Векторная запись второго закона Ньютона	$\vec{N} + m\vec{g} = m\vec{a}$		
Скалярная запись второго закона Ньютона	$mg - N = ma, \quad N = P = m(g - a)$		$-mg + N = ma, \quad N = P = m(g + a)$
Следствие	При движении тела с ускорением вниз сила реакции опоры и вес уменьшаются. При движении тела с ускорением, равным по модулю ускорению свободного падения ($a = g$), вес тела равен нулю: $P = m(g - g) = 0.$ В результате такого движения возникает невесомость — состояние тела, при котором оно движется только под действием силы тяжести		При движении тела с ускорением вверх сила реакции опоры и вес увеличиваются. В результате возникает перегрузка — увеличение веса тела, вызванное его ускоренным движением: $P = m(g + a) = m(g + ng) = Nmg,$ где $N = n + 1$. Часто перегрузку указывают в единицах ускорения свободного падения. Так, парашютист при раскрытии парашюта испытывает перегрузку до $10g$

Сила упругости



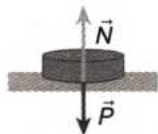
Сила упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$ (Н) — сила, возникающая в результате деформации тела.
Деформация — изменение формы и объёма тела при внешнем воздействии.

Типы деформаций		
Упругие	Неупругие	
После снятия воздействия остаточная деформация будет равна нулю	После снятия воздействия тело не возвращается к первоначальному состоянию	
Вид деформации	Направление сил	Примеры
Растяжение		Тросы, цепи
Сжатие		Колонны, стены
Сдвиг		Заклёпки, болты
Кручение		Оси, валы, гайки
Изгиб		Балки, мосты



Сила нормальной реакции опоры — сила упругости, действующая на тело со стороны опоры перпендикулярно её поверхности.

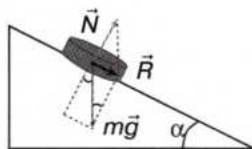
На горизонтальной поверхности



$\vec{P}$ — вес тела, $\vec{N}$ — сила реакции опоры.

$|\vec{P}| = |\vec{N}|$, $\vec{P} \updownarrow \vec{N}$ согласно третьему закону Ньютона

На наклонной плоскости



$m\vec{g}$ — сила тяжести, $\vec{N}$ — сила реакции опоры.

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

Направлена всегда перпендикулярно к поверхности



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

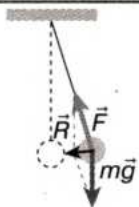
В положении равновесия



$m\vec{g}$ — сила тяжести, $\vec{F}$ — сила натяжения (общепринятое обозначение — $\vec{T}$).

$$|\vec{F}| = |m\vec{g}|, \quad \vec{F} + m\vec{g} = 0$$

При отклонении от положения равновесия



$m\vec{g}$ — сила тяжести, $\vec{F}$ — сила натяжения.

$$\vec{R} = m\vec{g} + \vec{F}$$

Равнодействующая сила не равна нулю, то есть при отсутствии других сил тело будет двигаться к положению равновесия с ускорением



Закон Гука (применим для упругих деформаций). Сила упругости, возникающая при деформации, пропорциональна удлинению (сжатию) тела и направлена в сторону, противоположную направлению смещения частиц тела при деформации:

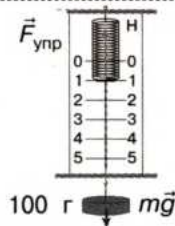
$$F_{\text{упр}} = -k\Delta x,$$

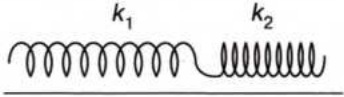
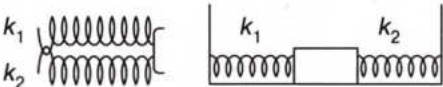
где Δx (м) — изменение размеров тела (удлинение, сжатие), k (Н/м) — коэффициент упругости тела.

Физическая величина	Формула
Абсолютное удлинение (деформация) тела	$\Delta x = l - l_0 $, где l_0 — начальная длина тела, l — длина деформированного тела
Относительное удлинение тела	$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$
Механическое напряжение σ (Н/м ² = Па)	$\sigma = \frac{F_{\text{упр}}}{S}$



Как следует из закона Гука, по удлинению пружины можно судить о силе, действующей на неё. Этот факт используется для измерения сил с помощью **динамометра** — пружины с линейной шкалой, проградуированной в единицах силы.

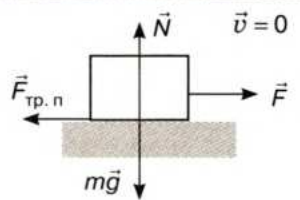
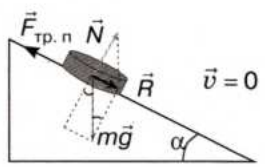
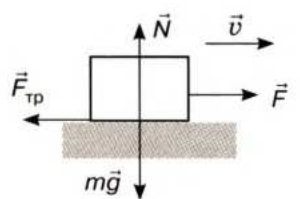
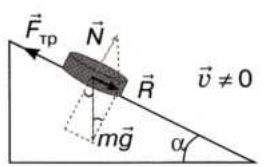


Вид соединения пружин	Схема соединения	Формулы
Последовательное соединение пружин		$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}$ $\Delta x = \Delta x_1 + \Delta x_2$ $F = F_1 = F_2$
Параллельное соединение пружин		$k = k_1 + k_2$ $\Delta x = \Delta x_1 = \Delta x_2$ $F = F_1 + F_2$

Сила трения

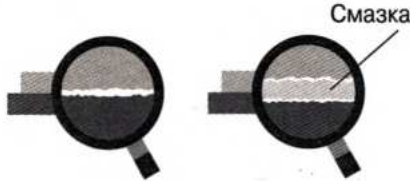
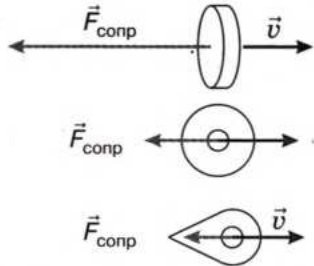


Сила трения $\vec{F}_{\text{тр}}$ (Н) обусловлена шероховатостью соприкасающихся поверхностей, силами межмолекулярного притяжения этих поверхностей, препятствует взаимному перемещению тел, направлена противоположно направлению перемещения или возможному перемещению данного тела относительно других тел. Возникает вдоль поверхности двух трущихся тел. Относится к силам электромагнитной природы.

Силы трения	На горизонтальной поверхности	На наклонной плоскости
Сила трения покоя $F_{\text{тр.п}}$ — сила трения, препятствующая возникновению движения одного тела по поверхности другого: $\vec{F}_{\text{тр.п}} = -\vec{F},$ где $\vec{F}_{\text{тр.п}}$ — сила трения покоя, $\vec{F}$ — сила тяги	 $\vec{v} = 0$ $F_{\text{тр.п}} = F$	 $\vec{v} = 0$ $F_{\text{тр.п}} = mg \cdot \sin \alpha$
Сила трения скольжения $F_{\text{тр}}$ — сила трения, возникающая при относительном перемещении (случай поступательного движения) соприкасающихся тел, равна предельному значению силы трения покоя: $F_{\text{тр}} = \mu \cdot N,$ где $F_{\text{тр}}$ — сила трения скольжения, μ — коэффициент трения, N — сила реакции опоры	 $\vec{v}$ $F_{\text{тр}} = \mu mg$	 $\vec{v} \neq 0$ $F_{\text{тр}} = \mu mg \cdot \cos \alpha$



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

Отличие жидкого и сухого трения	Зависимость силы жидкого трения от скорости тела	Зависимость коэффициента трения от формы тела
У жидкого трения нет силы трения покоя 	Направлено противоположно скорости движения тела: $\vec{F}_{\text{сопр}} \uparrow \downarrow \vec{v}$. При малых скоростях: $\vec{F}_{\text{сопр}} = -k\vec{v}$. При больших скоростях: $F_{\text{сопр}} = kv^2$	Коэффициент k зависит от формы, размеров и поверхности тела, а также свойств среды 

Архимедова сила



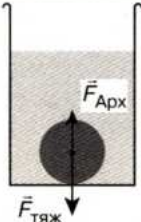
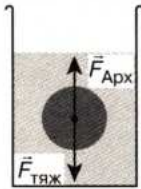
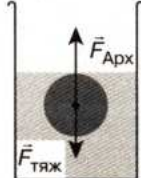
Архимедова сила $F_{\text{Арх}}$ (Н) всегда направлена противоположно силе тяжести:

$$F_{\text{Арх}} = \rho_{\text{ж}} g V_{\text{т}},$$

где $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости (или газа), в которую погружено тело, $V_{\text{т}}$ — объём тела, погружённого в жидкость (или часть объёма, погружённого в жидкость), g — ускорение свободного падения.

ЗАКОН АРХИМЕДА

Тело, погружённое в жидкость или газ, теряет в своём весе столько, сколько весит вытесненная им жидкость или газ.

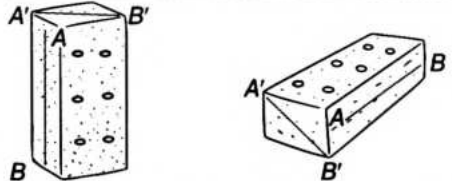
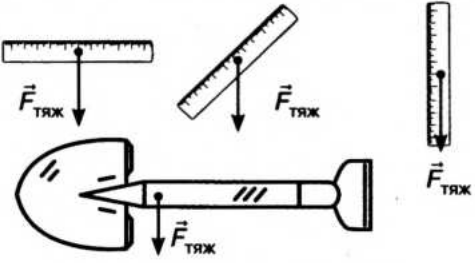
Условия плавания тел	Физическая закономерность
Тело тонет 	Сила тяжести больше архимедовой силы (плотность тела больше плотности жидкости): $F_{\text{Арх}} < mg$ $\rho_{\text{ж}} < \rho_{\text{т}}$
Тело плавает в жидкости или на поверхности жидкости 	Сила тяжести равна архимедовой силе (плотность тела равна плотности жидкости при полном погружении тела): $F_{\text{Арх}} = mg$ $\rho_{\text{ж}} g V_{\text{погр}} = \rho_{\text{т}} g V_{\text{т}}$
Тело всплывает. При всплытии тела на поверхность уменьшается объём тела, погружённого в жидкость, следовательно, будет уменьшаться архимедова сила 	Сила тяжести меньше архимедовой силы (плотность тела меньше плотности жидкости): $F_{\text{Арх}} > mg$ $\rho_{\text{ж}} > \rho_{\text{т}}$

СТАТИКА

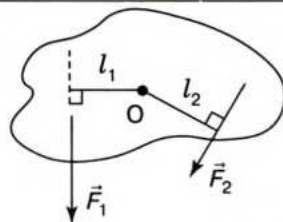


Статика изучает условия равновесия механических систем под действием приложенных к ним сил и моментов.

Основные понятия

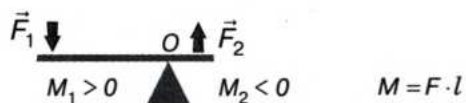
Физические понятия	Примеры, формулы
Абсолютно твёрдое тело — тело, для которого расстояние между любыми точками можно считать неизменным	
Центр тяжести тела — точка приложения равнодействующей всех сил тяжести, действующих на частицы тела при любом его положении в пространстве. Расположение центра тяжести не меняется при изменении положения тела	

Плечо силы — кратчайшее расстояние (длина перпендикуляра) от оси вращения до линии действия силы

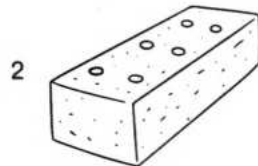
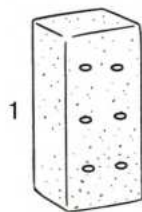


l_1 и l_2 — соответственно плечи сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, действующих на рычаг, O — ось вращения

Момент силы M (Н·м) — физическая величина, численно равная произведению модуля силы на её плечо. Момент считают положительным, если сила вызывает вращение тела относительно выбранной оси против часовой стрелки, и отрицательным, если вращение происходит по часовой стрелке



Давление p (Па) — отношение модуля силы F , действующей перпендикулярно поверхности (силы давления), к площади S этой поверхности



$$p = \frac{F}{S}$$

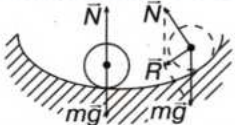
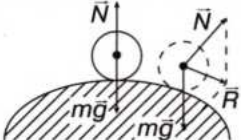
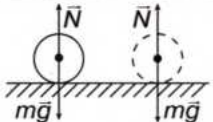
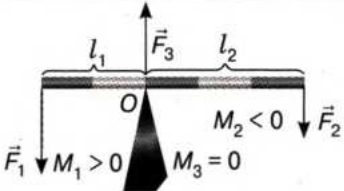
$$m_1 = m_2$$

$$P_1 = P_2$$

$$p_1 > p_2$$



Равновесие — состояние тела, при котором оно находится в покое относительно выбранной системы отсчёта.

Физические понятия	Примеры, формулы
Устойчивое равновесие — равновесие, при котором тело, выведенное из положения равновесия, возвращается в первоначальное положение	
Неустойчивое равновесие — равновесие, при котором тело, выведенное из положения равновесия, не возвращается в первоначальное положение	
Безразличное равновесие — равновесие, при котором соседние положения тела также являются равновесными	
Условие равновесия твёрдого тела в ИСО — отсутствие вращательного и поступательного движения	 $\vec{F}_1$ $M_1 > 0$ $M_2 < 0$ $M_3 = 0$ $M_1 + M_2 + \dots + M_N = 0$ $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_N = 0$

Механизм



Механизм — приспособление, которое служит для преобразования силы, то есть для изменения численного значения и получения выигрыша в силе. Ни один простой механизм не даёт выигрыша в работе.

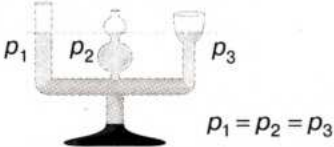
Простые механизмы	Разновидности
Наклонная плоскость — ровная поверхность, расположенная под некоторым углом к горизонту	 Клин  Наклонная плоскость  Винт
Рычаг — твёрдое тело, которое может вращаться вокруг неподвижной оси. Условие равновесия рычага: $F_1 l_1 = F_2 l_2$	 Блок  Рычаг  Ворот

Виды блоков	
Неподвижный блок — равноплечный рычаг. Не даёт выигрыша в силе, позволяет менять направление действия силы $l_1 = l_2, F_1 = F_2$	 Неподвижный блок
Подвижный блок — рычаг, у которого одно плечо в два раза больше второго. Даёт выигрыш в силе в два раза $\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1} = 2$	 Подвижный блок

ЗОЛОТОЕ ПРАВИЛО МЕХАНИКИ

Во сколько раз выигрываем в силе, во столько раз проигрываем в расстоянии.

Гидростатика

Понятия, определения	Формулы, примеры
Сообщающиеся сосуды — сосуды, состоящие из нескольких ёмкостей любой формы, которые сообщаются друг с другом посредством каналов, заполненных жидкостью	 $p_1 = p_2 = p_3$
Гидростатическое давление p (без учёта атмосферного) в жидкостях обусловлено весом жидкости	$p = \rho gh,$ где ρ — плотность жидкости, g — ускорение свободного падения, h — глубина погружения тела (измеряется от поверхности жидкости)
Давление в жидкости, покоящейся в ИСО	$p = p_0 + \rho gh,$ где p_0 — атмосферное давление

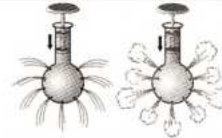


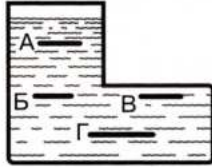
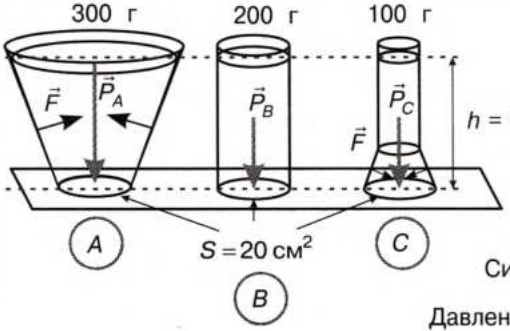
Нормальное атмосферное давление равно давлению столба ртути высотой 760 мм при температуре 0 °С, $p_0 = 101\,300 \text{ Па} = 1013 \text{ гПа} = 10^5 \text{ Па}$.

Закон Паскаля и его проявление



Закон Паскаля: давление в жидкостях и газах передаётся во всех направлениях одинаково и не зависит от ориентации площадки, на которую оно действует.

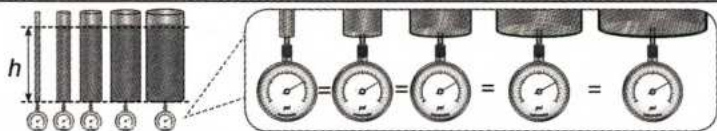


Формулировка	Примеры, формулы
Следствие закона Паскаля: вне зависимости от формы и размеров сосуда давление внутри жидкости на одной и той же глубине одинаково	 $p_A < p_B < p_\Gamma$ $p_B = p_\Gamma$
Гидростатический парадокс: вес жидкости, налитой в сосуд, может отличаться от силы давления, оказываемой ею на дно сосуда. Данный парадокс объясняется законом Паскаля: поскольку жидкость давит не только на дно, но и на стенки сосуда, то, если стенки расположены наклонно, возникает вертикальная сила давления, которая направлена вверх в сужающихся сосудах (сосуд А) и вниз — в расширяющихся (сосуд С). В сосуде с вертикальными стенками вес жидкости равен силе давления	 $h_A = h_B = h_C$ $S_A = S_B = S_C$ Вес: $P_A > P_B > P_C$ Сила давления: $F_A = F_B = F_C$ Давление жидкости: $p_A = p_B = p_C$

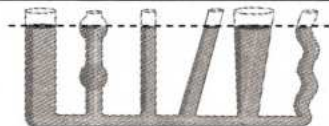
Формулировка

Примеры, формулы

Гидростатический парадокс: одна и та же жидкость, налитая до одного уровня в сосуды разной формы, оказывает на дно одинаковое давление

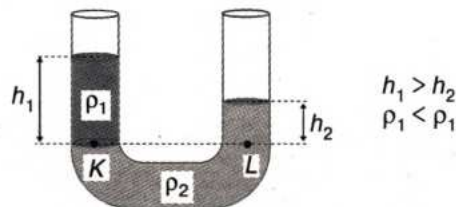


Закон сообщающихся сосудов: в сообщающихся сосудах (открытых сверху) поверхности однородных жидкостей устанавливаются на одном уровне

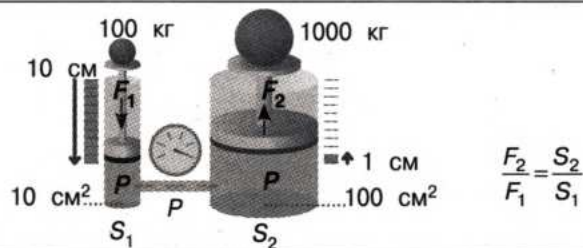


Закономерности для сообщающихся сосудов, в которые налиты **разные несмешиваемые жидкости**:

- на уровне раздела двух сред давление, оказываемое жидкостями, одинаковое (уровень KL);
- чем больше плотность жидкости, тем меньше высота столба жидкости над границей раздела жидкостей



Гидравлический пресс — машина для обработки материалов давлением. Приводится в действие сжимаемой жидкостью. Выигрыш в силе, получаемый при применении гидравлического пресса, зависит от отношения площадей поршней машины



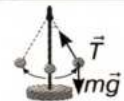
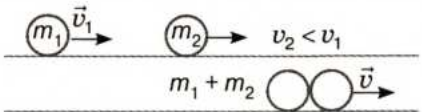
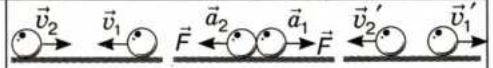
ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

Основные понятия



Механическая система — совокупность точек (тел), движения которых взаимосвязаны. Шарик, нить, штатив (подвес) — элементы механической системы.

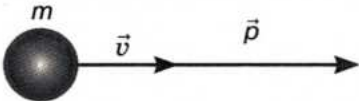


Физическое понятие	Определение	Примеры
Замкнутая система	Тела, входящие в систему, взаимодействуют только друг с другом, а влиянием внешних сил можно пренебречь	 Шарик, нить, подвес — замкнутая система
Внешние силы	Силы, действующие на тела системы со стороны материальных точек (тел), не входящих в состав данной механической системы	
Внутренние силы	Силы, действующие между материальными точками (телами) данной механической системы	
Абсолютно неупругий удар	Взаимодействие, при котором тела соединяются друг с другом и движутся дальше как одно тело	
Абсолютно упругий удар	Столкновение, при котором тела после взаимодействия движутся отдельно друг от друга	

Импульс

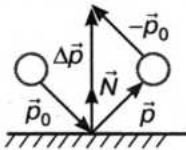


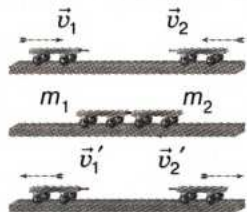
Импульс тела ($\text{кг} \cdot \text{м/с}$) — векторная физическая величина, равная произведению массы тела на скорость его движения: $\vec{p} = m\vec{v}$.

Понятие, определение	Примеры, формулы
Направление импульса тела всегда совпадает с направлением скорости. Если тело покоится, импульс равен нулю	 $\vec{v} \uparrow \vec{p}$
Изменение импульса тела — векторная разность между конечным и начальным импульсом тела	$\Delta\vec{p} = \vec{p} - \vec{p}_0 = \vec{p} + (-\vec{p}_0)$



Импульс силы ($\text{Н} \cdot \text{с}$) — векторная физическая величина, равная произведению силы на время её действия.

Понятие, определение	Примеры, формулы
Вектор изменения импульса тела всегда совпадает с направлением силы, вызывающей это изменение	 $\vec{N} \uparrow \Delta\vec{p}$

Понятие, определение	Примеры, формулы
Импульсная форма второго закона Ньютона: в ИСО скорость изменения импульса тела равна равнодействующей сил, действующих на тело. Применяется и для случая с переменной массой	$\Delta \vec{p} = \vec{F} \cdot t$
Суммарный (полный) импульс системы тел — векторная сумма импульсов всех тел, входящих в систему	$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots$
Закон сохранения импульса: в замкнутой системе тел суммарный импульс системы сохраняется при любых взаимодействиях (как при упругих, так и при неупругих)	 $m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}_1' + m_2 \vec{v}_2'$ $\vec{p}_{\text{нач}} = \vec{p}_{\text{кон}}$

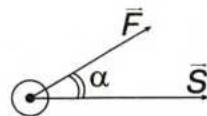
Механическая работа

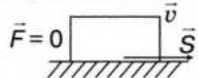
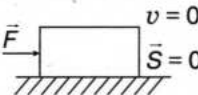
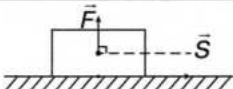
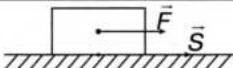
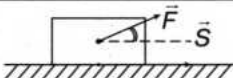
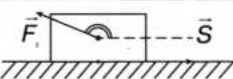
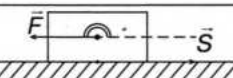


Механическая работа A (Дж) равна скалярному произведению векторов силы и перемещения:

$$A = \vec{F} \cdot \vec{s} = |\vec{F}| \cdot |\vec{s}| \cdot \cos \alpha,$$

где $|\vec{F}|$ — модуль вектора силы, $|\vec{s}|$ — модуль вектора перемещения, $\cos \alpha$ — угол между векторами силы и перемещения.



Численное значение механической работы	Условие, формула	Пример
Работа равна нулю	$\vec{F} = 0$	
	$\vec{s} = 0$	
	$\alpha = 90^\circ$	
Положительная работа	$\alpha = 0^\circ$ $A = Fs$	
	$0^\circ < \alpha < 90^\circ$ $A = Fs \cdot \cos \alpha$	
Отрицательная работа	$90^\circ < \alpha < 180^\circ$ $A = Fs \cdot \cos \alpha$ $\cos \alpha < 0$	
	$\alpha = 180^\circ$ $A = -Fs$	



Сила тяжести при движении тела вверх совершает отрицательную работу, при движении вниз — положительную.

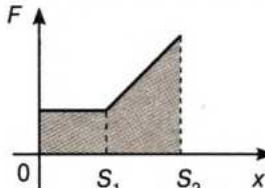
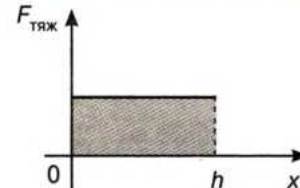
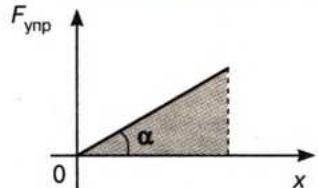


Архимедова сила, наоборот, при движении тела вверх совершает положительную работу, при движении вниз — отрицательную.

Геометрический смысл работы силы



Работа численно равна площади фигуры под графиком функции силы от координаты.

Модуль работы произвольной силы	Модуль работы силы тяжести	Модуль работы силы упругости
 $A = S_{\text{фигуры}}$	 $A = S_{\square} = mgh$	 $A = S_{\triangle} = \frac{1}{2} k \Delta x \cdot \Delta x = \frac{k \Delta x^2}{2}$



Мощность N (Вт) — физическая величина, показывающая, какую работу совершает тело за единицу времени: $N = \frac{A}{t}$. Чем больше мощность, тем бóльшую работу может совершить тело.



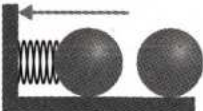
Коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{A_{\text{полезн.}}}{A_{\text{соверш}}} \cdot 100 \% \quad \text{или} \quad \eta = \frac{A_{\text{полезн.}}}{E_{\text{затрач}}} \cdot 100 \%$$

Механическая энергия



Кинетическая и потенциальная энергии — относительные величины, так как численное значение первой зависит от выбора системы отсчёта, а второй — от выбора нулевого уровня.

Механическая энергия	Формула
Кинетическая энергия — энергия движущегося тела 	$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m},$ где m — масса тела, v — модуль скорости тела, p — модуль импульса тела
Потенциальная энергия тела, поднятого над Землёй, — энергия взаимодействия тел 	$E_n = mgh,$ где m — масса тела, g — ускорение свободного падения, h — высота, на которой находится тело относительно выбранного нулевого уровня
Потенциальная энергия упруго деформированного тела — энергия взаимодействия частей тела 	$E_{уд} = \frac{k\Delta x^2}{2},$ где k — коэффициент упругости тела, Δx — изменение линейных размеров тела

Изменение механической энергии



Если тело может совершить работу, значит, оно обладает энергией.
Работа тела равна изменению энергии:

$$A = \Delta E.$$

Изменение энергии	Формула	Пример
Работа сил, приложенных к телу, равна изменению кинетической энергии тела	$A = F \cdot s = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}$	
Работа силы тяжести, действующей на тело, равна изменению потенциальной энергии, взятому с противоположным знаком. Работа силы тяжести по замкнутой траектории равна нулю	$A = E_{n1} - E_{n2} = mg(h_1 - h_2) = -\Delta E_n$	
Работа силы упругости равна изменению потенциальной энергии упруго деформированного тела, взятому с противоположным знаком	$A = E_{n1} - E_{n2} = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2} = -\Delta E_n$	

Закон сохранения энергии



Полная механическая энергия — сумма кинетической и потенциальной энергии тела в рассматриваемый момент времени:

$$E = E_k + E_n,$$

где E_k и E_n — соответственно кинетическая и потенциальная энергии.

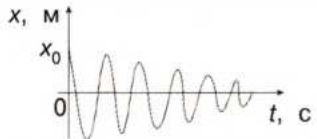
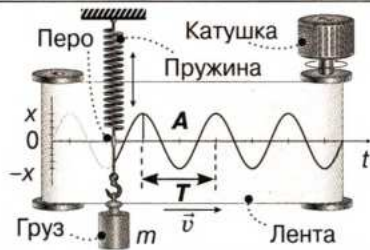
Закон сохранения механической энергии	Формула
Полная энергия замкнутой системы сохраняется	$E_{k0} + E_{n0} = E_k + E_n = \text{const},$ где E_{k0}, E_{n0} — соответственно кинетическая и потенциальная энергии тела в начальный момент времени; E_k, E_n — соответственно кинетическая и потенциальная энергии тела в конечный момент времени. $\Delta E_k + \Delta E_n = 0$
В замкнутой системе: движение тела в поле силы тяжести (без учёта сопротивления воздуха)	$\frac{mv_0^2}{2} + mgh_0 = \frac{mv^2}{2} + mgh$
В незамкнутой системе: часть механической энергии переходит во внутреннюю энергию (неупругий удар, работа по преодолению сил сопротивления)	$E_{k0} + E_{n0} = E_k + E_n + \Delta U,$ где ΔU — модуль изменения внутренней энергии. $\Delta E_k + \Delta E_n = A_{\text{тр}}$

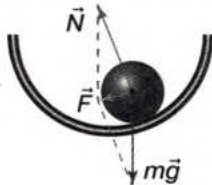
МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Механические колебания



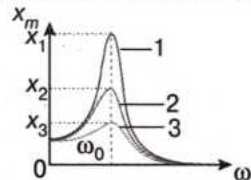
Колебательная система — система тел, совершающая колебания.

Виды колебаний	Пример
Свободные колебания — колебания, совершаемые за счёт начального запаса энергии. Свободные колебания в реальных условиях являются затухающими	
Вынужденные колебания — колебания, происходящие под воздействием внешних периодических сил. ✓ Движение маятника часов, колебания струн во время игры на гитаре	
Гармонические колебания — колебания, при которых физическая величина изменяется с течением времени по гармоническому закону. Материальная точка совершает гармонические колебания, если они происходят в результате воздействия на точку силы, пропорциональной смещению колеблющейся точки от положения равновесия и направленной противоположно этому смещению	

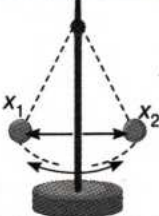
Условия возникновения свободных колебаний	Пример
• При выведении системы из положения устойчивого равновесия возникает равнодействующая сила, направленная к положению устойчивого равновесия. • Инертность системы. • Малое сопротивление среды	



Резонанс — резкое возрастание амплитуды колебаний при приближении частоты вынуждающей силы ω к собственной частоте колебательной системы ω_0 . Чем больше коэффициент затухания, тем ниже амплитуда при резонансе.



Величины, характеризующие колебательное движение

Понятие, определение	Пример, формула
Смещение точки — расстояние от положения устойчивого равновесия точки, совершающей колебания, до её положения в данный момент времени	 x_1, x_2 — смещение точки

Амплитуда — максимальное значение физической величины (смещения, скорости, ускорения)



A — максимальное смещение

Период колебаний T (с) — время одного полного колебания (минимальный интервал времени, через который движение повторяется)



Положение равновесия



A — амплитуда, T — период.

$$T = \frac{t}{N},$$

где t — время колебаний, N — количество колебаний за рассматриваемый промежуток времени

Частота колебаний ν (Гц) — число колебаний в единицу времени

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{N}{t}$$

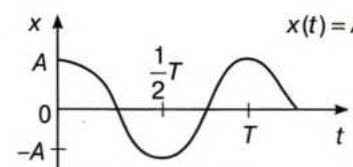
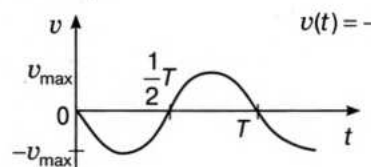
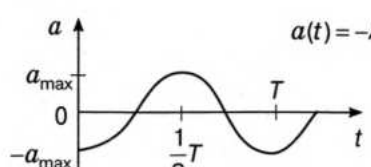
Циклическая частота ω (рад/с, с^{-1}) — скалярная физическая величина, которая служит мерой вращательного или колебательного движения

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$$

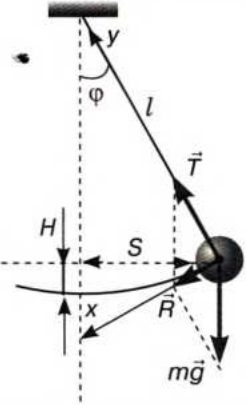
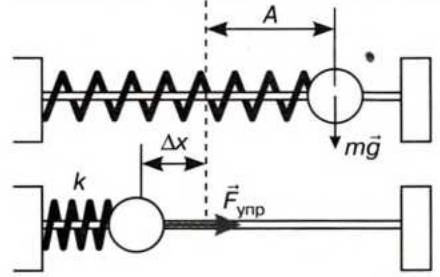
Фаза φ (рад) — угловая физическая величина, показывающая положение и направление движения колебательной системы в данный момент времени

$$\varphi = \omega t + \varphi_0$$

Графики изменения физических величин при гармонических колебаниях

Графики	Кинематическое описание
Смещение  $x(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0)$	$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0),$ где A — амплитуда координаты, $\omega t + \varphi_0$ — полная фаза колебания
Скорость  $v(t) = -A\omega \sin(\omega t + \varphi_0)$	$v(t) = -A\omega \sin(\omega t + \varphi_0)$ $v_{\max} = A\omega$ — максимальная скорость
Ускорение  $a(t) = -A\omega^2 \cos(\omega t + \varphi_0)$	$a(t) = -A\omega^2 \cos(\omega t + \varphi_0)$ $a_{\max} = A\omega^2$ — максимальное ускорение

Маятники

	Математический маятник	Пружинный маятник
Определение	Математический маятник — материальная точка, подвешенная на невесомой нерастяжимой нити	Пружинный маятник — колебательная система, состоящая из пружины, один конец которой жёстко закреплён, и груза, прикрепленного ко второму её концу
Модель		
Период колебаний	$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}},$ где l — длина маятника, g — ускорение свободного падения	$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}},$ где m — масса колеблющегося тела, k — коэффициент упругости пружины

	Математический маятник	Пружинный маятник
Динамическое описание	$x: mgsin\varphi = ma_{\tau}$ $y: T - mg \cos\varphi = ma_{\text{ц}}$ Для малых углов: $\sin\varphi = \operatorname{tg}\varphi = \frac{l}{x}$ $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$	$ma_x = -k\Delta x$ $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$
Энергетическое описание	$\frac{mv^2}{2} + mgh = \text{const}$ $\frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = mgH = \text{const}$	$\frac{mv^2}{2} + \frac{k\Delta x^2}{2} = \text{const}$ $\frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = \frac{kA^2}{2} = \text{const}$

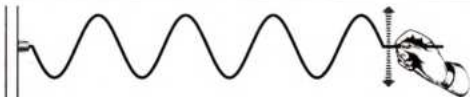
Волны



Волны — всякие возмущения состояния вещества или поля, распространяющиеся в пространстве с течением времени. Основное свойство волн — перенос энергии без переноса вещества.



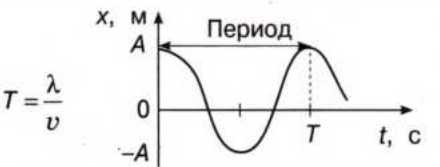
Механические волны — процесс распространения в пространстве колебаний частиц упругой среды.

	Поперечная волна	Продольная волна
Определение	Волна называется поперечной , если частицы среды колеблются перпендикулярно направлению распространения волны	Волна называется продольной , если частицы среды колеблются параллельно направлению распространения волны
Изображение волны	 Поперечная волна состоит из чередующихся горбов и впадин	 Продольная волна состоит из чередующихся деформаций растяжения и сжатия
Виды деформаций	Вызывается деформациями сдвига одного слоя среды относительно другого	Вызывается деформациями сжатия, растяжения
Распространение волн в средах	Могут существовать только в твёрдых телах и на поверхности жидкостей	Могут существовать в любых телах — твёрдых, жидких, газообразных



Необходимым условием распространения волн является наличие у среды **упругих свойств**: деформация, возникающая в каком-либо месте, благодаря взаимодействию соседних частиц последовательно передаётся от одной точки среды к другой. Различным типам деформаций будут соответствовать разные типы волн.

Основные характеристики механических волн

Физическая величина	Определение	Формула, график
Длина волны λ (м)	Расстояние между двумя ближайшими частицами среды, колеблющимися в одинаковой фазе	$\lambda = vT$ 
Период колебаний T (с)	Время, за которое волна проходит расстояние, равное длине волны	$T = \frac{\lambda}{v}$ 
Частота ν (Гц)	Число колебаний или циклов волны, совершённых в единицу времени	$\nu = \frac{1}{T}$
Скорость волны v (м/с)	Физическая величина, равная отношению длины волны к периоду колебания её частиц	$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \nu$



В разных средах скорость распространения механических волн различна. Самая большая скорость будет наблюдаться в твёрдых телах, самая маленькая — в газах. В вакууме упругие волны не распространяются.

Звук



Звуковыми волнами в широком смысле называются всякие волны, распространяющиеся в упругой среде. В узком смысле звуком называют звуковые волны в диапазоне частот от 16 Гц до 20 кГц, воспринимаемые человеческим ухом.

Упругие волны	Примеры	Диапазон частот
Звуковые волны	Волны, воспринимаемые человеческим ухом	От 16 Гц до 20 кГц
Инфразвук	Источники инфразвука: землетрясения, ядерные взрывы, ветер, гром, автомобили	Ниже 16 Гц
Ультразвук	Волны, не воспринимаемые человеческим ухом. Воспринимаются летучими мышами, дельфинами	Выше 20 кГц

УСЛОВИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЗВУКА

Наличие колеблющегося тела.

УСЛОВИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА

Наличие упругой среды.



При переходе из одной среды в другую частота звука не меняется, меняются скорость и длина волны согласно формуле:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \nu.$$

Зависимость скорости звука от внешних условий

Увеличивается	Уменьшается
При увеличении температуры среды	При уменьшении температуры среды
При переходе из менее плотной среды в более плотную	При переходе из более плотной среды в менее плотную
В газе при переходе в газ с молекулами меньшей массы	В газе при переходе в газ с молекулами большей массы



При 0°C скорость звука в воздухе составляет 332 м/с.



Высота звука определяется его частотой.
Громкость определяется амплитудой.

Свойства механических волн

ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА

Каждая точка, возбуждённая волной, становится источником вторичных волн. Огибающая вторичных волн даёт новое положение волновому фронту.

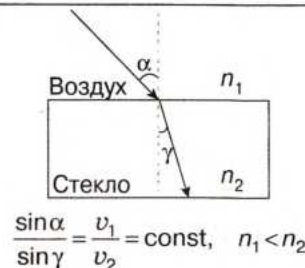


Свойства волн	Формулировка, пояснение	Пример
Отражение волн — способность механических волн любого происхождения отражаться от границы раздела двух сред	Угол отражения равен углу падения. Падающий луч, отражённый луч и перпендикуляр, восстановленный в точку падения, лежат в одной плоскости	Падающий Отражённый $\alpha = \beta$

Преломление волн — изменение направления распространения волны при переходе из одной среды в другую

Отношение синусов углов равно отношению скоростей волн в данных средах.

Падающий луч, преломлённый луч и перпендикуляр, восстановленный в точку падения, лежат в одной плоскости



Интерференция волн — сложение волн. В случае совпадения фаз наблюдается усиление колебаний. При движении частиц в противофазе — ослабление

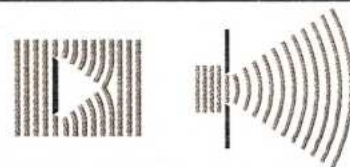
Усиление звуковой волны — наблюдение максимума.

Ослабление звуковой волны — наблюдение минимума



Дифракция волн — отклонение направления распространения волн от прямолинейного у препятствия (то есть огибание ими препятствий)

Важным условием для наблюдения дифракции является сравнимость размеров препятствия с длиной волны



Эффект Доплера — изменение частоты волн, принимаемых наблюдателем (приёмником), которое происходит вследствие относительного движения источника волн и приёмника. При приближении источника звука его частота и высота увеличиваются.



МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ



Молекулярно-кинетическая теория (МКТ) — теория, объясняющая тепловые явления в макроскопических телах и свойства этих тел на основе их молекулярного строения.

Основные положения МКТ

Основные положения МКТ	Опытные подтверждения положений
I. Все вещества состоят из частиц, между которыми есть промежутки. Молекула — самая маленькая частица вещества, которая обладает его основными химическими свойствами. Молекула состоит из атомов. Атом — наименьшая частица вещества, которая не делится при химических реакциях	Закон кратности отношений; дробление вещества; испарение жидкостей; расширение веществ при нагревании; диффузия; деформация
II. Частицы движутся хаотично и непрерывно. Это движение не зависит от внешних воздействий. Движение происходит в непредсказуемом направлении из-за столкновения молекул	Диффузия; броуновское движение; стремление газа занять любой объём полностью
III. Между молекулами существуют силы взаимодействия, которые имеют электромагнитную природу. Гравитационное взаимодействие между молекулами пренебрежимо мало	Деформация; смачивание; поверхностное натяжение жидкости; сохранение формы твёрдого тела

Химические характеристики вещества

Определение физической величины	Формулы
Постоянная Авогадро N_A — число атомов, содержащихся в 12 г изотопа углерода $^{12}_6\text{C}$	$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Количество вещества — отношение числа элементов этого вещества к постоянной Авогадро	$\nu = \frac{N}{N_A},$ где N — число части вещества, N_A — постоянная Авогадро
Молярная масса M — масса одного моля вещества	$M = m_0 \cdot N_A$ Если тело состоит из N молекул массой m_0, то масса тела $m = N \cdot m_0$
Концентрация частиц — количество частиц в объёме	$n = \frac{N}{V},$ где n — концентрация, N — количество частиц, V — объём. Можно вывести дополнительные формулы: $N = \frac{m \cdot N_A}{M}, \quad \nu = \frac{m}{M}$

Агрегатное состояние вещества

Агрегатное состояние	Свойства	Характеристика
Газы В газах среднее расстояние между молекулами в десятки раз превышает их размеры	Занимают весь предоставленный объём. Не сохраняют форму	Молекулы движутся поступательно и равномерно. После столкновений начинают вращаться. Кинетическая энергия E_k движения молекул газов намного больше потенциальной энергии E_n их взаимодействия (притяжения): $E_k \gg E_n$
Жидкости В жидкостях расстояние между молекулами значительно меньше	Сохраняют объём, обладают свойством текучести	Молекулы совершают колебательное и поступательное движение. Молекулы через малые промежутки времени скачкообразно переходят в новые положения равновесия (текучесть жидкости). E_k движения молекул жидкости меньше E_n их взаимодействия (притяжения): $E_k < E_n$
Твёрдые тела Расстояние между молекулами чрезвычайно мало	Сохраняют форму и объём	В твёрдых телах молекулы колеблются и очень редко перемещаются (только при увеличении температуры), что обуславливает сохранение формы. E_k движения молекул твёрдых тел намного меньше E_n их взаимодействия (притяжения): $E_k \ll E_n$

Тепловое движение атомов и молекул вещества



Беспорядочное хаотическое перемещение атомов и молекул называется **тепловым движением**.

Физическая величина	Формула
Среднеквадратичная скорость $\bar{v}$ — статистическая величина. Чем выше температура тела, тем больше скорость движения молекул	$\bar{v} = \sqrt{\frac{3 \cdot k \cdot T}{m_0}} = \sqrt{\frac{3 \cdot R \cdot T}{M}},$ где $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ — постоянная Больцмана, T — температура тела (К), $T_k = t_c + 273,15$, $R = N_A \cdot k = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ — универсальная газовая постоянная, M — молярная масса вещества, m_0 — масса одной молекулы

Характеристика идеального газа



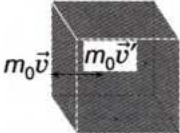
Идеальный газ — физическая модель газа, состоящего из большого числа молекул, размеры которых ничтожно малы по сравнению со средними расстояниями между ними. Молекулы такого газа можно считать материальными точками, которые не совершают вращательного и колебательного движения. Соударения молекул со стенками сосуда являются абсолютно упругими.

Микроскопические параметры	Макроскопические параметры
• Масса молекул. • Скорость молекул. • Кинетическая энергия молекул	• Давление газа — внешняя характеристика соударений со стенками сосуда. • Объём газа — место, куда заключены частицы газа. • Температура газа — внешняя характеристика скоростей частиц газа

Основное уравнение МКТ



Давление газа равно $\frac{2}{3}$ средней кинетической энергии поступательного движения молекул, содержащихся в единице объёма.

Название	Формулы
Среднее значение кинетической энергии поступательного движения одной молекулы 	$E_{\text{пост}} = \frac{m_0 \cdot v_{\text{кв}}^2}{2}$, где m_0 — масса одной молекулы, $v_{\text{кв}}$ — средняя квадратичная скорость поступательного движения молекулы идеального газа. $E_{\text{пост}} = \frac{3}{2} k \cdot T$, где k — постоянная Больцмана, T — температура. Средняя кинетическая энергия теплового движения молекул газа прямо пропорциональна температуре
Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов	$p = \frac{2}{3} n \cdot E_{\text{пост}}$, где $E_{\text{пост}}$ — среднее значение поступательной кинетической энергии молекул. Давление газа прямо пропорционально средней кинетической энергии теплового движения молекул газа
Следствие из основного уравнения молекулярно-кинетической теории газов	$p = n \cdot k \cdot T$, где n — концентрация молекул (число молекул N в единице объёма V любого сосуда). Концентрация молекул идеального газа при нормальных условиях — постоянная Лoshмидта: $n = 2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$

Уравнение состояния идеального газа

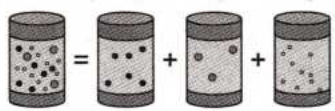
Название закона	Формула и описание
Уравнение состояния идеального газа Менделеева — Клапейрона	$pV = \frac{m}{M}RT,$ где p — давление газа, V — объём газа, m — масса газа, M — молярная масса, $R = N_A \cdot k = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ — универсальная газовая постоянная, N_A — постоянная Авогадро, k — постоянная Больцмана
Закон Авогадро	В равных объёмах газов (V) при одинаковых условиях (температуре T и давлении P) содержится одинаковое число молекул. Для смеси невзаимодействующих газов уравнение состояния принимает вид: $p \cdot V = (v_1 + v_2 + v_3 + \dots) \cdot R \cdot T$
Первое следствие из закона Авогадро	Один моль любого газа при одинаковых условиях занимает одинаковый объём. Молярный объём — это объём одного моля идеального газа при нормальных условиях: $V_0 = 0,0224 \frac{\text{м}^3}{\text{моль}} = 22,4 \frac{\text{дм}^3}{\text{моль}}$
Второе следствие из закона Авогадро	Отношение масс одинаковых объёмов двух газов есть величина постоянная для данных газов. Эта величина называется относительной плотностью D: $D = \frac{M_1}{M_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2},$ где m_1, m_2 — молярные массы двух газообразных веществ



В повседневной жизни часто приходится иметь дело не с газом, состоящим из одинаковых молекул, а со смесью нескольких разнородных газов, не вступающих в химические реакции при рассматриваемых условиях.

Вследствие теплового движения частицы каждого газа, входящего в состав газовой смеси, равномерно распределяются по всему предоставленному объёму. Столкновения частиц обеспечивают тепловое равновесие в смеси.

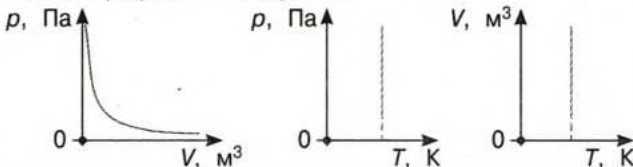
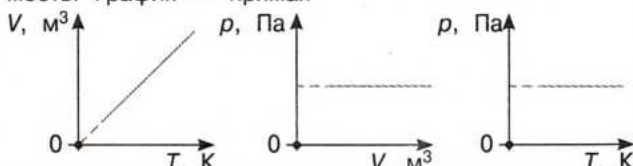
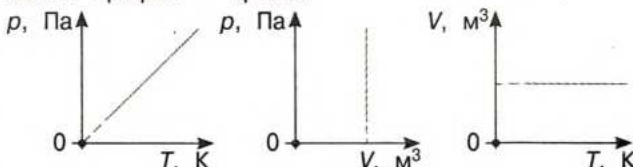
Закон Дальтона для давления смеси разреженных газов

Закон Дальтона	Вывод
Давление смеси не взаимодействующих между собой газов равно сумме парциальных давлений каждого газа в отдельности: $p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots = (n_1 + n_2 + n_3 + \dots) \cdot k \cdot T,$ где p — давление газа, $p_1, p_2, p_3, \dots$ — парциальные давления компонентов	Парциальное давление — давление компонента смеси, если бы он один занимал весь предоставленный ему объём. $p = p_1 + p_2 + p_3$ 

Изопроцессы в разреженном газе



Изопроцесс — процесс, при котором один из макроскопических параметров (p , V или T) состояния данной массы газа остаётся постоянным.

Изопроцесс	Закон	Графики изменения
Изотермический процесс — процесс изменения состояния газа определённой массы при постоянной температуре: $T = \text{const}, m = \text{const}$	Закон Бойля — Мариотта: $pV = \text{const}$	$p = \text{const} \cdot \frac{1}{V}$ — обратно пропорциональная зависимость. График — гипербола 
Изобарный процесс — процесс изменения состояния газа определённой массы при постоянном давлении: $p = \text{const}, m = \text{const}$	Закон Гей-Люссака: $\frac{V}{T} = \text{const}$	$V = \text{const} \cdot T$ — прямо пропорциональная зависимость. График — прямая 
Изохорный процесс — процесс изменения состояния газа определённой массы при постоянном объёме: $V = \text{const}, m = \text{const}$	Закон Шарля: $\frac{p}{T} = \text{const}$	$p = \text{const} \cdot T$ — прямо пропорциональная зависимость. График — прямая 

Насыщенные и ненасыщенные пары



Пар — газообразное состояние вещества при температуре ниже критической.

Насыщенный пар	Ненасыщенный пар
Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью. Давление насыщенного пара зависит только от температуры	Пар, находящийся при давлении ниже давления насыщенного пара: $P < P_n$



С ростом температуры давление насыщенного пара растёт, так как увеличиваются скорость молекул пара, их количество (концентрация) за счёт испарения.

Влажность воздуха



Влажность воздуха — величина, указывающая на содержание в воздухе водяного пара. Основными характеристиками влажного воздуха являются плотность водяного пара в воздухе и относительная влажность воздуха.

Абсолютная влажность воздуха ρ	Относительная влажность воздуха ϕ
Количество влаги, содержащейся в одном кубическом метре воздуха (кг/м ³)	Величина, показывающая, насколько далёк пар от насыщения (%)
$\rho = \frac{m_{\text{пара}}}{V_{\text{воздуха}}}$ где $m_{\text{пара}}$ — масса пара (воды) в воздухе, $V_{\text{воздуха}}$ — объём воздуха, в котором содержится указанная масса пара	$\phi = \frac{\rho}{\rho_n} \cdot 100 \%$ где ρ — плотность водяного пара (абсолютная влажность), ρ_n — плотность насыщенного водяного пара при данной температуре

Изменение агрегатных состояний вещества



Любое вещество при определённых условиях может находиться в различных агрегатных состояниях — **твёрдом, жидком и газообразном**. Переход из одной фазы в другую называется **фазовым переходом** или **фазовым превращением**.

Парообразование

Определение, единица измерения	Виды парообразования
Парообразование — явление превращения жидкости в газ (пар). Единица измерения: Дж/кг	• Испарение — процесс парообразования с поверхности жидкости. • Кипение — интенсивный переход жидкости в пар, происходящий с образованием пузырьков пара по всему объёму жидкости при определённой температуре. • Конденсация — процесс превращения пара в жидкость

Испарение

Особенности явления	Факторы, влияющие на скорость испарения
• Испарение происходит при любой температуре. • При испарении жидкость покидают молекулы, обладающие большей скоростью	• Температура (испарение происходит тем быстрее, чем выше температура жидкости). • Площадь поверхности жидкости (чем больше площадь испаряемой поверхности, тем большее число молекул одновременно вылетает из жидкости). • Движение воздуха (ветер уносит молекулы, испарение происходит быстрее). • Род жидкости (быстрее испаряется та жидкость, молекулы которой притягиваются друг к другу с меньшей силой)

Кипение	Конденсация
Во время кипения температура жидкости и пара над ней не меняется. Температура кипения — это температура, при которой жидкость кипит	Температура конденсации — это среднее между точкой росы и точкой начала кипения
Кипение происходит с поглощением теплоты . Большая часть подводимой теплоты расходуется на разрыв связей между частицами вещества, остальная часть — на работу, совершаемую при расширении пара	Конденсация пара сопровождается выделением энергии . Конденсируясь, пар отдаёт то количество энергии, которое пошло на его образование



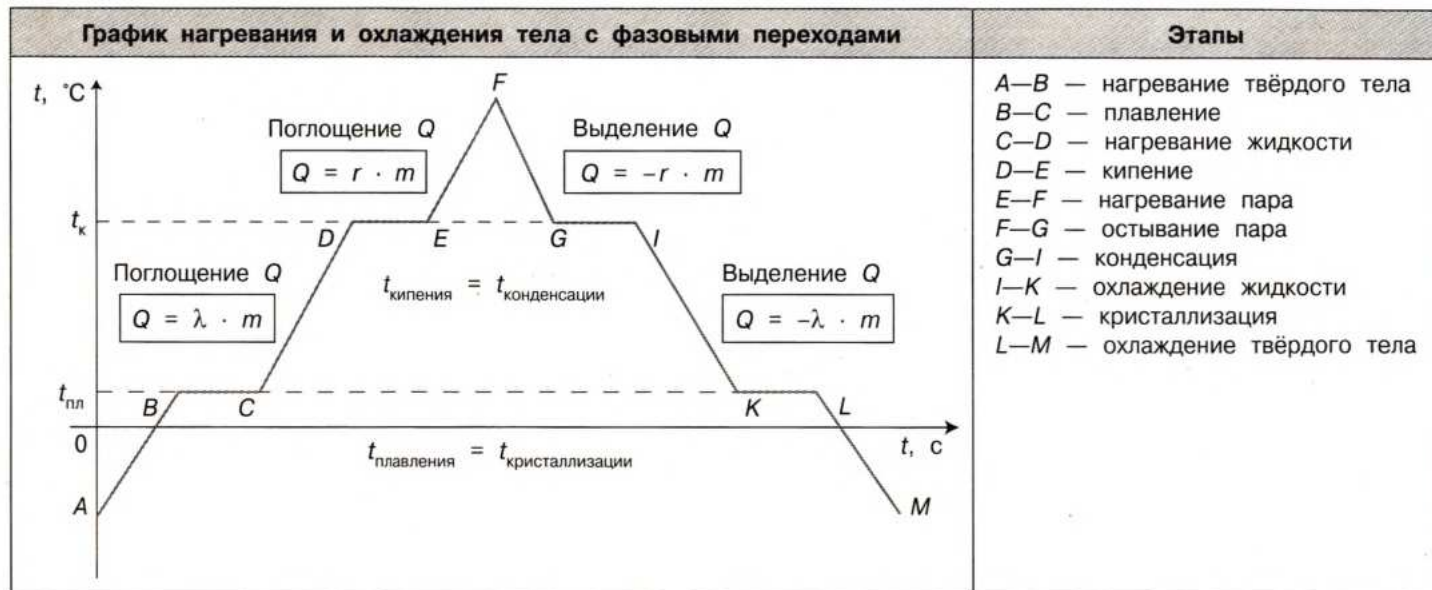
При кипении процесс парообразования происходит как с поверхности жидкости, так и внутри неё (испарение молекул пара в образовавшиеся при кипении пузырьки).

Плавление	Кристаллизация
Плавление — переход вещества из твёрдого состояния в жидкое	Кристаллизация — переход вещества из жидкого состояния в твёрдое (процесс, обратный плавлению)
Сопровождается поглощением энергии , то есть к веществу необходимо подводить теплоту	Сопровождается выделением энергии , то есть от вещества необходимо отводить теплоту
Внутренняя энергия вещества увеличивается	Внутренняя энергия вещества уменьшается
Каждое вещество имеет свою температуру плавления	Каждое вещество имеет свою температуру плавления (кристаллизации)
Единица измерения удельной теплоты плавления: Дж/кг	

Преобразование энергии в фазовых переходах



Фазовый переход — переход вещества из одной фазы в другую. При любом фазовом переходе температура и кинетическая энергия молекул тела остаётся постоянной.



ТЕРМОДИНАМИКА



Термодинамика — раздел молекулярной физики, который изучает передачу энергии, закономерности превращения одних видов энергии в другие.



Термодинамическая система — совокупность тел, которые обмениваются энергией (в форме работы или теплоты) друг с другом или с окружающей средой.

Тепловое равновесие и температура

Температура	Тепловое равновесие
Температура характеризует состояние теплового равновесия термодинамической системы	Все тела, находящиеся друг с другом в состоянии теплового равновесия, имеют одну и ту же температуру
Температура характеризует скорость движения молекул и создаваемое ими давление. При понижении температуры скорость теплового движения молекул уменьшается	Закон теплового равновесия У любой группы изолированных тел через какое-то время температуры становятся одинаковыми, то есть наступает состояние теплового равновесия



Температура является мерой кинетической энергии хаотического движения молекул в макроскопических телах.



Существует такое значение температуры, при котором всякое тепловое движение прекращается. Эта температура — **абсолютный нуль**, или **точка нулевого давления**.

Шкалы температур

Название шкалы	Описание, характеристики
Шкала Реомюра	Единица — градус Реомюра ($^{\circ}\text{R}$), 1°R равен $1/80$ части температурного интервала между опорными точками — температурой таяния льда (0°R) и кипения воды (80°R). $1^{\circ}\text{R} = 1,25^{\circ}\text{C}$
Шкала Фаренгейта	Температура по шкале Фаренгейта связана с температурой по шкале Цельсия ($t^{\circ}\text{C}$) соотношением $t^{\circ}\text{C} = 5/9 (t^{\circ}\text{F} - 32)$. $1^{\circ}\text{F} = 5/9^{\circ}\text{C}$
Шкала Цельсия	В быту используется шкала Цельсия, в которой за 0° принимают точку замерзания воды, а за 100° — точку кипения воды при атмосферном давлении. Градус Цельсия равен градусу Кельвина, абсолютный нуль принимается равным $-273,15^{\circ}\text{C}$
Шкала Кельвина	В термодинамике используется шкала Кельвина, в которой температура отсчитывается от абсолютного нуля. $T = t^{\circ}\text{C} + 273$



Поскольку температура — мера кинетической энергии молекул, следовало бы выражать её в энергетических единицах (в системе СИ — в джоулях). Однако измерение температуры началось задолго до создания молекулярно-кинетической теории, поэтому практические шкалы измеряют температуру в условных единицах — градусах.

Внутренняя энергия



Внутренняя энергия тела U — сумма кинетической энергии хаотического теплового движения частиц (атомов или молекул) тела и потенциальной энергии их взаимодействия:

$$U = \sum E_k + \sum E_{\text{п.}}$$



Идеальный газ — модель, в которой пренебрегают взаимодействием между молекулами, поэтому внутренняя энергия идеального газа — это только кинетическая энергия частиц.

Факторы, от которых зависит внутренняя энергия идеального газа	Формула
• Агрегатное состояние вещества (внутренняя энергия тела в газообразном состоянии всегда больше его внутренней энергии в жидком и твёрдом состоянии). • Температура тела. • Количество вещества	$U = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{M} \cdot R \cdot T = \frac{i}{2} \cdot \nu \cdot R \cdot T = \frac{i}{2} \cdot p \cdot V$ Число степеней свободы i — количество независимых величин, с помощью которых может быть задано положение молекулы в пространстве: $i=3$ для одноатомного газа, $i=5$ для двухатомного газа, $i=6$ для многоатомного газа

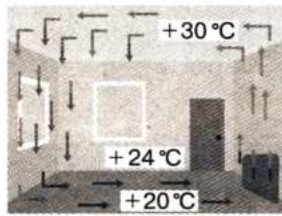


Внутренняя энергия U идеального газа не изменяется в изотермическом процессе:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = 0 \text{ при } T = \text{const},$$

где ΔU — изменение внутренней энергии, U_1 и U_2 — её начальное и конечное значения, T — температура.

Способы изменения внутренней энергии

Совершение работы над телом	Теплообмен
- Если работа совершается над телом, его внутренняя энергия увеличивается. - Если работу совершает само тело, его внутренняя энергия уменьшается	Теплообмен — переход внутренней энергии одного тела во внутреннюю энергию другого тела без совершения механической работы
 а)  б) Примеры увеличения внутренней энергии тела за счёт совершения над ним работы: а) нагревание трением до температуры испарения; б) нагревание трением до температуры воспламенения	 а)  б) Примеры увеличения внутренней энергии тела за счёт теплопередачи: а) конвекция (тёмные стрелки — холодный воздух, светлые стрелки — тёплый воздух); б) излучение

Теплопередача



В теплопередаче одновременно могут участвовать все три вида изменения внутренней энергии: теплопроводность, конвекция, излучение.

Теплопроводность	Конвекция	Излучение
Перенос энергии от более нагретых участков тела к менее нагретым за счёт теплового движения и взаимодействия микрочастиц (атомов, молекул, ионов и т. п.), который приводит к выравниванию температуры тела	Вид теплопередачи, в котором тепло переносится потоками вещества. Различают естественную и вынужденную конвекцию	Вид теплопередачи, при котором энергия передаётся с помощью электромагнитных волн (преимущественно инфракрасного диапазона)
Характерен как для твёрдых веществ, так и для жидкостей и газов	Происходит только в жидкостях и газах	Может происходить в вакууме
		

Количество теплоты, удельная теплоёмкость вещества



Количество теплоты Q — энергия, переносимая от одной системы к другой только за счёт разницы в температурах этих систем.



Удельная теплота парообразования, удельная теплота плавления, удельная теплота сгорания топлива — величины, характеризующие собственные свойства вещества, являются справочными данными.

Определение	Формулы вычисления количества теплоты
Количество теплоты, необходимое для нагревания (выделившееся при охлаждении) тела	$Q = c \cdot m \cdot \Delta t$, где c — удельная теплоёмкость вещества, m — масса тела, Δt — изменение температуры
Количество теплоты, необходимое для плавления (выделившееся при кристаллизации) тела	$Q = \lambda \cdot m$, где λ — удельная теплота плавления вещества, m — масса тела
Количество теплоты, необходимое для парообразования (выделившееся при конденсации) тела	$Q = r \cdot m$, где r — удельная теплота парообразования вещества, m — масса тела
Количество теплоты, выделившееся при сгорании топлива	$Q = q \cdot m$, где q — удельная теплота сгорания топлива, m — масса тела

Удельные величины	Определение
Удельная теплота парообразования Обозначение: r . Единица измерения: Дж/кг	Физическая величина, показывающая, какое количество теплоты необходимо, чтобы обратить жидкость массой 1 кг в пар без изменения температуры
Удельная теплота плавления Обозначение: λ . Единица измерения: Дж/кг	Физическая величина, показывающая, какое количество теплоты необходимо, чтобы обратить твёрдое тело массой 1 кг в жидкость без изменения температуры
Удельная теплота сгорания топлива Обозначение: q . Единица измерения: Дж/кг	Физическая величина, показывающая, какое количество теплоты выделяется при полном сгорании 1 кг топлива

Элементарная работа в термодинамике



Элементарная работа в термодинамике — взаимодействие системы с внешними объектами, в результате которого изменяются параметры системы.

Описание	Рисунок	Вывод, формулы
Рассмотрим цилиндр с идеальным газом, который находится под подвижным поршнем. Пусть внешняя сила, действующая на поршень, перемещает его из состояния 1 в состояние 2		Работа силы равна $A = F \cdot \Delta x$. Со стороны газа на поршень действует сила $F = p \cdot S$. Подставив вторую формулу в первую, получим: $A = p \cdot S \cdot \Delta x = p \Delta V$

ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ РАБОТА

Газ совершает работу расширяясь.

$$A > 0 \text{ при } \Delta V > 0$$

ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ РАБОТА

Внешние силы совершают работу над газом, сжимая его.

$$A < 0 \text{ при } \Delta V < 0$$



Принято считать, что если система совершает работу против действия внешних сил, то эта работа положительная. Если внешние силы совершают работу над системой, то работа отрицательная.

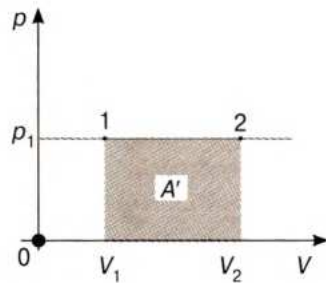
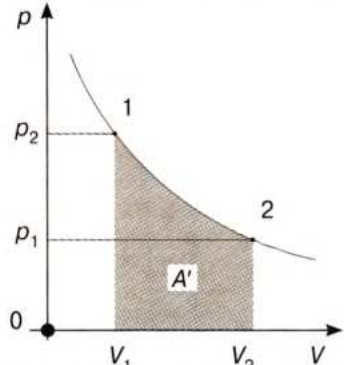
Графическое определение работы



Площадь фигуры под графиком равна термодинамической работе самой системы.



Работа — мера изменения внутренней энергии системы в процессе её совершения. Она является функцией процесса, но не является функцией состояния.

Условие		
Строим график процесса $p(V)$. Определяем на графике точки, которые соответствуют системе в состояниях 1 и 2		
Изобарный процесс	Изотермический процесс	Изохорный процесс
		При изохорном процессе ($\Delta V \rightarrow 0$) работа не совершается

Первый закон термодинамики



Первый закон термодинамики — закон сохранения энергии: при любых физических взаимодействиях энергия не возникает и не исчезает, а только передаётся от одних тел другим или превращается из одной формы в другую.

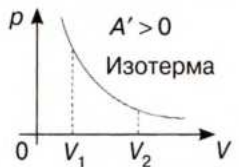
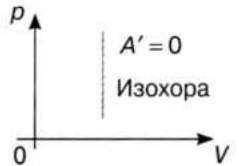
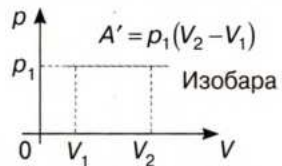
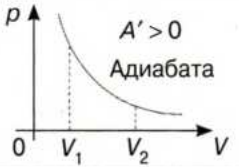
Два подхода к формулировке первого закона термодинамики

Изменение внутренней энергии	Количество теплоты
Изменение внутренней энергии термодинамической системы при переходе из одного состояния в другое равно сумме работы, выполненной внешними силами, и количества теплоты, переданного системе извне	Количество теплоты, получаемое системой извне при её переходе из одного состояния в другое, расходуется на повышение внутренней энергии системы и на работу, которую она выполняет против внешних сил
$\Delta U = Q + A,$ где ΔU — изменение внутренней энергии системы, A — работа внешних сил, Q — количество теплоты, полученное системой. $[Q] = 1 \text{ Дж}, [A] = 1 \text{ Дж}, [\Delta U] = 1 \text{ Дж}$	$Q = \Delta U + A',$ где ΔU — изменение внутренней энергии системы, A' — работа термодинамической системы, Q — количество теплоты, полученное системой. $[Q] = 1 \text{ Дж}, [A] = 1 \text{ Дж}, [\Delta U] = 1 \text{ Дж}$



Внешняя работа над системой равна работе системы, но с противоположным знаком: $A' = -A$.

Термодинамика изопроцессов

Процесс	Работа газа при расширении	Закон сохранения энергии
Изотермический $T = \text{const}, \Delta T = 0$		$\Delta U = 0$ $Q = A'$
Изохорный $V = \text{const}, \Delta V = 0$		$A' = 0$ $Q = \Delta U$
Изобарный $p = \text{const}$		$\Delta U = Q + A$ $Q = \Delta U + A'$
Адиабатный $Q = 0$		$Q = 0$ $\Delta U = -A'$

Второй закон термодинамики



- Невозможен процесс, единственным результатом которого была бы передача энергии от холодного тела к горячему (Р. Клаузиус).
- Невозможен такой периодический процесс, единственным результатом которого было бы совершение работы за счёт теплоты, взятой от одного источника (У. Кельвин).

Виды тепловых процессов	
Обратимые	Необратимые
Обратимыми называют процессы перехода системы из одного равновесного состояния в другое, которые можно провести в обратном направлении через ту же последовательность промежуточных равновесных состояний. ✓ Нагревание и охлаждение; плавление и кристаллизация; парообразование и конденсация	Необратимыми называют процессы, которые могут протекать только в одном направлении. ✓ Кусок льда, внесённый в комнату, не отдаёт энергию окружающей среде и не охлаждается. ✓ Маятник самостоятельно не наращивает амплитуду колебаний



Процессы, невозможные согласно второму закону термодинамики:

- самопроизвольный переход тепла от холодного тела к более тёплому;
- вечный двигатель второго рода.

Принцип действия тепловых машин. КПД



Тепловой двигатель — устройство, преобразующее внутреннюю энергию топлива в механическую энергию.

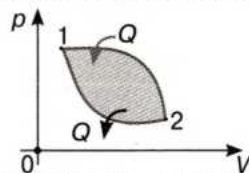
Основные части тепловой машины	Схема
1. Рабочее тело (газ или пар), совершающее работу. 2. Нагреватель, сообщаящий энергию рабочему телу. 3. Холодильник, поглощающий часть энергии от рабочего тела. Наличие холодильника и передача ему части полученной от нагревателя теплоты являются обязательными, в противном случае рабочее тело неизбежно придёт в тепловое равновесие с нагревателем, и поток теплоты прекратится	

Основные формулы

Физическая величина	Формула
Работа тепловой машины равна разности энергий	$A = Q_1 - Q_2,$ где Q_1 — количество теплоты, переданное системе, Q_2 — количество теплоты, отданное системой
Коэффициент полезного действия (КПД) η — отношение работы, совершаемой двигателем за цикл, к количеству теплоты, полученному от нагревателя	$\eta = \frac{A}{Q_1} \cdot 100\% = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100\%$ $\eta < 1$



Процесс работы тепловой машины всегда циклический. **Замкнутый процесс (цикл)** — совокупность определённых термодинамических процессов, в результате которых система возвращается в исходное состояние.



Тепловые двигатели. Принцип работы

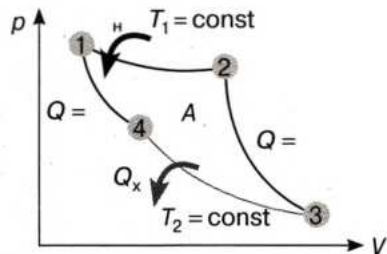


Основная идея действия теплового двигателя: превращение внутренней энергии топлива в работу.

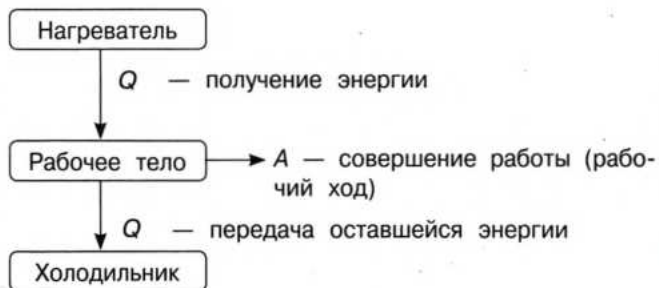
Идеальный цикл Карно

Теорема: любая реальная тепловая машина, работающая с нагревателем температуры T_1 и холодильником температуры T_2 , не может иметь коэффициент полезного действия, превышающий КПД идеальной тепловой машины.

Цикл Карно



Основные части двигателя и их работа



ЭЛЕКТРОДИНАМИКА



Электродинамика — наука о свойствах и закономерностях электромагнитного поля, осуществляющего взаимодействие между электрически заряженными телами.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ



Электростатика — раздел электродинамики, изучающий взаимодействие неподвижных зарядов.

Электризация тел и её проявление

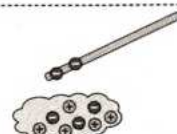


Электризация тел — сообщение электрических зарядов телам или наведение зарядов на них (например, под влиянием расположенного рядом заряженного тела).



При электризации часть электронов переходит с одного тела на другое. Тело, с которого электроны ушли, приобретает положительный заряд, а тело, на которое пришли, — отрицательный. Главное свойство электризации — **сохранение заряда**.

До взаимодействия



После взаимодействия



Элементарный заряд — наименьший заряд, им обладают электрон (отрицательный, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл) и протон (положительный, равный заряду электрона).

Способы электризации

Электризация трением (соприкосновением)	Электризация индукцией (без соприкосновения)
Процесс, в ходе которого часть электронов переходит с одного тела на другое	Процесс, в ходе которого происходит перераспределение электрических зарядов внутри тела

Электрический заряд

Физические понятия	Примеры, пояснения
Электрический заряд — физическая величина, определяющая силу электромагнитного взаимодействия	Примеры обозначения: q , Q . Единица измерения: Кл
Виды электрических зарядов	Положительные, отрицательные
Носители зарядов	Элементарные частицы, атомы, молекулы, макроскопические тела



Атом состоит из ядра и летающих вокруг него электронов. Ядро состоит из протонов и нейтронов.

Носителем отрицательного заряда является электрон, положительного — протон. Нейтрон — нейтральная частица, не имеет заряда.



Элементарный электрический заряд



Электрический заряд — скалярная характеристика тела, обладающая определёнными фундаментальными свойствами.

Свойства электрического заряда	Примеры, формулы
Существует два вида заряда: положительный и отрицательный. Одноимённые заряды отталкиваются, разноимённые — притягиваются	
В природе отрицательных зарядов столько же, сколько положительных. Возникновение заряженных тел обусловлено не рождением зарядов, а их перераспределением (возникающим, например, при трении)	
Существует минимальное значение электрического заряда, одинаковое по модулю для положительных и отрицательных зарядов	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Величина заряда q может принимать только дискретные значения	Любой заряд кратен элементарному заряду: $q = N \cdot e$, где N — целое число
Закон сохранения заряда: в любой электрически изолированной системе тел алгебраическая сумма зарядов этих тел не изменяется во времени	$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const}$



Заряд является релятивистским инвариантом, то есть его величина не зависит от системы отсчёта.

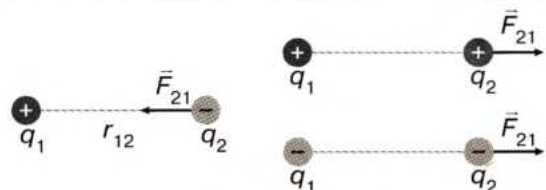
Действие электрического поля на электрические заряды



Взаимодействие неподвижных электрических зарядов называют **электростатическим (кулоновским) взаимодействием**.

Закон Кулона

Понятие	Пояснение
Величина силы	Величина силы электростатического взаимодействия между двумя неподвижными точечными зарядами q_1 и q_2 прямо пропорциональна произведению модулей этих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними
Направление силы Кулона	Силовая линия параллельна линии, соединяющей заряды, а её направление определяется знаками зарядов
Формула	$\vec{F} = k \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{\varepsilon \cdot r^2},$ где $\vec{F}$ — сила Кулона, q_1 — заряд первого тела (точечного заряда), q_2 — заряд второго тела (точечного заряда), r — расстояние между зарядами
Точечный заряд	Заряженное тело, размеры которого пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием до взаимодействующих с ним других заряженных тел

Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Коэффициент пропорциональности в воздухе	$k = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Кл}^2}$
Диэлектрическая проницаемость среды	Показывает, во сколько раз уменьшается сила электростатического взаимодействия в данной среде. При этом среда всегда уменьшает электрическое поле по сравнению с вакуумом, то есть $\epsilon > 1$. В случае вакуума полагаем, что $\epsilon = 1$
Сила Кулона, как и гравитационные силы, подчиняется третьему закону Ньютона	$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$
Вектор силы $\vec{F}_{21}$, действующей со стороны второго заряда на первый, направлен в сторону второго заряда, если заряды разных знаков, и в противоположную, если заряды одного знака	



Для определения силы взаимодействия тел, которые не могут рассматриваться как точечные заряды, необходимо разбивать их на элементарные участки, а затем интегрировать по объёму.

Электрическое поле



Электрическое поле — особая форма поля, существующая вокруг тел частиц, обладающих электрическим зарядом, а также в свободном виде в электромагнитных волнах.

Понятие	Определение, пояснение
Основное действие электрического поля	Ускорение тел или частиц, обладающих электрическим зарядом
Основные свойства электрического поля	• Материально. • Действует на заряды с некоторой силой. • Потенциально (работа сил электростатического поля при перемещении заряда по любой замкнутой траектории равна нулю). • Распространяется с конечной скоростью
Изображение электрического поля	Электрическое поле можно изобразить с помощью силовых линий , вдоль которых направлена сила, действующая на пробный электрический заряд со стороны электрического поля в данной точке

Напряжённость электрического поля



Напряжённость электрического поля $\vec{E}$ — силовая характеристика электрического поля в заданной точке.

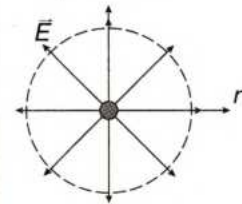
Понятие, пояснение, формулы

Напряжённость электростатического поля $\vec{E}$.

Единицы измерения: Н/Кл, В/м.

Векторная физическая величина, равная отношению силы Кулона $\vec{F}$, с которой поле действует на пробный положительный заряд q_0 , помещённый в данную точку поля, к этому заряду:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}, \quad \vec{E} = k \cdot \frac{q}{r^2},$$

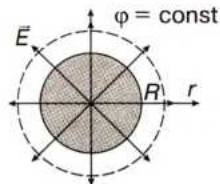


где $k = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Кл}^2}$ — коэффициент пропорциональности, q — модуль заряда, образующего электрическое поле, r — расстояние от источника поля до пробного заряда

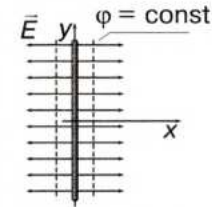
Напряжённость поля, **созданного заряженной сферой** (вне сферы):

$$\vec{E} = \frac{Q}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot r^2},$$

где Q — заряд сферы



Напряжённость поля, **созданного бесконечно заряженной плоскостью** (вне сферы):

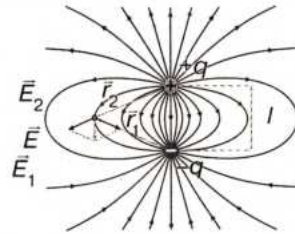


$$\vec{E} = \frac{\sigma}{2 \cdot \epsilon_0},$$

где $\sigma = \frac{Q}{S}$ — поверхностная плотность заряда, Q — заряд, равномерно распределённый по поверхности, S — площадь поверхности

Принцип суперпозиции электрических полей.

Напряжённость электрического поля, создаваемого системой зарядов в данной точке пространства, равна векторной сумме напряжённостей электрических полей, создаваемых в той же точке каждым зарядом по отдельности:



$$\vec{E} = \sum \vec{E}_i = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n,$$

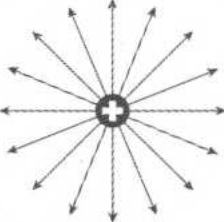
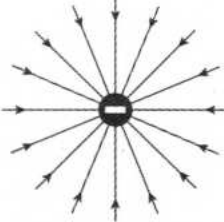
где $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3 \dots \vec{E}_n$ — напряжённости электрических полей, создаваемые в точке зарядами по отдельности

Сила, действующая на заряд q , помещённый в эту точку: $\vec{F}_q = \vec{E} \cdot q$

Поле точечного заряда. Картины линий полей



Электростатическое поле представляют непрерывными линиями напряжённости.

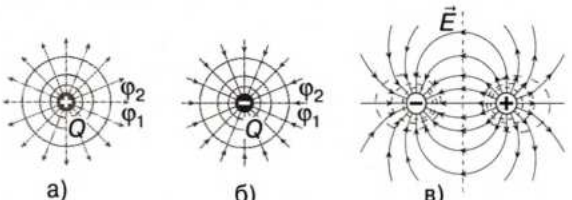
Понятие	Пояснение
Линии напряжённости	Линии, касательные к которым в каждой точке поля совпадают по направлению с вектором напряжённости электростатического поля в данной точке
Изображение линий напряжённости	Положительный заряд является источником линий напряжённости. Отрицательный заряд является стоком линий напряжённости  Электрическое поле положительного точечного заряда  Электрическое поле отрицательного точечного заряда
Линии напряжённости поля	• Не пересекаются. • Выходят из изолированного положительного заряда и уходят в бесконечность. • Входят в изолированный отрицательный заряд из бесконечности. • Модуль напряжённости поля пропорционален степени сгущения линий напряжённости электростатического поля (в области сгущения линий напряжённость поля больше, в области разрежения — меньше)

Энергия и потенциал электростатического поля



Электрическое поле **потенциально**, то есть работа кулоновской силы по перемещению заряда не зависит от траектории.

Физическое понятие, формула	Пояснение
Энергия взаимодействия двух точечных зарядов: $W = \frac{1}{4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r}$	Энергия взаимодействия разноимённых зарядов отрицательна, энергия взаимодействия одноимённых зарядов — положительна
Работа силы электростатического поля: $A = q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = q \cdot \Delta\varphi = q \cdot U$	Работа силы электростатического поля равна произведению модуля перемещаемого заряда q и разности потенциалов в начальной φ_1 и конечной φ_2 точках
Потенциал: $\varphi = \frac{W_q}{q} = \frac{Q}{4\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r} = \frac{A}{q}$	Потенциал электростатического поля в данной точке — скалярная физическая величина, равная отношению потенциальной энергии W_q , которой обладает пробный положительный заряд q , помещённый в данную точку поля, к значению этого заряда
Принцип суперпозиции потенциалов: $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots + \varphi_n$	Если в точке пространства существует несколько электрических полей, то потенциал суммарного поля в данной точке равен алгебраической сумме потенциалов всех полей (с учётом знака)

Физическое понятие, формула	Пояснение
Эквипотенциальная поверхность: $\varphi = \text{const}$  а) б) в)	Поверхность, во всех точках которой потенциал имеет одно и то же значение. При удалении от положительного заряда $+Q$ потенциал уменьшается, а при удалении от отрицательного заряда $-Q$ потенциал возрастает до нуля. Эквипотенциальные поверхности: а) положительного заряда $+Q$ ($\varphi_1 > \varphi_2$); б) отрицательного заряда $-Q$ ($\varphi_1 < \varphi_2$); в) разноимённого диполя

Проводники, диэлектрики и полупроводники

Физические понятия	Пояснения	Примеры
Проводники Высокая концентрация свободных зарядов	Вещества, способные хорошо проводить электрический ток. Основная особенность проводников — наличие свободных зарядов (электронов), которые участвуют в тепловом движении и могут перемещаться по всему объёму проводника	Металлы (типичные проводники), растворы солей, щелочей, кислот, плазма, тело человека
Диэлектрики Свободные заряды практически отсутствуют	Вещества, которые в обычных условиях не проводят электрический ток. При определённых условиях возникает проводимость	Пластмасса, резина, стекло, фарфор, сухое дерево, бумага и др.
Полупроводники	Вещества, в которых количество свободных зарядов зависит от внешних условий (температура, напряжённость электрического поля)	Ряд химических элементов (германий, кремний), сплавы и химические соединения (арсенид галлия)

Электроёмкость



Электроёмкость зависит от формы проводника, поэтому для каждого вида существует своя формула расчёта электроёмкости.

Физическое понятие	Формула
Электроёмкость — скалярная величина, характеризующая способность проводника накапливать электрический заряд	$C = \frac{q}{\varphi},$ где C — электроёмкость, q — электрический заряд, φ — потенциал
Электроёмкость шара	$C = 4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r,$ где ε — относительная диэлектрическая проницаемость среды, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная, r — радиус шара

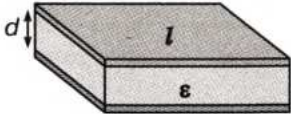
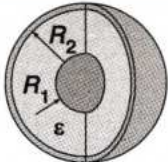
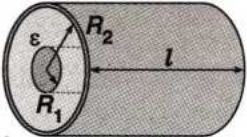
Конденсатор

Определение	Описание	Примеры
Конденсатор — система, состоящая из двух проводников и более	Плоский конденсатор — две параллельные металлические пластины (обкладки), между которыми находится диэлектрик	

Основные характеристики конденсаторов

Физическая величина	Формула	Описание
Электрическая ёмкость конденсатора (Φ)	$C = \frac{Q}{\Phi}$	Электрическая ёмкость (электроёмкость) уединённого проводника C — физическая величина, равная отношению заряда Q проводника к потенциалу Φ этого проводника
Электроёмкость плоского конденсатора	$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S}{d},$ где S — площадь обкладок, d — расстояние между обкладками	Электроёмкость плоского воздушного конденсатора зависит от его геометрических характеристик — площади пластин и расстояния между ними, а также от диэлектрика, заполняющего конденсатор

Виды конденсаторов

Плоский	Сферический	Цилиндрический
 $C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S}{d}$	 $C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)^{-1}$	 $C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}$

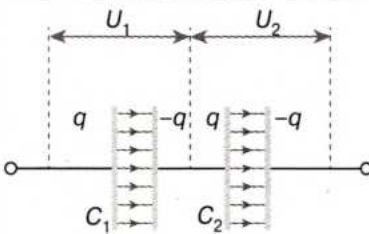
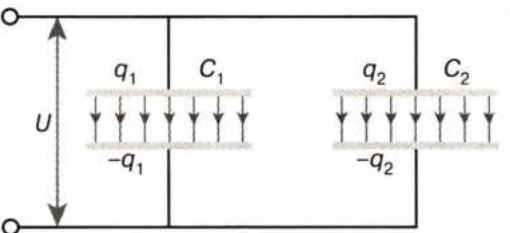
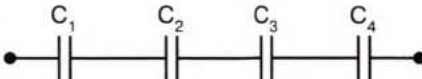
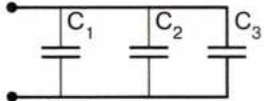
Соединение конденсаторов



Различают последовательное, параллельное и смешанное соединение конденсаторов.



Формулы для параллельного и последовательного соединения остаются справедливыми при любом числе конденсаторов, соединённых в батарею.

Последовательное соединение	Параллельное соединение
 $U = U_1 + U_2 + \dots + U_i$ $q = q_1 = q_2 = \dots = q_i$ $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_i}$	 $U = U_1 = U_2 = \dots = U_i$ $q = q_1 + q_2 + \dots + q_i$ $C = C_1 + C_2 + \dots + C_i$
	
U_1, U_2, U_i — напряжения на обкладках конденсаторов, U — общее напряжение, q_1, q_2, q_i — модули зарядов на обкладках конденсаторов, q — общий заряд, C_1, C_2, C_i — ёмкости конденсаторов, C — общая ёмкость	

Энергия заряженного конденсатора

Физическая величина	Формула
Энергия заряженного конденсатора W_e	$W_e = \frac{Q^2}{2C} = \frac{C \cdot U^2}{2} = \frac{Q \cdot U}{2},$ где Q — заряд на обкладках конденсатора, C — ёмкость, U — напряжение на обкладках
Объёмная плотность энергии конденсатора W	$W = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2}{2} V, \quad V = Sd,$ где E — напряжённость поля между обкладками конденсатора, V — объём пространства между обкладками конденсатора, S — площадь обкладки, d — расстояние между обкладками
Объёмная плотность энергии ω	$\omega = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2}{2},$ где ω — объёмная плотность энергии конденсатора, E — напряжённость поля между обкладками конденсатора



Если уменьшить напряжённость электрического поля между пластинами конденсатора, то уменьшатся модуль скорости вылетевшей частицы и угол α .

ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА



Электрический ток — направленное движение заряженных частиц.



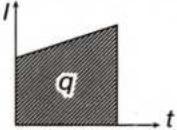
Направление, в котором движутся положительно заряженные частицы, считается **направлением тока**. Вещества, в которых возможно движение зарядов, называются **проводниками**.

Физическое понятие	Описание
Носители заряда — это заряженные частицы, которые перемещаются и тем самым переносят заряд	В металлах носителями заряда являются электроны, в растворах электролитов — положительные и отрицательные ионы, в полупроводниках — электроны и дырки, в газах — положительные ионы и электроны, в вакууме — любые заряженные частицы
Условия существования тока	• Наличие свободных заряженных частиц. • Существование внешнего электрического поля. • Наличие источника тока — источника сторонних сил



Электроны являются единственными носителями тока в металлах. Направление тока противоположно направлению движения электронов.

Характеристики тока

Физическая величина, формула	Измерение
Сила тока I (А) — скалярная величина: $I = \frac{\Delta q}{\Delta t},$ где I — сила тока, Δq — прошедший заряд, Δt — время прохождения заряда	Ток можно определить как площадь фигуры, ограниченной зависимостью $I(t)$ 
Плотность тока $\vec{j}$ — векторная величина: $\vec{j} = \frac{I}{S},$ где I — сила тока, S — площадь поперечного сечения проводника, расположенного перпендикулярно направлению зарядов	Амперметр — прибор для измерения силы тока. Включается в сеть последовательно. Собственное сопротивление амперметра должно быть мало, чтобы включение амперметра не оказывало влияния на силу тока в цепи
Напряжение U (В) — разность потенциалов между концами однородного проводника: $U = \frac{A}{q}$	Напряжение измеряется вольтметром, который подключается в цепь параллельно

ЗАКОН ОМА ДЛЯ УЧАСТКА ЦЕПИ

Сила тока в однородном проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению проводника.

$$I = \frac{U}{R}, \text{ где } I \text{ — сила тока, } U \text{ — напряжение, } \frac{1}{R} \text{ — коэффициент пропорциональности}$$

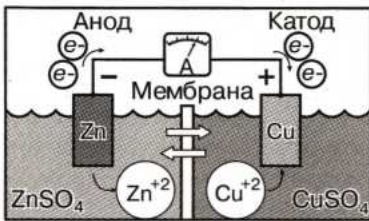
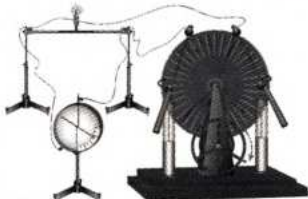
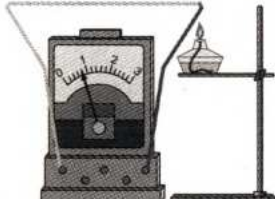
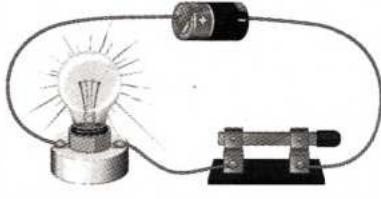
Электрическое сопротивление



Электрическое сопротивление зависит **только от параметров проводника** и не зависит от других параметров электрической цепи, хотя сопротивление и можно вычислить, измерив силу тока и напряжение.

Физическая величина	Определение	Формула
Электрическое сопротивление R (Ом)	Скалярная физическая величина, характеризующая свойства проводника и равная отношению напряжения U на концах проводника к силе I электрического тока	$R = \frac{U}{I}$
Сопротивление проводника	Сопротивление проводника зависит от материала, из которого изготовлен проводник, его длины и сечения	$R = \rho \frac{l}{S},$ где ρ — удельное сопротивление вещества проводника, l — длина проводника, S — площадь сечения
Удельное сопротивление вещества ρ	Физическая величина, показывающая, каким сопротивлением обладает сделанный из этого вещества проводник единичной длины и единичной площади поперечного сечения	$\rho = \frac{R \cdot S}{l},$ где R — электрическое сопротивление проводника, l — длина проводника, S — площадь сечения

Источники тока

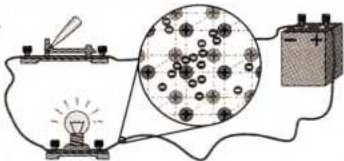
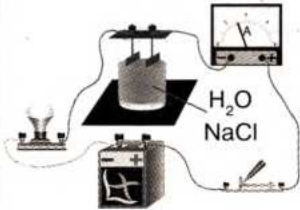
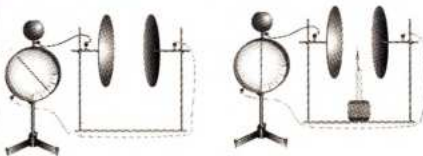
Гальванический элемент	Описание		
Химический источник электрического тока, основанный на взаимодействии двух металлов и (или) их оксидов в электролите, приводящем к возникновению в замкнутой цепи электрического тока	 Действие химических источников тока основано на протекании при замкнутой внешней цепи пространственно разделённых процессов: на отрицательном аноде восстановитель окисляется, образующиеся свободные электроны переходят по внешней цепи к положительному катоду, создавая разрядный ток, где они участвуют в реакции восстановления окислителя		
Механические	Термоэлементы	Фотоэлементы	Химические
			



Часто в быту источником тока неточно называют любой источник электрического напряжения (батарейку, генератор, розетку), но в строго физическом смысле это не так.

Примерами источника тока являются катушка индуктивности, вторичная обмотка трансформатора. Внутреннее сопротивление источника тока стремится к нулю.

Носители электрического заряда в различных средах

Среда	Носители заряда	Пример реализации
Металлы	Свободные электроны	 При прохождении тока металлы нагреваются, ионы кристаллической решётки начинают колебаться с большей амплитудой вблизи положений равновесия. В результате поток электронов чаще соударяется с кристаллической решёткой, следовательно, возрастает сопротивление их движению
Жидкости	Положительные и отрицательные ионы	 Химически чистая вода — плохой проводник. Однако водный раствор кислот, щелочей, солей и др. становится проводником благодаря распаду молекул вещества на ионы. В отличие от металлов и газов, прохождение тока через электролит сопровождается химическими реакциями на электродах, что приводит к выделению на них химических элементов, входящих в состав электролита
Газы	Электроны и положительные ионы	 При обычных условиях все газы являются диэлектриками, то есть не проводят электрический ток. На рисунке пламя внесли в пространство между двумя металлическими дисками, после чего гальванометр отметил появление тока

ЭДС и внутреннее сопротивление источника тока



Электродвижущая сила (ЭДС) является энергетической характеристикой источника.

Понятие	Схема, формула
Роль источника тока: разделить заряды за счёт совершения работы сторонними силами. Любые силы, действующие на заряд, за исключением потенциальных сил электростатического происхождения (кулоновских), называют сторонними силами. Сторонние силы объясняются электромагнитным взаимодействием между электронами и ядрами	
ЭДС (В) — физическая величина, равная отношению работы $A_{\text{ст}}$, совершённой сторонними силами при перемещении электрического заряда по замкнутой цепи, к величине q этого заряда	$\varepsilon = \frac{A_{\text{ст}}}{q}$
Полное сопротивление цепи равно сумме внешнего R и внутреннего r сопротивления цепи	$R_{\text{полн}} = R + r,$ где r — внутреннее сопротивление источника тока



Источник тока характеризуется величиной ЭДС и величиной собственного внутреннего сопротивления r . Эти характеристики свидетельствуют о качестве источника.

КПД источника тока



При перемещении зарядов по цепи источник тока совершает работу.

Физическая величина, формула	Графики
Коэффициент полезного действия (КПД) источника тока — это отношение полезной работы к полной: $\eta = \frac{A_{\text{полез}}}{A_{\text{полн}}} = \frac{P_{\text{полез}}}{P_{\text{полн}}} = \frac{U}{\varepsilon} = \frac{R}{R+r}.$ Полезная работа совершается при перемещении зарядов по внешней цепи, полная — сумма полезной работы и работы по перемещению зарядов внутри источника тока	

Закон Ома для полной электрической цепи

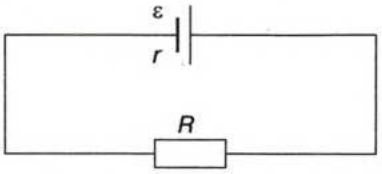


Сила тока в цепи постоянного тока прямо пропорциональна ЭДС источника тока и обратно пропорциональна полному сопротивлению электрической цепи:

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r}.$$



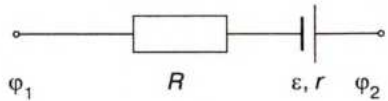
При **коротком замыкании**, когда внешнее сопротивление стремится к нулю, сила тока в цепи определяется внутренним сопротивлением и может оказаться очень большой, что ведёт к опасному перегреву проводов.

Энергетические преобразования в цепи	Схема
Закон сохранения энергии $A = I \varepsilon t \quad A_{\text{внеш}} = I^2 R t \quad A_{\text{внутр}} = I^2 r t$ $\Rightarrow A = A_{\text{внеш}} + A_{\text{внутр}}$ A — работа сторонних сил, $A_{\text{внеш}}$ — работа тока на внешнем участке цепи сопротивлением R, $A_{\text{внутр}}$ — работа тока на внутреннем сопротивлении источника r $\varepsilon = IR + Ir$	
Следствия закона Ома для полной цепи	Формулы
Если $R \gg r$, то $\varepsilon = U$. ЭДС измеряют высокоомным вольтметром при разомкнутой внешней цепи	$I_{\text{кз}} = \frac{\varepsilon}{r}$
Если $R \ll r$, то $I_{\text{кз}} = \frac{\varepsilon}{r}$ — максимальный ток для данной цепи (ток короткого замыкания). Представляет опасность, поскольку $Q = I^2 r t$ возрастает	$\varepsilon = U_1 + U_2$
На внутреннем участке цепи: $A_{\text{внутр}} = U_1 q$, на внешнем участке цепи: $A_{\text{внеш}} = U_2 q$. $A = A_{\text{внутр}} + A_{\text{внеш}}$ ЭДС источника тока равна сумме падений напряжений на внешнем и внутреннем участках цепи	$\varepsilon q = U_1 q + U_2 q \Rightarrow \varepsilon = U_1 + U_2$
Если R растёт, то I уменьшается. При уменьшении силы тока в цепи напряжение увеличивается	$U = \varepsilon - Ir$

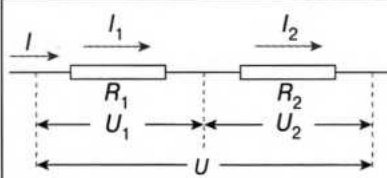
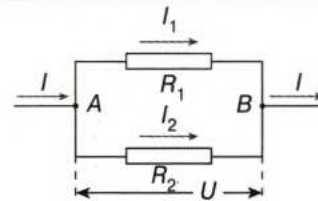
Соединение источников тока

Последовательное соединение источников	Параллельное соединение источников
Полная ЭДС цепи равна алгебраической сумме ЭДС отдельных источников, полное внутреннее сопротивление равно сумме внутренних сопротивлений всех источников тока: $\varepsilon_0 = \varepsilon n$ $r_0 = r n$	Один из источников (с наибольшей ЭДС) работает как источник, остальные — как потребители (на этом принципе основана зарядка аккумулятора)
Если все источники одинаковы и включены в одном направлении, то $I = \frac{\varepsilon n}{R + r n}$	Если все источники одинаковы, то закон Ома записывается в виде $I = \frac{\varepsilon}{R + \frac{r}{n}}$

Закон Ома для неоднородного участка цепи

Формулировка	Схема
$I = \frac{\varepsilon \pm (\varphi_1 - \varphi_2)}{R + r}$ Знак «+» или «-» выбирается в зависимости от того, в одну или противоположные стороны направлены токи, создаваемые источником ЭДС и электрическим полем	

Соединение проводников

Последовательное соединение	Параллельное соединение
 $U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_i$ $I = I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_i$ $R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_i$	 $U = U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_i$ $I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_i$ $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_i}$

Работа и мощность электрического тока

Физическая величина	Формула
Работа электрического тока	$A = q \cdot U = I \cdot U \cdot t = \frac{U^2}{R} t = I^2 \cdot R \cdot t$
Мощность электрического тока	$P = \frac{A}{t} = \frac{q \cdot U}{t} = I \cdot U = \frac{U^2}{R} = I^2 \cdot R$

ЗАКОН ДЖОУЛЯ — ЛЕНЦА

Количество теплоты Q , выделяемое в проводнике с током, равно произведению квадрата силы тока I , сопротивления проводника R и времени Δt прохождения по нему тока.

$$Q = I^2 \cdot R \cdot \Delta t$$

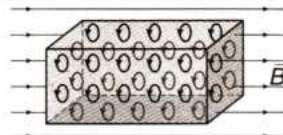
МАГНИТНОЕ ПОЛЕ



Магнитное поле — особый вид материи, осуществляющий взаимодействие между электрическими токами, движущимися зарядами и постоянными магнитами.

ГИПОТЕЗА АМПЕРА

Магнитные свойства вещества создают элементарные токи, возникающие из-за движения заряженных микрочастиц — электронов, протонов, ионов.

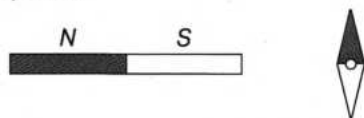


Среда существования магнитного поля	Демонстрация	
Движущиеся заряженные частицы	 Любой движущийся электрон окружён магнитным полем. Каждый электрон действует как микроминиатюрный постоянный магнит	
Электрический ток (направленное движение заряженных частиц)	Проводник без тока 	Проводник с током притягивает железные опилки  Проводник с током
Постоянные магниты	 Магнит — объект, изготовленный из определённого материала, который притягивает железо и создаёт вокруг себя магнитное поле	

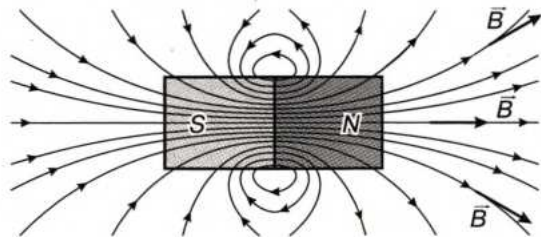
Основные свойства магнитного поля

Свойства, схемы, пояснения

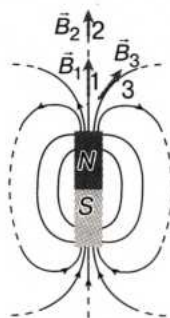
Магнитные свойства можно исследовать с помощью магнитной стрелки.



Обозначение полюсов: N (северный) и S (южный). В магнитном поле стрелка устанавливается вдоль определённого направления, которое характеризуется **вектором $\vec{B}$ индукции магнитного поля**.

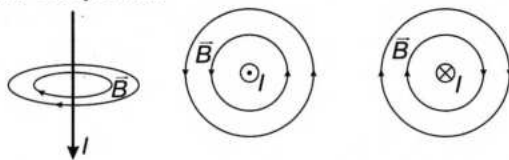


За направление вектора $\vec{B}$ принимается направление от южного S к северному N полюсу **внутри магнита**



Для визуализации магнитного поля используются **силовые линии**, вдоль которых в магнитном поле устанавливаются магнитные стрелки

Поле, обладающее замкнутыми силовыми линиями, называется **вихревым**



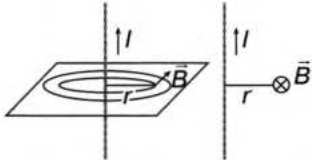
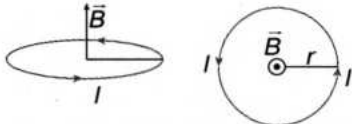
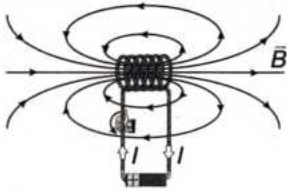
В **однородном магнитном поле** силовые линии параллельны и находятся на одинаковом расстоянии друг от друга

Вектор магнитной индукции



Вектор магнитной индукции — силовая характеристика магнитного поля.

Понятие	Формула, пояснение
Магнитная индукция — векторная величина, характеризующая силовое действие поля	$\vec{B} = \frac{\vec{F}}{I \cdot l},$ где $\vec{B}$ — вектор индукции магнитного поля, $\vec{F}$ — сила магнитного поля, I — сила тока в проводнике, l — длина проводника
Единица измерения магнитной индукции: тесла (Тл)	Индукция такого магнитного поля, в котором на каждый метр длины проводника при силе тока 1 А действует максимальная сила Ампера 1 Н
Обозначение направления вектора магнитной индукции	← — влево → — вправо ⊙ — выходит из плоскости рисунка ⊗ — уходит в плоскость рисунка
Правило правого винта для определения направления вектора: если направление вращения правого винта совпадает с направлением тока в контуре, то его поступательное движение укажет направление индукции магнитного поля, создаваемого током в контуре	Направление вращения винта совпадает с направлением магнитного поля Куда закручивается винт, туда движется ток 

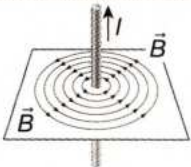
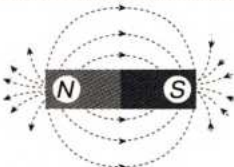
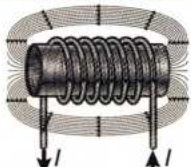
Понятие	Формула, пояснение
Индукция магнитного поля бесконечного прямолинейного проводника с током на расстоянии r от него 	$\vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi r},$ где $\vec{B}$ — вектор индукции магнитного поля, μ_0 — магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}}{\text{А}}$, I — сила тока в проводнике, r — расстояние до проводника
Индукция магнитного поля в центре тонкого кругового витка радиуса r 	$\vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot I}{2r},$ где $\vec{B}$ — вектор индукции магнитного поля, μ_0 — магнитная постоянная, I — сила тока в проводнике, r — радиус кругового витка
 Индукция магнитного поля соленоида (катушка, витки которой последовательно обходятся током в одном направлении)	$\vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot n \cdot I}{l},$ где $\vec{B}$ — вектор индукции магнитного поля, μ_0 — магнитная постоянная, I — сила тока в проводнике, n — число витков соленоида, l — длина соленоида

ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ

Если магнитное поле в данной точке пространства создаётся несколькими источниками поля, то магнитная индукция — векторная сумма индукций каждого из полей в отдельности.

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n$$

Силовые линии магнитного поля

Магнитное поле прямого тока	Магнитное поле постоянного магнита	Магнитное поле соленоида
		



Свойства силовых линий магнитного поля:

- замкнуты;

- не пересекаются;
- чем линии гуще, тем поле сильнее.

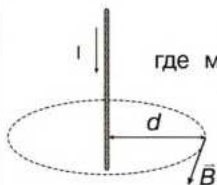
Частные случаи: описание, формулы, схемы

Индукция магнитного поля, создаваемого **прямым бесконечным проводником** с током на расстоянии d от проводника:

$$B = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot I}{2\pi d},$$

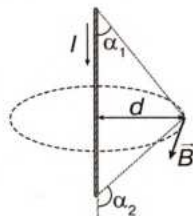
где магнитная постоянная

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}}{\text{А}}$$



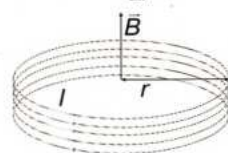
Индукция магнитного поля, создаваемого **прямым конечным проводником** с током на расстоянии d от проводника:

$$B = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot I}{2\pi d} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$$

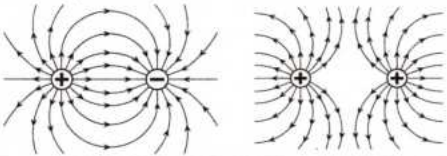
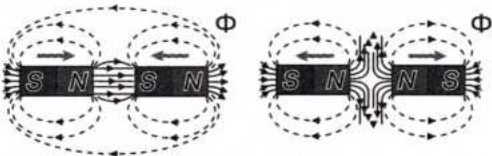


Индукция магнитного поля **в центре соленоида** с числом витков N и радиусом катушки r :

$$B = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot I \cdot N}{2r}$$



Сравнение магнитного и электрического полей

	Электрическое поле	Магнитное поле
Источник поля	Электрический заряд	Магнит, ток (движущиеся заряды)
Условие обнаружения поля	Если происходит взаимодействие зарядов	Если происходит взаимодействие магнитов, проводников с током
Графическое изображение поля	Силовые линии или линии напряжённости	Силовые линии или линии (магнитной) индукции
Характер линий поля	• Линии имеют начало и конец. • Силовые линии начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных	• Линии замкнуты. • Выходят из северного полюса и входят в южный полюс, внутри магнита линии замыкаются
Взаимодействие тел	Разноимённые заряды притягиваются, одноимённые — отталкиваются 	Разноимённые магнитные полюса притягиваются, одноимённые — отталкиваются 
Объект исследования поля	Пробный заряд (положительный)	Проводник с током (с ничтожно малым собственным магнитным полем)
Силовая характеристика поля	Вектор напряжённости $\vec{E}$. Единица измерения: 1 Н/Кл	Вектор магнитной индукции $\vec{B}$. Единица измерения: 1 Тл

Сила Ампера, её направление и величина

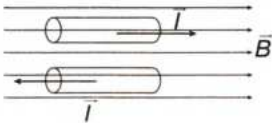
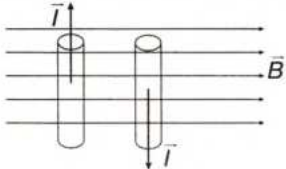
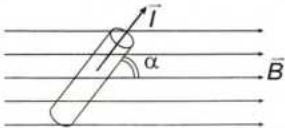


Магнитное поле действует на проводник с током (притягивает его или отталкивает).

ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ

Сила, с которой магнитное поле действует на помещённый в него отрезок проводника с током, равна произведению силы тока I , модуля вектора магнитной индукции B , длины l отрезка проводника и синуса угла α между направлениями тока и магнитной индукции.

$$\vec{F}_A = I \cdot \vec{B} \cdot l \cdot \sin \alpha$$

Физическое понятие	Описание, формула		
Положение проводника в магнитном поле	 $\vec{F}_A = 0 \quad (\alpha = 0^\circ, 180^\circ)$	 $\vec{F}_A = \max \quad (\alpha = 90^\circ)$	 $0 < F_A < F_A (\max)$
Закон Ампера для проводника произвольной формы в неоднородном магнитном поле	$d\vec{F} = I [d\vec{l}, \vec{B}],$ где $I d\vec{l}$ — элемент тока, малый участок проводника, направление которого совпадает с направлением тока в проводнике		

Физическое понятие	Описание, формула
Направление силы Ампера определяется по правилу левой руки	1. Вектор индукции входит в ладонь. 2. Четыре пальца сонаправлены с током. 3. Большой палец указывает направление силы Ампера
Следствие закона Ампера	Проводники с токами, текущими в одном направлении, притягиваются, а проводники с токами, текущими в противоположных направлениях, отталкиваются
Взаимодействие двух проводников с током	Проводник с током создаёт вокруг себя магнитное поле, в это поле помещается второй проводник с током, следовательно, на него будет действовать сила Ампера. Направление силы Ампера зависит от направления линий индукции магнитного поля, которое, в свою очередь, зависит от направления тока в проводнике. Если считать, что проводник 2 находится в магнитном поле, созданном током в проводнике 1 (и наоборот), то индукция магнитного поля будет рассчитываться по формуле: $F_A = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r} \Delta l$, где r — расстояние между проводниками, Δl — элемент длины проводника 2



Использование силы Ампера: электрический двигатель, электроизмерительные приборы, громкоговоритель.

Сила Лоренца, её направление и величина



Магнитное поле действует на движущиеся заряженные частицы как внутри проводника, так и в пространстве.

Сила Лоренца — это сила, действующая на движущуюся заряженную частицу со стороны магнитного поля:

$$\vec{F}_L = q \cdot \vec{B} \cdot \vec{v} \cdot \sin \alpha,$$

где $\vec{F}_L$ — сила Лоренца, $\vec{B}$ — вектор индукции магнитного поля, q — заряд частицы, $\vec{v}$ — скорость частицы, α — угол между вектором магнитной индукции $\vec{B}$ и вектором скорости частицы $\vec{v}$.

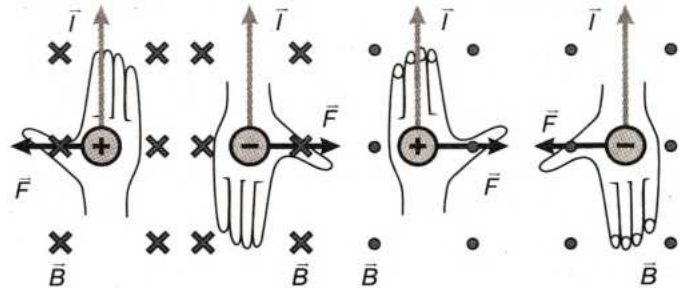
Направление силы Лоренца

Определение

Направление силы Лоренца определяется по правилу левой руки.

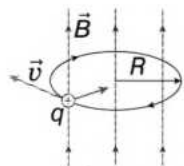
1. Вектор индукции входит в ладонь.
2. Четыре пальца сонаправлены с движением положительной частицы (см. направление тока) и четыре пальца противоположно направлены движению отрицательной частицы.
3. Большой палец указывает направление силы Лоренца

Схема



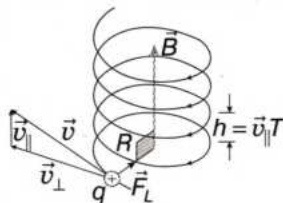
Траектории движения частиц под воздействием силы Лоренца

Если частица влетела в магнитное поле перпендикулярно линиям индукции, то под воздействием силы Лоренца её траекторией будет **окружность**.



Круговое движение заряженной частицы в однородном магнитном поле:

$\vec{F}_L$ — сила Лоренца, R — радиус обращения частицы, $\vec{v}$ — скорость, q — заряд частицы, $\vec{B}$ — индукция магнитного поля



Если частица влетела в магнитное поле под некоторым углом к силовым линиям, то под воздействием силы Лоренца она будет двигаться по **спирали**.

Движение заряженной частицы по спирали в однородном магнитном поле:

$\vec{F}_L$ — сила Лоренца, R — радиус обращения частицы, $\vec{v}$ — скорость, $\vec{v}_\perp$ и $\vec{v}_\parallel$ — вертикальная и горизонтальная составляющие скорости, q — заряд частицы, $\vec{B}$ — индукция магнитного поля, h — шаг спирали, T — период обращения

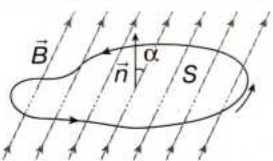
Физическое понятие	Описание, формула
Следствия формулы силы Лоренца и правила левой руки	- Заряженная частица, влетающая в однородное магнитное поле параллельно линиям магнитной индукции, движется равномерно вдоль этих линий. - Заряженная частица, влетающая в однородное магнитное поле в плоскости, перпендикулярной линиям магнитной индукции, движется в этой плоскости по окружности. - При движении заряженной частицы в магнитном поле сила Лоренца не совершает работу: $A_{FL} = 0$
Период обращения частицы в однородном магнитном поле не зависит от её скорости	$T = \frac{2\pi \cdot R}{v} = \frac{2\pi \cdot m}{q \cdot B},$ где R — радиус обращения частицы, v — скорость частицы, m — масса частицы, q — заряд частицы, B — индукция магнитного поля

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

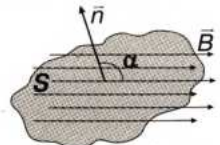
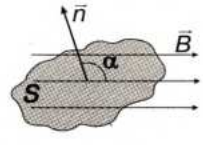
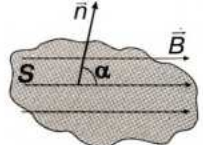


Электромагнитная индукция — физическое явление, заключающееся в возникновении электрического тока в замкнутом контуре при изменении потока магнитной индукции через поверхность, ограниченную этим контуром.

Поток вектора магнитной индукции

Физическое явление	Схема	Формула
Магнитный поток — скалярная физическая величина, характеризующая число линий магнитной индукции поля, пронизывающих замкнутый контур. Единица измерения магнитного потока: $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2$	 Нормаль — это перпендикуляр к плоскости контура	$\Phi = \vec{B}S \cos \alpha,$ где Φ — магнитный поток, $\vec{B}$ — вектор индукции магнитного поля, S — площадь контура, α — угол между нормалью к поверхности и вектором индукции

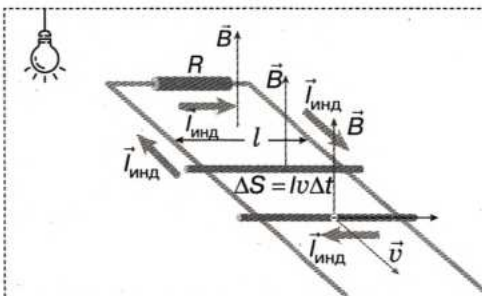
Причины изменения магнитного потока

Изменяется количество линий магнитной индукции	Изменяется площадь контура	Изменяется угол наклона нормали
		

Явление электромагнитной индукции

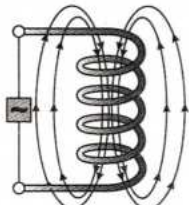


Явление электромагнитной индукции заключается в возникновении электрического тока в замкнутом проводящем контуре при изменении во времени магнитного потока, пронизывающего контур.



Движение проводника в магнитном поле:

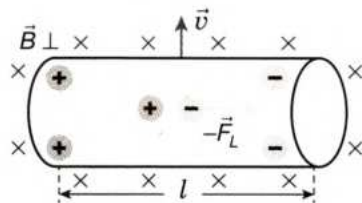
$\vec{B}$ — магнитная индукция, $\vec{I}_{\text{инд}}$ — индуцированный ток в контуре, ΔS — площадь контура, $\vec{v}$ — скорость движения проводника

Замкнутый контур, свойства	Схема, пояснение
Контур — замкнутый провод. При изменении магнитного поля контур усиливают, используя катушку	
Причины изменения магнитного потока, пронизывающего замкнутый контур	• Перемещение контура или его частей в постоянном во времени магнитном поле. • Изменение во времени магнитного поля при неподвижном контуре

ЭДС индукции



ЭДС индукции (разность потенциалов) — электродвижущая сила, возникающая при разделении зарядов в проводнике вследствие его движения в магнитном поле. Разделение зарядов происходит под действием силы Лоренца.



Разделение зарядов в проводнике, движущемся в магнитном поле: $\vec{B}$ — вертикальная составляющая магнитной индукции, $\vec{F}_L$ — сила Лоренца со стороны магнитного поля, l — длина проводника, $\vec{v}$ — скорость движения проводника, $\otimes$ — направление магнитной индукции (в плоскость рисунка)

Величина ЭДС	Формула для расчёта
ЭДС индукции в проводнике, движущемся в однородном магнитном поле	$\varepsilon_i = vBl \sin \alpha,$ где B — индукция магнитного поля, l — длина проводника, v — скорость движения проводника, α — угол между векторами $\vec{v}$ и $\vec{B}$
ЭДС индукции в прямоугольной рамке, движущейся в однородном магнитном поле (ЭДС индуцируется в параллельных сторонах рамки)	$\varepsilon_i = n \cdot v \cdot B \cdot l \cdot \sin \alpha,$ где n — количество витков в рамке

ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ФАРАДЕЯ — МАКСВЕЛЛА

ЭДС индукции определяется как скорость изменения магнитного потока. ЭДС электромагнитной индукции $\mathcal{E}_i$ в замкнутом контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром.

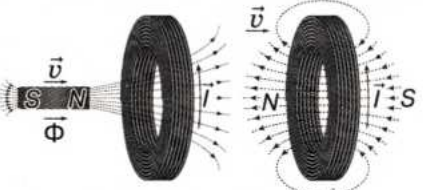
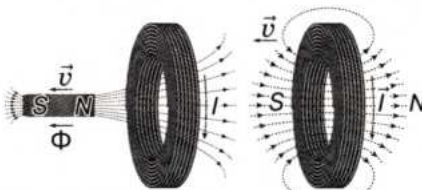
$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\Phi'(t),$$

где $\Delta\Phi$ — изменение магнитного потока, t — время, $\Phi'(t)$ — производная магнитного потока по времени

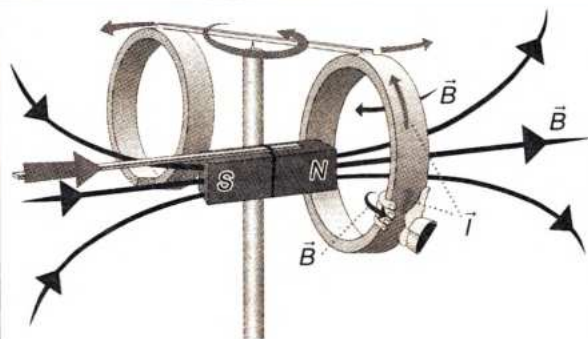
Правило Ленца



Индукционный ток в контуре имеет такое направление, что созданный им магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, препятствует изменению магнитного потока, вызвавшего этот ток.

Пояснение	Иллюстрация правила
Наглядно проиллюстрировать правило Ленца можно с помощью алюминиевого (медного) кольца, приближая его к магниту (удаляя от магнита). При этом кольцо будет отталкиваться (притягиваться). Если $\Phi \downarrow$, то $\vec{B}_0 \uparrow \uparrow \vec{B}_i$. Если $\Phi \uparrow$, то $\vec{B}_0 \uparrow \downarrow \vec{B}_i$.	 Вносим магнит — кольцо отталкивается  Вносим магнит — кольцо притягивается

Алгоритм определения направления индукционного тока



1. Определить направление внешнего магнитного поля $\vec{B}_0$.
2. Определить направление изменения магнитного потока: если поток увеличивается, то $\Delta\Phi > 0$, если уменьшается, то $\Delta\Phi < 0$.
3. Определить направление индукционного магнитного поля: если $\Delta\Phi > 0$, то направление индукции $\vec{B}$ противоположно направлению внешнего поля $\vec{B}_0$, если $\Delta\Phi < 0$, то поля сонаправлены.
4. По правилу правой руки определить направление индукционного тока

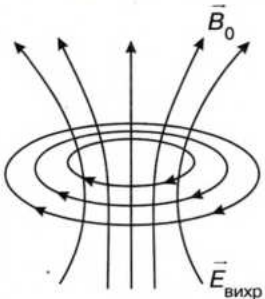
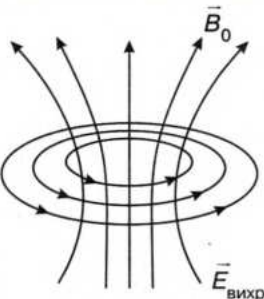
Применение правила Ленца

Магнит приближают		Магнит удаляют	
I случай	II случай	III случай	IV случай
$\Delta\Phi > 0$	$\Delta\Phi > 0$	$\Delta\Phi < 0$	$\Delta\Phi < 0$

Вихревое электрическое поле



Сущность явления электромагнитной индукции в неподвижном проводнике состоит не столько в появлении индукционного тока, сколько в возникновении электрического поля, которое приводит в движение электроны в проводнике: $\Delta B \rightarrow \vec{E}_{\text{вихр}} \rightarrow \vec{I}_i$.

Характеристика	Пояснение	
Чем больше скорость изменения вектора $\vec{B}$, тем больше напряжённость вихревого электрического поля: $\vec{E}_{\text{вихр}} \sim \frac{\Delta \vec{B}}{\Delta t}$	 Увеличение $\vec{B}_0$ $\frac{\Delta \vec{B}}{\Delta t} > 0$ Правило левого винта	 Уменьшение $\vec{B}_0$ $\frac{\Delta \vec{B}}{\Delta t} < 0$ Правило правого винта
Особенности вихревого электрического поля	- Вихревое поле не связано с зарядами, его линии напряжённости замкнуты на себя. - Вихревое электрическое поле непотенциально ($A_{\text{вихр}} \neq 0$ по замкнутому контуру). - Силовые линии не пересекаются. - Направление линий напряжённости совпадает с направлением индукционного тока: $\vec{E}_{\text{вихр}} \uparrow \uparrow \vec{I}_i$	

Сравнение электростатического и вихревого электрического полей

Электростатическое поле	Индукционное (вихревое) электрическое поле
Создаётся неподвижными электрическими зарядами	Вызывается изменениями магнитного поля
Силовые линии поля разомкнуты — потенциальное поле	Силовые линии замкнуты — вихревое поле
Источниками поля являются электрические заряды	Источники поля указать нельзя
Работа сил поля по перемещению пробного заряда по замкнутому пути равна нулю	Работа сил поля по перемещению пробного заряда по замкнутому пути равна ЭДС индукции

Вихревые токи



Под действием ЭДС в массе металлической детали протекают вихревые токи (токи Фуко), которые замыкаются в ней, образуя вихревые контуры токов.

Определение	Особенности вихревых токов
Вихревыми токами называются электрические токи, возникающие вследствие электромагнитной индукции в проводящей среде (обычно в металле) при изменении пронизывающего её магнитного потока	Вихревые токи порождают собственные магнитные потоки, которые, по правилу Ленца, противодействуют магнитному потоку катушки и ослабляют его. Кроме того, они вызывают нагрев сердечника, что является бесполезной тратой энергии

Индуктивность



Индуктивность — физическая величина, являющаяся мерой инертности электрической цепи по отношению к изменению силы тока (зависит от формы и размеров проводника и от магнитных свойств среды).

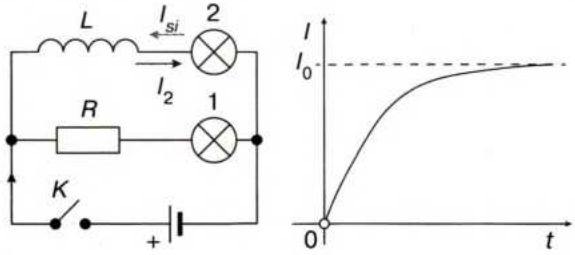
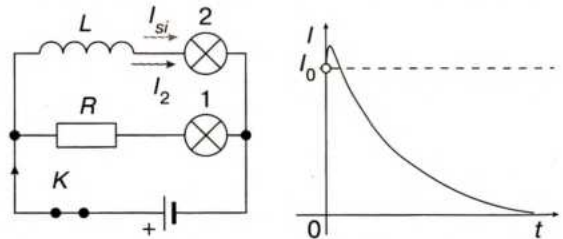
Физическое явление	Формула, пояснение
Индуктивность — одна из основных характеристик цепи переменного тока. Единица измерения: Гн	Индуктивность зависит от формы и размеров соленоида, магнитных свойств окружающей среды: $L = \mu \cdot \mu_0 \frac{N^2 S}{l},$ где S — площадь поперечного сечения соленоида, l — длина катушки, N — количество витков, μ — относительная магнитная проницаемость среды
Собственный магнитный поток Φ , пронизывающий контур или катушку с током, пропорционален силе тока I	$\Phi = L \cdot I$ Коэффициент пропорциональности L называется индуктивностью контура (коэффициентом самоиндукции)



Самоиндукция является важным частным случаем электромагнитной индукции, когда изменяющийся магнитный поток, вызывающий ЭДС индукции, создаётся током в самом контуре. Из-за явления самоиндукции наши телевизоры не включаются и не выключаются мгновенно. При включении возникает препятствующий индукционный ток, а при выключении — поддерживающий.

ЭДС самоиндукции	Формула, пояснение
ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна индуктивности катушки и скорости изменения силы тока в ней	ЭДС самоиндукции, возникающая в катушке с постоянным значением индуктивности, согласно закону Фарадея, равна $\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t},$ где $\Delta\Phi$ — изменение магнитного потока, t — время, L — индуктивность катушки, ΔI — изменение силы тока в катушке за время Δt

Направление тока самоиндукции

Замыкание ключа	Размыкание ключа
При замыкании ключа ток в цепи нарастает, поэтому индукционный ток имеет противоположное направление 	При размыкании ключа ток убывает, следовательно, индукционный ток имеет то же направление, то есть поддерживает внешний ток. Значения токов складываются, при этом наблюдается повышение суммарного тока по сравнению с номинальным 

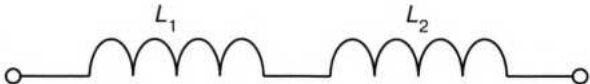
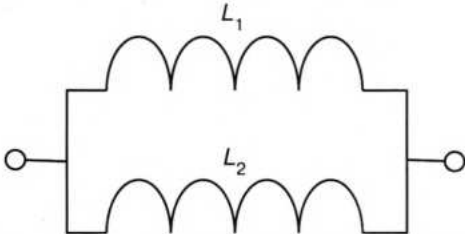


Направление тока самоиндукции **определяется по правилу Ленца**: ток самоиндукции всегда направлен так, что он противодействует изменению основного тока. Если основной ток возрастает, то ток самоиндукции направлен против направления основного тока; если уменьшается, то направления основного тока и тока самоиндукции совпадают.

Аналогия между самоиндукцией и инерцией

Масса	Индуктивность
Характеризует инертность тела, способность влиять на быстроту установления скорости тела	Характеризует способность проводника влиять на быстроту установления тока в цепи
Обнаруживает себя при попытке измерить скорость тела: $m = \frac{F \Delta t}{\Delta v}, \quad m = \frac{p}{v}$	Обнаруживает себя в цепях с изменяющимся током: $L = \frac{\varepsilon_{SI} \Delta t}{\Delta I}, \quad L = \frac{\Phi}{I}$
Масса — одна из основных характеристик любого материального объекта, являющаяся мерой его инертности и гравитации	Индуктивность проводника — скалярная физическая величина, численно равная отношению магнитного потока, созданного током в соленоиде, к силе тока в нём
Масса препятствует изменению скорости тела	Индуктивность препятствует изменению тока в проводнике
Масса зависит от рода вещества, размеров и формы тела: $m = \rho V = \rho S l$	Индуктивность соленоида зависит от его размеров, формы и магнитных свойств: $L = \mu \cdot \mu_0 \frac{N^2 S}{l}$

Соединение катушек индуктивности

Последовательное соединение	Параллельное соединение
	
$L = L_1 + L_2$	$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}$

Энергия магнитного поля катушки с током



Энергия W_L магнитного поля катушки с индуктивностью L , создаваемого током I :

$$W_L = \frac{\Phi \cdot I}{2} = \frac{L \cdot I^2}{2} = \frac{\Phi^2}{2 \cdot L},$$

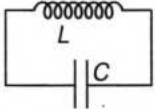
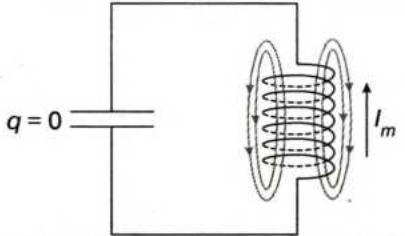
где Φ — магнитный поток через контур, I — сила тока в контуре.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ



Общность колебательных и волновых закономерностей проявляется в общности математических уравнений, описывающих процессы различной физической природы.

Колебательный контур

Физическое явление	Схема, пояснение
Колебательный контур — замкнутая электрическая цепь, состоящая из конденсатора ёмкостью C и катушки с индуктивностью L, в которой могут возбуждаться собственные колебания, обусловленные перекачкой энергии из электрического поля конденсатора в магнитное поле катушки и обратно	Колебательный контур — это цепь, состоящая из катушки индуктивности и конденсатора. C — ёмкость конденсатора, L — индуктивность катушки 
Причины возникновения колебаний в контуре	• Сообщение заряда обкладкам конденсатора. • Возбуждение в катушке тока (например, при переносе её в переменное магнитное поле)
Процесс электромагнитных колебаний	

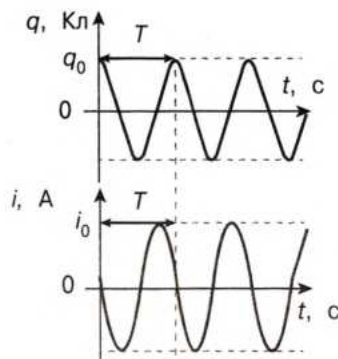


В колебательном контуре происходят гармонические колебания заряда, силы тока и напряжения по законам синуса или косинуса.

По закону синуса

Уравнение колебания заряда: $q = q_0 \sin(\omega t + \varphi_0)$.

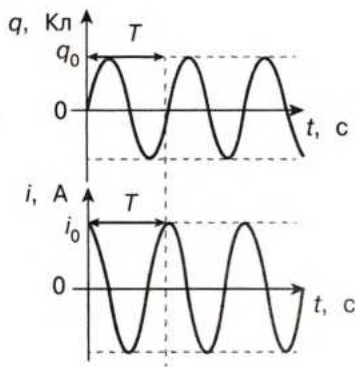
Уравнение колебаний силы тока: $i = i_0 \cos(\omega t + \varphi_0)$, причём $i = q'(t)$



По закону косинуса

Уравнение колебания заряда: $q = q_0 \cos(\omega t + \varphi_0)$.

Уравнение колебаний силы тока: $i = i_0 \sin(\omega t + \varphi_0)$, причём $i = q'(t)$



q — мгновенное значение заряда конденсатора, q_0 — амплитудное значение силы тока, i — мгновенное значение силы тока, i_0 — амплитудное значение силы тока, $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$ — циклическая частота колебаний в контуре, ν — собственная частота, T — период колебаний, φ_0 — начальная фаза колебаний, t — время

ФОРМУЛА ТОМСОНА

Определяет период собственных колебаний T заряда на конденсаторе и силу тока в катушке индуктивности.

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C},$$

где T — период колебаний, C — ёмкость конденсатора, L — индуктивность катушки

**ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ
В КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ**

Если сопротивление контура равно нулю, то полная электромагнитная энергия в процессе колебаний не меняется.

$$W_{\text{полн}} = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C},$$

где q — мгновенное значение заряда конденсатора, i — мгновенное значение силы тока, L — индуктивность катушки, $W_{\text{полн}}$ — полная энергия в контуре

Физическая величина	Формула для расчёта
Собственная частота колебаний	$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$
Циклическая (круговая) частота колебаний	$\omega = 2\pi \cdot \nu = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$

Сравнение механических и электромагнитных колебаний

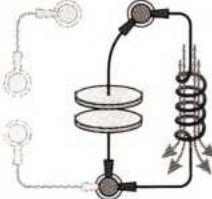
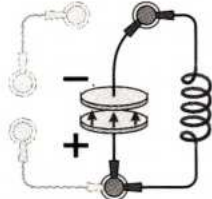
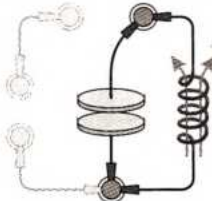
	Механические колебания	Электромагнитные колебания
Параметры колебательной системы	Масса груза m . Жёсткость пружины k	Индуктивность катушки L . Величина, обратная ёмкости, $\frac{1}{C}$
Энергия	Кинетическая энергия груза: $E_k = \frac{mv^2}{2}.$ Потенциальная энергия пружины: $E_n = \frac{kx^2}{2}$	Энергия магнитного поля катушки: $W_L = \frac{LI^2}{2}.$ Энергия электрического поля конденсатора: $W_C = \frac{q^2}{2C}$
Циклическая частота	$\omega^2 = \frac{k}{m}$	$\omega^2 = \frac{1}{LC}$
Величина, характеризующая отклонение	Координата: $x = x_0 \cos(\omega t)$	Заряд: $q = q_0 \cos(\omega t)$
Величины, характеризующие скорость изменения колебательной системы	$v = v_0 \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$ $a = a_0 \cos(\omega t + \pi)$	$I = I_0 \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$ $\varepsilon_i = \varepsilon_0 \cos(\omega t + \pi)$

Свободные электромагнитные колебания в идеальном колебательном контуре



Свободные электромагнитные колебания — периодически повторяющиеся изменения электромагнитных величин (Q — электрический заряд, I — сила тока, U — разность потенциалов), происходящие без потребления энергии от внешних источников.

Описание колебаний	Схема
Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из катушки индуктивностью L и конденсатора ёмкостью C	
Для того чтобы получить колебательный контур (б), заряжаем конденсатор (а)	а) б)
В момент времени $t=0$ конденсатор имеет максимальный заряд и энергия принимает максимальное значение. Конденсатор заряжен, тока в катушке нет	

Описание колебаний	Схема
В момент времени t_1 конденсатор начинает разряжаться. В цепи и в катушке появляется ток. Его значение возрастает. Явление самоиндукции тормозит рост скорости нарастания тока. Энергия катушки достигает максимального значения	
В следующий момент времени электрические заряды будут снова накапливаться на конденсаторе, обкладка его заряжается теперь отрицательно. Процесс зарядки продолжается до тех пор, пока энергия конденсатора не достигнет максимального значения	
Так как обкладка конденсатора, первоначально заряженная положительно, теперь заряжена отрицательно, ток будет протекать в обратном направлении, конденсатор при этом разряжается	

Вынужденные электромагнитные колебания



Процессы, возникающие в электрических цепях под действием внешнего периодического источника тока, называются **вынужденными колебаниями**.



Вынужденные колебания являются **незатухающими** и происходят на частоте ω внешнего источника.

Схемы и графики вынужденных колебаний в контуре

Схема включения

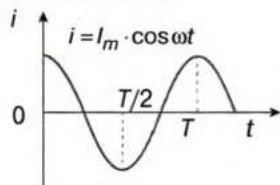
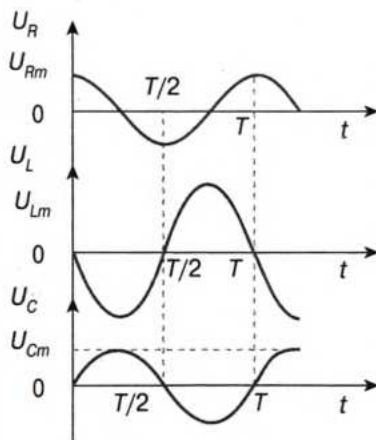
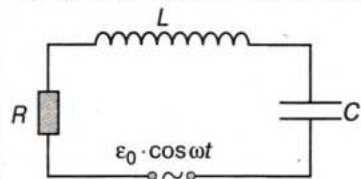


График изменения силы тока

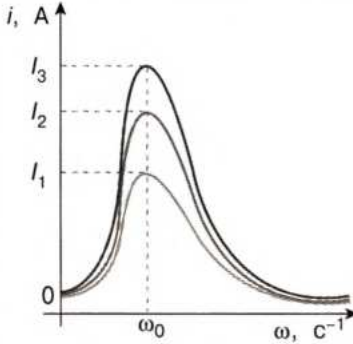


Графики напряжений на резисторе U_R , катушке индуктивности U_L и конденсаторе U_C . R — сопротивление резистора, C — ёмкость конденсатора, L — индуктивность катушки, $\epsilon_0 \cdot \cos(\omega t)$ — уравнение колебаний источника, T — период колебаний, t — время

Резонанс



Явление возрастания амплитуды колебаний тока при совпадении частоты ω колебаний внешнего источника с собственной частотой электрической цепи ω_0 называется **электрическим резонансом**. Резонансная частота равна частоте свободных колебаний контура.

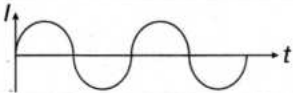
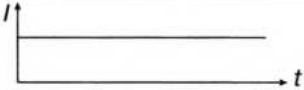
Сила тока при резонансе I_p	График резонанса, резонансная сила тока
$I_p = \frac{\varepsilon_{\max}}{R} = \frac{\varepsilon_{\max}}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}},$ где I_p — резонансное значение силы тока, $\varepsilon_{\max}$ — максимальное значение ЭДС источника, R — активное сопротивление, L — индуктивность катушки, C — ёмкость конденсатора, ω — циклическая частота колебаний	 Резонансная сила тока: $\frac{U}{\varepsilon_0} = I_p.$ ω — циклическая частота контура, ω_0 — резонансная частота, I_1, I_2, I_3 — значения резонансной силы тока для различных контуров
Резонансная частота	Условие резонанса
Частота, при которой наблюдается явление резонанса: $\omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$	$\sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2} = \min, \text{ откуда } \omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C}, \text{ или } \omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$

Переменный ток



Переменный ток — электрический ток, который с течением времени изменяется по величине и направлению или (в частном случае) по величине, сохраняя при этом направление в электрической цепи неизменным.

Отличия переменного и постоянного тока

Переменный ток	Постоянный ток
Поток электронов колеблется с определённой частотой (580 Гц), образуя синусоиду (волнистую линию)	Поток электронов идёт строго по прямой линии, никак не изменяясь. У такого тока нет частоты, поскольку нет колебаний
	
Поток электронов движется хаотично, постоянно изменяя направление. Отдельные электроны в потоке тоже движутся хаотично	Поток электронов (каждый электрон) движется в строгом направлении от «-» к «+»
	
Для переменного тока не требуется соблюдение полярности	Важно соблюдать полярность при подключении батарейки. Если подключить два «минуса» или два «плюса», ток не потечёт

Физическая величина	Определение, формула
Мгновенное значение переменного тока i	Значение тока в фиксированный момент времени
Периодический ток	Переменный ток, мгновенные значения которого повторяются через равные промежутки времени: $i = i(t) = i(t + kT)$, где $k = 0, 1, 2, 3 \dots n$
Амплитуда тока $I_{\max}$	Максимальное мгновенное значение переменного тока, которого он достигает в процессе изменения
Цепи переменного тока	Электрические цепи, в которых происходят установившиеся вынужденные колебания под действием периодического источника тока
Период переменного тока T	Наименьший промежуток времени, по истечении которого мгновенные значения тока повторяются в той же последовательности
Изменение напряжения	Напряжение изменяется по периодическому закону: $\varepsilon(t) = \varepsilon_{\max} \cos(\omega t)$

Выражения для напряжения, сопротивления и силы тока на основных элементах цепи			
Физическая величина	На резисторе	На катушке индуктивности	На конденсаторе
Сила тока	$i = I_{\max} \cos(\omega t) = I_{\max} \cos \frac{2\pi}{T} t = q'(t)$		
Напряжение	$U_R = U_{R\max} \cdot \cos(\omega t)$ $U_{R\max} = I_{\max} \cdot R$	$U_L = U_{L\max} \cdot \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$ $U_{L\max} = I_{\max} \cdot X_L$	$U_C = U_{C\max} \cdot \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$ $U_{C\max} = I_{\max} \cdot X_C$
Сопротивление	$R = \frac{U_{R\max}}{I_{\max}}$	$X_L = \omega \cdot L$	$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$



Значения: i — мгновенное значение силы тока, $I_{\max}$ — максимальное значение силы тока, U_R , U_L , U_C — мгновенные значения напряжения на резисторе, катушке и конденсаторе соответственно, $U_{R\max}$, $U_{L\max}$, $U_{C\max}$ — максимальные значения напряжений, R — сопротивление резистора (активное сопротивление), X_L — индуктивное сопротивление, X_C — ёмкостное сопротивление, L — индуктивность катушки, C — ёмкость конденсатора, ω — циклическая частота колебаний, t — время.

Выражения для напряжения, сопротивления и силы тока на всех элементах цепи	
Физическая величина	Основные уравнения
Сила тока	$i = I_{\max} \cos(\omega t) = I_{\max} \cos \frac{2\pi}{T} t = q'(t)$
Напряжение	$U = U_R + U_L + U_C$ $U_{\max} = \sqrt{U_{R\max}^2 + (U_{L\max} - U_{C\max})^2} = I_{\max} \cdot \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$
Сопротивление	$Z = \frac{U_{\max}}{I_{\max}} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$
Действующее значение силы тока I_D	$I_D = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}$
Действующее значение напряжения U_D	$U_D = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}$
Мощность P_D (в цепи переменного тока выделяется только на активном сопротивлении)	$P_D = I_D \cdot U_D$ Средняя мощность переменного тока на конденсаторе и катушке индуктивности равна нулю

Трансформатор

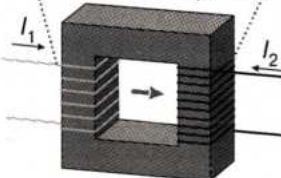


Трансформатор — устройство, служащее для преобразования (повышения или понижения) переменного напряжения.



В основе работы трансформатора лежит явление электромагнитной индукции. Магнитный поток, создаваемый переменным током в первичной обмотке, благодаря наличию сердечника практически без потерь пронизывает витки вторичной обмотки, возбуждая в ней ЭДС индукции.

Описание устройства	Схема устройства
Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, преобразующий переменный ток одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты. Простейший трансформатор состоит из сердечника замкнутой формы, на который намотаны две обмотки: первичная и вторичная. Первичная обмотка подключается к источнику переменного тока, вторичная — к потребителям электроэнергии	Первичная обмотка N_1 витков Магнитный поток Вторичная обмотка N_2 витков Первичный ток I_1 Вторичный ток I_2 Первичное напряжение U_1 Вторичное напряжение U_2

Особенности напряжения	Формула, схема
Напряжение на вторичной обмотке зависит от числа витков в первичной и вторичной обмотках трансформатора	$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2},$ где k — коэффициент трансформации, U_1 — напряжение на первичной обмотке трансформатора, U_2 — напряжение на вторичной обмотке трансформатора, N_1 — число витков на первичной обмотке, N_2 — число витков на вторичной обмотке
Пониженное напряжение При $k > 1$ трансформатор будет понижающим	Первичная обмотка N_1 витков Вторичная обмотка N_2 витков 
Повышенное напряжение При $k < 1$ трансформатор будет повышающим	Первичная обмотка N_1 витков Вторичная обмотка N_2 витков 

Режимы работы трансформатора

Название режима	Определение
Режим холостого хода трансформатора	Режим с разомкнутой вторичной обмоткой
Рабочий режим (ход) трансформатора	Режим, при котором в цепь вторичной обмотки трансформатора включена нагрузка с отличным от нуля сопротивлением
Режим короткого замыкания	Режим, при котором вторичная обмотка трансформатора замкнута без нагрузки. Данный режим опасен для трансформатора, поскольку в этом случае ток во вторичной обмотке максимален и происходит электрическая и тепловая перегрузка системы

Электромагнитные волны и их характеристики



Электромагнитная волна — распространение электромагнитных полей в пространстве и во времени.

Физическое понятие	Определение	Формула
Скорость распространения волны v	В веществе скорость электромагнитной волны меньше, чем в вакууме	$v = \frac{c}{n}$, где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в вакууме, n — показатель преломления среды
Длина волны λ	Кратчайшее расстояние между двумя возмущениями, колеблющимися в одинаковой фазе	$\lambda = v \cdot T = \frac{v}{\nu}$, где v — скорость волны, T — период волны, ν — частота волны



Электромагнитные волны, в отличие от упругих (звуковых) волн, могут распространяться в вакууме или любом другом веществе.

Взаимная ориентация векторов в электромагнитной волне в вакууме

Описание	Схема, формула
Колебания вектора напряжённости $\vec{E}$ и вектора магнитной индукции $\vec{B}$ происходят во взаимно перпендикулярных плоскостях и перпендикулярно направлению распространения волны (вектору скорости)	Синусоидальная (гармоническая) электромагнитная волна $\vec{E}$ — напряжённость электрического поля, $\vec{B}$ — вектор магнитной индукции поля, $\vec{v}$ — скорость распространения электромагнитной волны, λ — длина волны



Электромагнитная волна переносит энергию.

Применение электромагнитных волн в технике и быту

Название волн, диапазон	Область применения
Низкочастотные волны $\nu \leq 100 \text{ КГц}$ $\lambda > 10^3 \text{ м}$	Используются в электротехнике. Все бытовые и промышленные электрические сети работают на частоте 50 Гц, на которой осуществляется передача электрической энергии по линиям и преобразование напряжений трансформаторными устройствами
Радиоволны $100 \text{ КГц} \leq \nu \leq 300 \text{ ГГц}$ $1 \text{ мм} \leq \lambda \leq 3 \text{ км}$	Электромагнитные волны, служащие для передачи сигналов (информации) на расстояние без проводов посредством радиосвязи. Радиоволны создаются высокочастотными токами, текущими в антенне. На этих волнах работает радио- и телевидение, а также радиолокация
Инфракрасное излучение $0,005 \text{ м} \leq \lambda \leq 1 \text{ мкм}$	Тепловое излучение. Невидимо для человека, но ощущается в виде тепла. Радиаторы отопления или обычная грелка излучают инфракрасные волны, человеческое тело также является источником инфракрасных волн
Световое излучение $780 \text{ нм} \leq \lambda \leq 380 \text{ нм}$	Та часть электромагнитных волн, на которые реагируют человеческие глаза. На разные частоты глаза реагируют по-разному
Рентгеновские лучи $\nu > 10^{16} \text{ Гц}$ $10^{-3} \text{ нм} \leq \lambda < 50 \text{ нм}$	Из-за высокой проникающей способности и не очень большой опасности (левая часть участка диапазона) рентгеновские лучи используют для различных исследований, например в микроскопии, дефектоскопии и медицине (рентгеновский томограф)
Гамма-излучение $\lambda \approx 10^{-6} \text{ нм}$	Электромагнитное излучение, испускаемое возбужденными ядрами и возникающее при взаимодействии элементарных частиц. Применение: гамма-дефектоскопия, гамма-стерилизация, стерилизация медицинских материалов и оборудования, лучевая терапия, уровнемеры и т. д.

ОПТИКА



Оптика — раздел физики, изучающий свойства и физическую природу света, а также его взаимодействие с веществом.

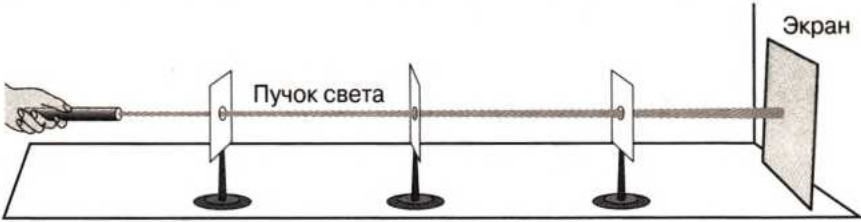
Геометрическая (лучевая) оптика	Волновая оптика	Квантовая оптика
Основывается на представлении о световых лучах. Изучает законы распространения света в прозрачных средах	Изучает явления, в которых проявляются волновые свойства света	Изучает взаимодействие света с веществом, в результате которого проявляются корпускулярные свойства света

Прямолинейное распространение света

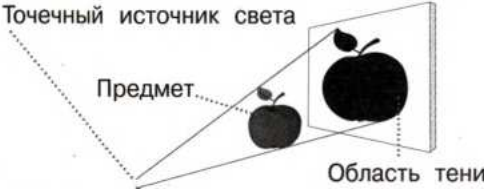
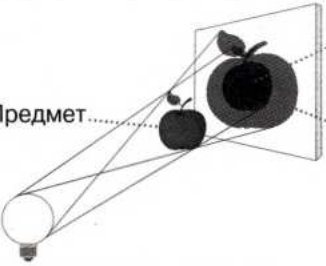


Геометрическая оптика (ГО) оперирует понятием световых лучей, независимых друг от друга и подчиняющихся известным законам преломления и отражения.

Закон прямолинейного распространения света	Опытные доказательства
В оптически однородной среде свет распространяется прямолинейно	Резкие тени, отбрасываемые непрозрачными телами при освещении источником достаточно малых размеров (точечный источник); опыт по прохождению света далёкого источника сквозь небольшое отверстие, в результате чего образуется узкий световой пучок

Физическое явление	Объяснение
Световой луч	Линия, вдоль которой распространяется энергия излучения от источника света
Световой луч в волновой оптике	Нормаль (перпендикуляр) к волновой поверхности
Основные свойства лучей	• Независимы друг от друга, то есть не взаимодействуют между собой. • В однородной среде распространяются прямолинейно
Волновая поверхность	Поверхность, нормальная к лучам
Световой пучок (наблюдать можно лишь световые пучки, но не лучи, поскольку световые лучи — это идеализация)	Если перед точечным источником света поместить экран с отверстием, то отверстие выделит в пространстве за экраном некоторый объём, внутри которого распространяется световая энергия, — световой пучок 
Волновой фронт	Поверхность равной фазы
Свойства волновых фронтов	• В рамках ГО волновые фронты не пересекаются между собой. • Через каждую точку пространства проходит волновой фронт, причём только один

Основные законы геометрической оптики

Физическое явление	Объяснение	
Точечный источник света	Точечный источник света  Предмет Область тени	Размеры точечного источника света малы по сравнению с расстоянием, на которое распространяется свет
Протяжённый источник	Размерами нельзя пренебречь Источник света значительных размеров.....  Предмет Область тени Область полутени	
Тень	Область пространства, куда не попадает свет от источника	
Полутень	Область пространства, освещённая некоторыми из имеющихся точечных источников света или частью протяжённого источника	

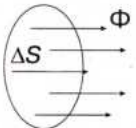
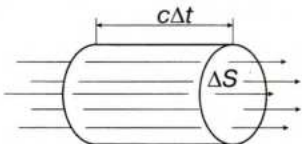
ЗАКОН НЕЗАВИСИМОСТИ СВЕТОВЫХ ЛУЧЕЙ

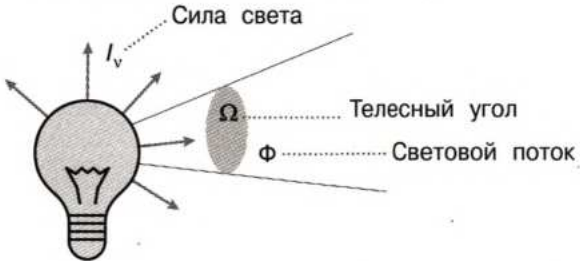
Световые лучи (пучки световых лучей) могут пересекаться, не возмущая друг друга, и распространяться после пересечения независимо друг от друга.

Фотометрия



Фотометрия — раздел общей физики, занимающийся измерением света.

Физическое явление	Пояснение, формула
 Поток излучения (лучистый поток) Φ. Единица измерения: $\Phi = 1 \text{ Дж/с} = 1 \text{ Вт}$	Величина энергии, переносимой полем в единицу времени через данную площадку: $\Phi = \frac{\Delta W}{\Delta t}$
 Плотность потока электромагнитного излучения I. Единица измерения: Вт/м^2	Отношение электромагнитной энергии ΔW, проходящей за время Δt через перпендикулярную лучам поверхность площадью S, к произведению площади S на время Δt: $I = \frac{\Delta W}{S \Delta t}$
Плотность потока излучения I равна произведению плотности электромагнитной энергии w на скорость её распространения c	$I = \frac{w c S \Delta t}{S \Delta t} = w c$
Зависимость плотности потока излучения от расстояния до точечного источника	Плотность потока излучения от точечного источника убывает обратно пропорционально квадрату расстояния до источника: $I = \frac{\Delta W}{S \Delta t} = \frac{\Delta W}{4 \pi \Delta t R^2}$

Физическое явление	Пояснение, формула
Зависимость плотности потока излучения от частоты	Плотность потока излучения пропорциональна четвёртой степени частот: $I \sim \omega^4$
Световой поток. Единица измерения: люмен (лм)	Мощность, переносимая излучением в заданном направлении через некоторую поверхность за единицу времени: $\Phi_v = \frac{\Delta W}{\Delta t} = I_v \Omega$
Сила света I_v . Единица измерения: кандела (кд)  Сила света Телесный угол Световой поток	Мощность светового потока, определяемая внутри конкретного телесного угла. Основные характеристики: • сила света количественно равна отношению светового потока, распространяющегося внутри элементарного телесного угла, к величине этого угла: $I_v = \frac{\Delta \Phi_v}{\Delta \Omega};$ • для точечного источника световой поток по всем направлениям одинаковый, поэтому сила света одинакова по всем направлениям: $I_v = \frac{\Delta \Phi_v}{4\pi}$

Сила света различных источников

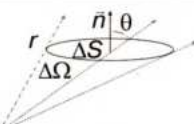
Источник, мощность	Сила света	Источник, мощность	Сила света
Свеча	1 кд	Современная люминесцентная лампа, 9—36 Вт	120 кд
Обычный светодиод, 0,015—0,1 Вт	0,005—3 кд	Сверхяркий светодиод с коллиматором, 1 Вт	1500 кд
Сверхяркий светодиод, 1 Вт	1...30 кд	Металлогалогенная лампа, 70 Вт	1600 кд
Современная лампа накаливания, 100 Вт	100 кд	Солнце, $3,9 \cdot 10^{26}$ Вт	$3 \cdot 10^{27}$ кд

Освещённость



Освещённость E — количество света или светового потока, падающего на единицу площади поверхности. Единица освещённости: люкс (лк).

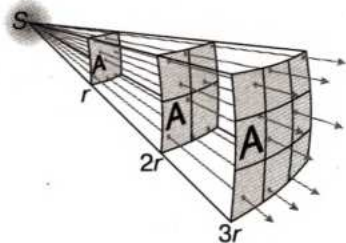


Физическое явление	Формулы
Освещённость — плотность светового потока на освещаемой поверхности. Освещённость не зависит от направления распространения светового потока на поверхность	$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}$
 Выражение освещённости через силу света	$\Delta\Phi = I \Delta\Omega$ $\Delta\Omega = \frac{\Delta S \cos\theta}{r^2} \quad E = \frac{I \cos\theta}{r^2}$

ПЕРВЫЙ ЗАКОН ОСВЕЩЁННОСТИ (ЗАКОН ОБРАТНЫХ КВАДРАТОВ)

Освещённость поверхности лучами, падающими на неё перпендикулярно, прямо пропорциональна силе света точечного источника и обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника до освещаемой поверхности.

Схема, формулы



$$E_0 = \frac{\Phi_0}{S}$$

$$\Phi_0 = 4\pi I$$

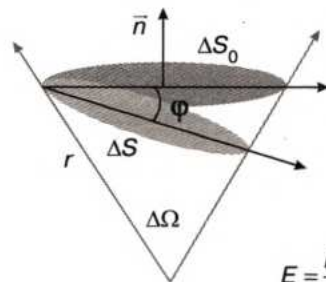
$$S = 4\pi r^2$$

$$E_0 = \frac{1}{r^2}$$

ВТОРОЙ ЗАКОН ОСВЕЩЁННОСТИ

Освещённость поверхности параллельным световым пучком прямо пропорциональна косинусу угла падения.

Схема, формула



$$E = \frac{I \cos \phi}{r^2}$$

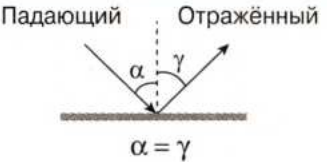
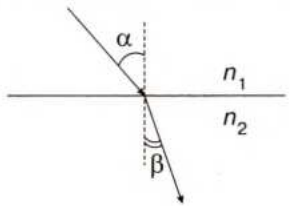
Яркость

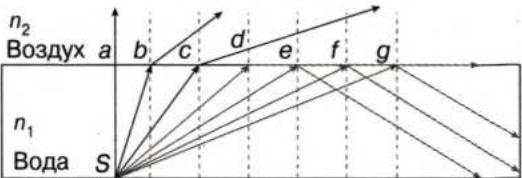
Термин	Определение	Формулы
Яркость (L)	Сила света, излучаемого единицей площади поверхности в определённом направлении. Единица измерения яркости: кандела на метр квадратный (кд/м²)	$L = \frac{\Delta \Phi}{\Delta S \cos \theta \Delta \Omega}$ $L = \frac{I}{\Delta S \cos \theta}$

Законы отражения и преломления света

ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА

Каждая точка, до которой доходит световое возбуждение, является в свою очередь центром вторичных волн; поверхность, огибающая в некоторый момент времени эти вторичные волны, указывает положение к этому моменту фронта действительно распространяющейся волны.

Название закона	Формулировка	Схема, формула
Закон отражения	- Отражённый луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и перпендикуляром, проведённым к границе раздела двух сред в точке падения. - Угол падения α равен углу отражения γ	 $\alpha = \gamma$
Закон преломления (закон Снелиуса)	- Луч падающий, луч преломлённый и перпендикуляр, проведённый к границе раздела в точке падения, лежат в одной плоскости. - Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина, постоянная для данных сред	 $\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c}{\lambda}$

Название закона	Формулировка	Схема, формула
Полное отражение	При переходе света из оптически более плотной среды (с большим показателем преломления) в оптически менее плотную, начиная с некоторого угла падения, преломлённого луча не станет	 Полное внутреннее отражение наблюдается в точках d, e, f, g; в точке a луч не преломляется; в точках b, c существуют преломлённые лучи. $\sin \alpha_{\text{пр}} = \frac{n_2}{n_1}, \quad \sin \alpha_0 = \frac{1}{n}$
Предельный угол полного внутреннего отражения $\alpha_{\text{пр}}$	Минимальный угол падения света, начиная с которого возникает явление полного внутреннего отражения	$\alpha_{\text{пр}} = \arcsin \frac{1}{n},$ где n — абсолютный показатель преломления



Для границы раздела «стекло — воздух» угол полного внутреннего отражения: $\alpha_0 = 42^\circ$.

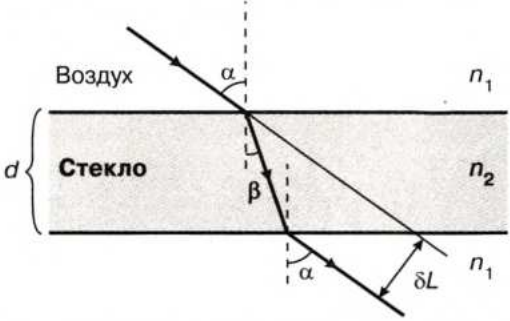


Чем меньше скорость света в среде, тем более оптически плотной её считают. Среду с большим абсолютным показателем преломления называют оптически более плотной.

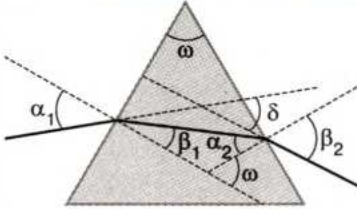


Волоконная оптика — система передачи световых сигналов с помощью оптических волокон (световодов).

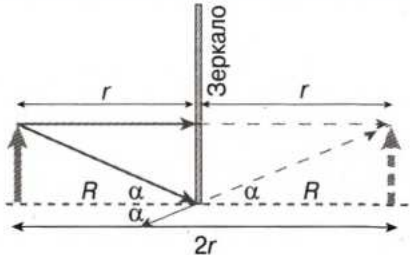


Название закона	Формулировка	Схема, формула
Преломление света в плоскопараллельной пластине	Плоскопараллельная пластина — оптический прибор, представляющий собой ограниченный параллельными поверхностями слой однородной среды, прозрачной в некотором интервале длин волн λ оптического излучения. Основное оптическое свойство пластины: луч, падающий на пластину, в результате двукратного преломления на поверхностях пластины параллельно смещается на некоторую величину δL относительно исходного луча. Величина смещения в плоскопараллельной пластине зависит: • от угла падения света α; • толщины пластины d; • показателя преломления вещества, из которого изготовлена плоскопараллельная пластина n	 δL — смещение луча при выходе из пластины относительно первоначального направления, α — угол падения луча на пластину из воздуха и угол преломления при выходе из пластины, β — угол преломления луча на границе «воздух — стекло» и падения на границу «стекло — воздух». Смещение луча можно выразить через угол падения: $\delta L = d \sin \alpha \left(1 - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right)$

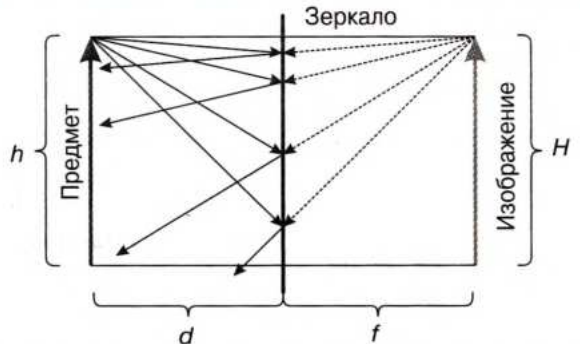
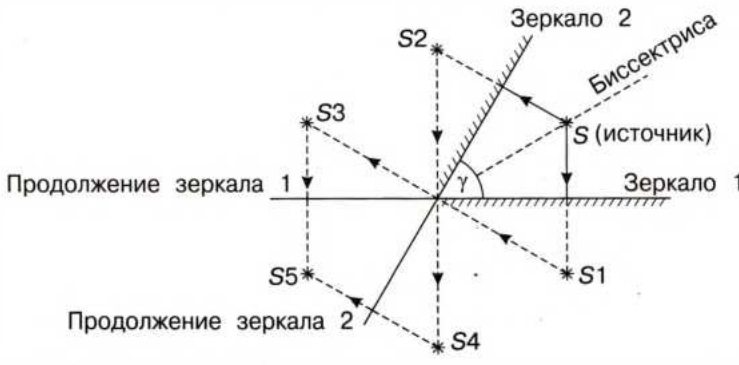
Ход луча через треугольную призму

Определение, характеристика	Схема	
Призма — оптический элемент из прозрачного материала (например, оптического стекла) в форме геометрического тела, имеющий плоские полированные грани, через которые входит и выходит свет. Показатель преломления призмы зависит от материала, из которого она изготовлена		δ — угол отклонения, ω — преломляющий угол призмы, α_1, α_2 — углы падения лучей (входящего через боковую грань призмы и выходящего через другую боковую грань), β_1, β_2 — углы преломления этих лучей соответственно, n_1, n_2 — показатели преломления двух сред

Плоское зеркало

Определение, пояснение	Ход лучей при построении изображений в плоском зеркале
Изображение в плоском зеркале является мнимым. Мнимое изображение — изображение предмета, возникающее при пересечении продолжений расходящегося пучка лучей. Для построения изображения точки достаточно использовать два луча (см. рисунок). Луч 1, перпендикулярный плоскости зеркала, не преломляется. Расстояние от точки до зеркала равно расстоянию от изображения до зеркала — r. Луч 2, падающий на зеркало под углом α, подчиняясь закону отражения, отражается под тем же углом α. Расстояние от точки до зеркала равно расстоянию от изображения до зеркала — R. Расстояние от точки до изображения равно $2r$. Мнимое изображение точечного источника в плоском зеркале находится в зеркально симметричной точке	

Изображение в плоском зеркале

Характеристика изображения	Схема
Изображение в плоском зеркале формируется за плоскостью зеркала на том же расстоянии f от зеркала, на каком находится предмет перед зеркалом (расстояние d): $f = d$. Изображение в плоском зеркале является: • прямым; • мнимым; • равным по величине предмету: $h = H$	
Если плоские зеркала образуют между собой угол, они формируют N изображений источника света, помещённого на биссектрису угла между зеркалами: $N = \frac{2\pi}{\gamma} - 1,$ где γ — угол между зеркалами (в радианах)	

Сферическое зеркало



Сферическое зеркало — зеркально отражающая поверхность, имеющая форму сферического сегмента.

Термин	Определение	Схема
Оптический центр зеркала (O)	Центр сферы, из которой вырезан сегмент	R — радиус кривизны зеркала
Полюс (P)	Вершина сферического сегмента	
Главная оптическая ось сферического зеркала (OP)	Прямая, проходящая через оптический центр и полюс зеркала. Является осью симметрии зеркала	
Главный фокус зеркала (F)	Точка пересечения пучка лучей, параллельных главной оптической оси, и отразившихся от поверхности сферического зеркала	

Формула сферического зеркала	Пояснение
$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F'}$ где d — расстояние от предмета до зеркала, f — расстояние от зеркала до изображения	$d > 0, f > 0$ — для действительных предметов и изображений; $d < 0, f < 0$ — для мнимых предметов и изображений

Характеристики сферического зеркала	Пояснение
Линейное увеличение сферического зеркала: $\Gamma = \frac{H}{h} = -\frac{f}{d}$	Величина h всегда считается положительной. $H > 0$ — изображение прямое; $H < 0$ — изображение перевёрнутое
Оптическая сила зеркала: $D = \frac{1}{F} = \frac{2}{R}$	Величина, обратная фокусному расстоянию, измеряется в диоптриях (дптр)

Дисперсия



Цвет, видимый и воспринимаемый глазом, определяется **частотой световой волны**. Монохроматические волны разных частот и длины распространяются в одной среде с единой скоростью.

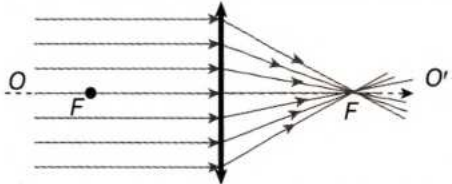
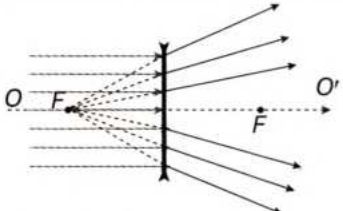
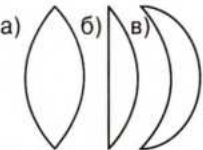
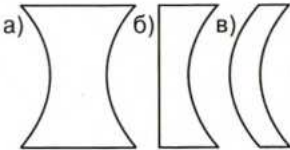
Термин	Пояснение
Дисперсия света — разложение света в спектр при его преломлении и дифракции	Дисперсия отражает зависимость скорости (или зависимость абсолютного показателя преломления) света в веществе от частоты волны. Абсолютный показатель преломления возрастает с увеличением частоты света и уменьшается с увеличением длины световой волны

Линзы



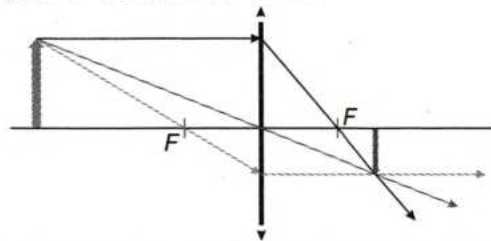
Термин	Определение
Линза	Прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями
Основное свойство линз	Способность давать изображения предметов
Главная оптическая ось	Прямая, на которой лежат центры сферических поверхностей, ограничивающих линзу
Главная плоскость линзы	Плоскость, проходящая через оптический центр линзы (точку O) перпендикулярно главной оптической оси
Фокус линзы	Точка, в которой после преломления собираются все лучи, падающие на линзу параллельно главной оптической оси
Фокусное расстояние	Расстояние от главного фокуса до центра линзы. Единица измерения: метр (м)
Оптическая сила	Величина, обратная фокусному расстоянию F линзы: $D = \frac{1}{F}$. Единица измерения: диоптрия (дптр)
Тонкая линза	Толщина линзы значительно меньше по сравнению с радиусами поверхностей, ограничивающих линзу

Виды линз по внешней форме

Собирающая линза	Рассеивающая линза
Линза, в которой пучок параллельных лучей после преломления собирается в одной точке (фокусе)	Линза, в которой пучок параллельных лучей после преломления расходится (продолжение лучей пересекается в одной точке — мнимом фокусе)
 Определение главного фокуса F собирающей линзы: OO' — главная оптическая ось	 Определение главного фокуса F рассеивающей линзы: OO' — главная оптическая ось
Оптическая сила собирающей линзы положительна: $D > 0$	Оптическая сила рассеивающей линзы отрицательна: $D < 0$
Деление линз по внешней форме: а) двояковыпуклая; б) плосковыпуклая; в) вогнуто-выпуклая 	Деление линз по внешней форме: а) двояковогнутая; б) плосковогнутая; в) выпукло-вогнутая 
Собирающая линза может создавать как действительное, так и мнимое изображение	Рассеивающая линза создаёт только мнимое изображение

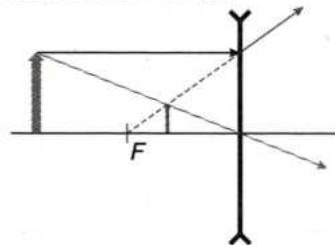
Собирающая линза

Ход лучей в собирающей линзе

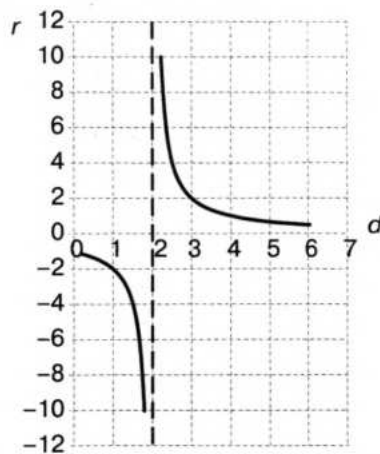


Рассеивающая линза

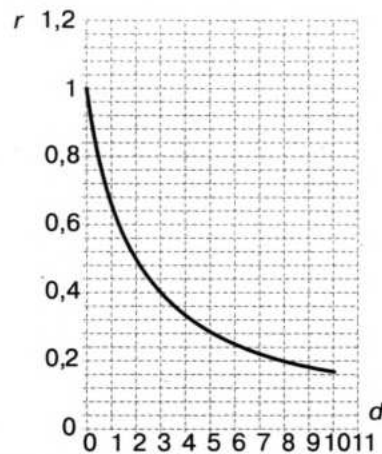
Ход лучей в рассеивающей линзе



Увеличение собирающей линзы



Увеличение рассеивающей линзы



Формула тонкой линзы

Физические явления	Пояснение
Формула тонкой линзы: $\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F} = D,$ где d — расстояние от предмета до линзы, f — расстояние от линзы до изображения	$F > 0$ — линза собирающая; $F < 0$ — линза рассеивающая; $f > 0$ — действительное изображение; $f < 0$ — мнимое изображение
Линейное увеличение линзы: $\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}$	h — линейный размер предмета; H — линейный размер изображения

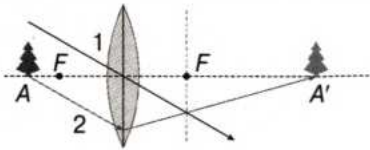
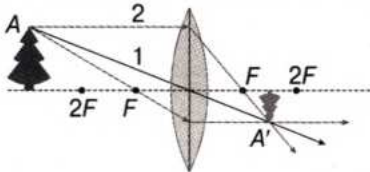
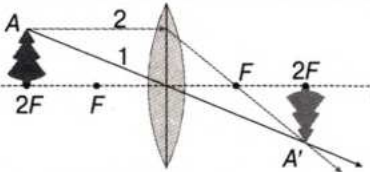
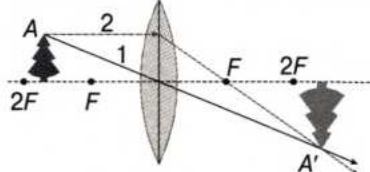
Виды изображений в тонкой линзе

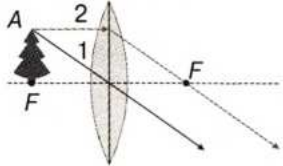
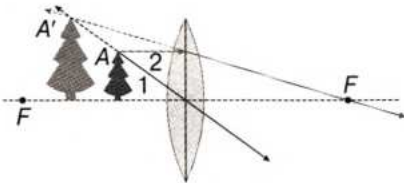
Действительные изображения	Мнимые изображения
Изображения, которые получаются в результате пересечения лучей, прошедших через линзу. Бывают только в собирающей линзе	Изображения, образуемые расходящимися пучками, лучи которых в действительности не пересекаются между собой (пересекаются их продолжения, проведённые в обратном направлении)



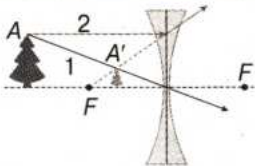
Свойства тонкой линзы определяются в основном расположением главных фокусов. Зная расстояние от источника света до линзы и фокусное расстояние, можно определить расстояние до изображения, опустив описание хода лучей внутри самой линзы. Поэтому нет необходимости точно изображать на чертеже сферические поверхности линзы.

Собирающая линза

Описание, характеристика изображения	Схема построения
Предмет A находится на главной оптической оси. Требуется дополнительные построения. Луч 1 (под любым углом) — оптическая ось, не преломляется. Луч 2, параллельный ему, преломляясь, пересекается с лучом 1 в фокальной плоскости. На пересечении луча 2 с главной оптической осью получим изображение предмета A	
Если предмет находится на расстоянии, превышающем двойное фокусное расстояние: $d > 2F,$ то изображение расположится за главным фокусом на отрезке между ним и двойным фокусным расстоянием. Изображение перевёрнутое, действительное, уменьшенное	
Если предмет находится на двойном фокусном расстоянии от линзы: $d = 2F,$ то полученное изображение находится по другую сторону линзы на двойном фокусном расстоянии от неё. Изображение перевёрнутое, действительное, натуральной величины	
Если предмет находится между передним фокусом и двойным фокусным расстоянием: $2F < d < F,$ то изображение будет получено за двойным фокусным расстоянием. Изображение перевёрнутое, действительное, увеличенное	

Описание, характеристика изображения	Схема построения
Если предмет находится в плоскости переднего главного фокуса линзы: $d = F,$ то лучи, пройдя через линзу, пойдут параллельно, изображения предмета не будет, так как параллельно идущие лучи не пересекаются. Изображения нет	
Если предмет находится между линзой и фокусом: $d < F,$ то лучи выйдут из линзы расходящимся пучком, не пересекаясь, для получения изображения надо продлить лучи в сторону, противоположную их распространению. Изображение прямое, мнимое, увеличенное, то есть в данном случае линза работает как лупа	

Рассеивающая линза

Характеристика изображения	Схема построения
Изображение прямое, мнимое, уменьшенное	

Интерференция света



Явление интерференции характерно для волн любой природы: звуковых, волн на поверхности воды, электромагнитных и др.

Физическое явление	Пояснение, формула
Интерференция	Интерференция (лат. <i>inter</i> — взаимно и <i>ferio</i> — ударяю) — явление наложения волн, вследствие которого наблюдается устойчивое во времени усиление или ослабление результирующих колебаний в различных точках пространства
Интерференционная картина	Неизменная во времени картина усиления или ослабления волн в пространстве (светлые и тёмные точки, круги на экране)
Устойчивая интерференционная картина	Устойчивую интерференционную картину дают только когерентные волны
Когерентные волны	Волны, имеющие одинаковые частоты и постоянную во времени разность фаз колебаний
Геометрическая разность хода интерферирующих волн	Разность расстояний от источников волн до точки их интерференции: $\Delta l = l_1 - l_2,$ где Δl — разность хода, l_1, l_2 — путь волн

Физическое явление

Оптическая разность хода

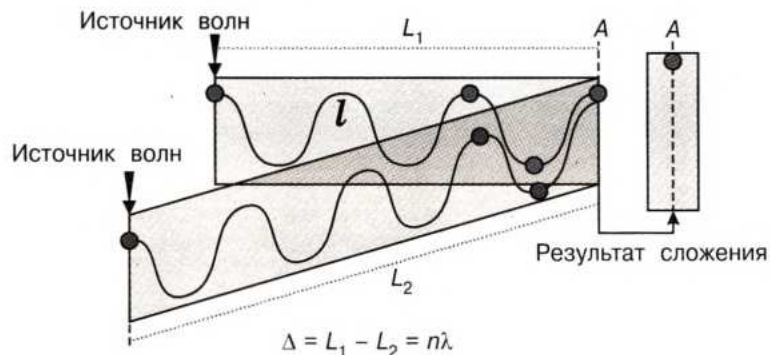
Пояснение, формула

$$\Delta = n_1 l_1 - n_2 l_2,$$

Δ — оптическая разность хода, n_1, n_2 — показатели преломления хода.

$$[l] = 1 \text{ м}, [\Delta] = 1 \text{ м}$$

Пусть в точку А пришли две волны одинаковой частоты, прошедшие различные расстояния l_1 и l_2 от своих источников.

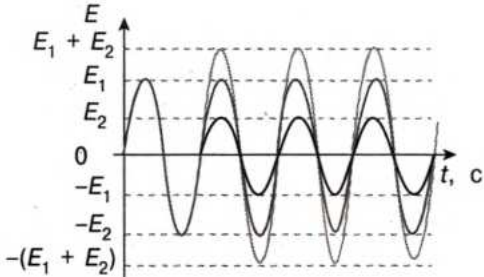
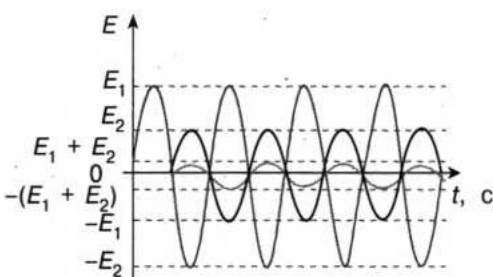


Таким образом, оптическая разность хода Δ вычисляется по формуле:

$$\Delta = n_2 s_2 - n_1 s_1 = L_2 - L_1,$$

где L — оптическая длина пути, s — геометрическая длина пути, n — показатель преломления среды

Условия наблюдения максимумов и минимумов в интерференционной картине от двух синфазных когерентных источников

Условия максимума	Условия минимума
Интерференция когерентных волн при времени запаздывания $\Delta t = T$ 	Интерференция когерентных волн при времени запаздывания $\Delta t = \frac{T}{2}$ 
Максимальная результирующая интенсивность при интерференции когерентных колебаний в определённой точке пространства получается при их запаздывании относительно друг друга на время, кратное периоду этих колебаний: $\Delta t = m \cdot T, \text{ где } m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$	Минимальная результирующая интенсивность при интерференции когерентных колебаний в определённой точке пространства получается при их запаздывании относительно друг друга на время, равное нечётному числу полупериодов этих колебаний: $\Delta t = (2m + 1) \cdot \frac{T}{2}, \text{ где } m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$

Условия максимума	Условия минимума
Если разность хода равна целому числу волн, то волны приходят в точку синфазно. Складываясь, волны усиливают друг друга и дают колебание с удвоенной амплитудой: $\Delta l = m \cdot \lambda, \text{ где } m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$ Δl — разность хода, $m = 1, 2, 3 \dots$ — любое целое число, λ — длина волны	Если разность хода равна нечётному числу полуволн, то волны приходят в точку А в противофазе. В этом случае они гасят друг друга, амплитуда результирующего колебания равна нулю: $\Delta l = (2m + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}, \text{ где } m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$ Δl — разность хода, $(2m + 1), m \in \mathbb{Z}$ — любое нечётное число, λ — длина волны

Просветление оптики

Определение	Формула
Уменьшение отражения света от поверхности линзы в результате нанесения на неё специальной плёнки	Толщина покрытия: $d = \frac{\lambda}{4 \cdot n},$ где λ — длина волны в воздухе, n — показатель преломления среды



Просветление оптики позволило создать, например, бликоотражающие очки. В технике существуют также многослойные отражающие системы.

Дифракция света



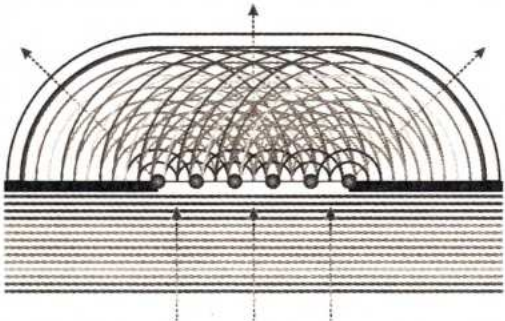
Дифракция — явление отклонения световых волн от прямолинейного распространения при прохождении света мимо края препятствия. Дифракция сопровождается нарушением целостности фронта волны, вызванным резкими неоднородностями среды.

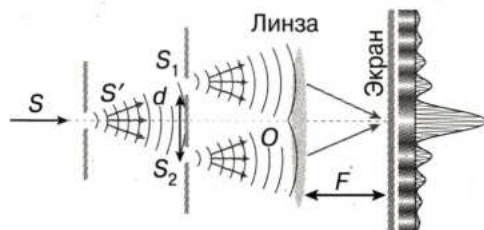
Физическое явление, термин	Пояснение
Виды дифракции	• Дифракция Фраунгофера — дифракция в параллельных лучах (плоские волны), источник и точка находятся на значительном расстоянии от препятствия. • Дифракция Френеля — дифракция в сходящихся лучах (сферические волны), картина наблюдается на конечном расстоянии от препятствия
Свойства дифракции	• Дифракция — характерная особенность распространения волн независимо от их природы. • Волны могут попадать в область геометрической тени (проникать через небольшие отверстия в экранах, огибать препятствия). Дифракция волн зависит от соотношения между длиной волны и размером объекта, вызывающего дифракцию. Условие обнаружения дифракции: размеры огибаемых препятствий соизмеримы с длиной волны

Принцип Гюйгенса — Френеля



Объяснить явление дифракции можно исходя из принципа Гюйгенса — Френеля, который представляет собой правило, позволяющее вычислить из положения волнового фронта в данный момент новое положение волнового фронта в последующий момент времени.

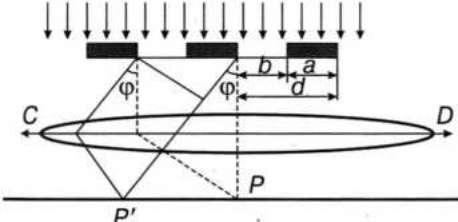
Описание принципа	
Предложение Гюйгенса	Рассматривать каждую точку среды, которой достигла волна, как источник вторичных сферических волн, распространяющихся по всем направлениям со скоростью, присущей данной среде
Предложение Френеля	Вторичные сферические волны являются когерентными, и колебания в любой точке пространства, которой вторичные волны достигнут в момент времени t , представляют собой результат интерференции этих вторичных волн
Принцип Гюйгенса — Френеля	 Каждый элемент волнового фронта можно рассматривать как центр вторичного возмущения, порождающего вторичные сферические волны, а результирующее световое поле в каждой точке пространства будет определяться интерференцией этих волн

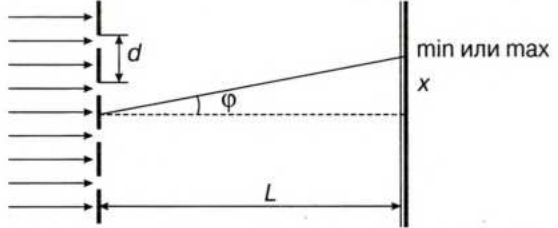


Ход лучей при дифракции света на щели.

Интерференция вторичных волн за щелью:
 F — фокус линзы, S' — источник света, d — период дифракционной решётки, S_1 и S_2 — вторичные источники, O — центр линзы.

Дифракционная решётка

Физическое явление	Пояснение, формула
Дифракционная решётка	 Совокупность большого числа узких щелей шириной a, разделённых непрозрачными промежутками шириной b, причём величина $d = a + b$ называется периодом решётки. a — ширина промежутка между щелями, b — ширина щели, $d = a + b$ — период решётки
Период решётки d	$d = \frac{1}{N},$ где N — число щелей, приходящихся на единицу длины

Физическое явление	Пояснение, формула
Условие главных максимумов	$d \sin \varphi = \pm k \lambda$
Условие главных минимумов	$d \sin \varphi = \pm (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$  Между главными максимумами будут расположены $N - 1$ дополнительных минимумов

Дисперсия света

Физическое явление, термин	Пояснение
Дисперсия света	Разложение света в спектр при его преломлении и дифракции. Дисперсия отражает зависимость скорости (или зависимость абсолютного показателя преломления) света в веществе от частоты волны
Белый свет	Сложный свет, который состоит из простых монохроматических цветов

СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ



Теория относительности, или релятивистская механика (англ. *relativity* — относительность), описывает специфические явления — релятивистские эффекты. Эти эффекты наиболее отчётливо проявляются при скоростях движения тел, близких к скорости света в вакууме $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с.

Термин	Определение
Общая теория относительности (ОТО)	Физическая теория пространства, времени и тяготения
Специальная теория относительности (СТО)	Рассматривает пространственно-временные закономерности, справедливые для любых процессов. СТО была создана в 1905 г. одним из основателей теоретической физики — А. Эйнштейном

Основные понятия специальной теории относительности

Термин	Определение
Событие	Физическое явление, происходящее в некоторой точке пространства в определённый момент времени
Собственное время	Время, измеренное наблюдателем, который движется вместе с часами
Масса покоя	Масса тела в системе отсчёта, относительно которой тело покоится
Фотон	Материальная, электрически нейтральная частица, квант электромагнитного поля

Принцип относительности Эйнштейна

Первый постулат	Второй постулат
Все физические явления протекают одинаковым образом во всех инерциальных системах отсчёта; все законы природы и уравнения, их описывающие, инвариантны, то есть не меняются при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой	Скорость света в вакууме не зависит от движения источника света и одинакова во всех направлениях

Следствия постулатов Эйнштейна

Первое следствие	Второе следствие
Скорость света в вакууме является предельной: никакой сигнал, никакое воздействие одного тела на другое не могут распространяться со скоростью, превышающей скорость света в вакууме	Значение предельной скорости — скорости света в вакууме — должно быть одинаково во всех инерциальных системах отсчёта: в противном случае эти системы можно было бы отличить друг от друга



Время в неподвижной системе отсчёта и в системе, движущейся относительно неё, течёт с разной скоростью:

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}},$$

где t — собственное время, t' — время в подвижной системе отсчёта, v — скорость подвижной системы, c — скорость света.



Релятивистская механика — раздел механики, изучающий законы движения тел со скоростями, близкими к скорости света. Данный раздел появился на стыке механики, специальной теории относительности и общей теории относительности.

РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ЗАКОН СЛОЖЕНИЯ СКОРОСТЕЙ

v_x — скорость тела относительно неподвижной системы отсчёта X , $v_{x'}$ — скорость тела относительно системы отсчёта X' , движущейся со скоростью v .

$$v_x = \frac{v_{x'} + v}{1 + \frac{v \cdot v_{x'}}{c^2}}$$

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ МАССА

m — масса частицы, которая движется со скоростью v , m_0 — масса покоя, c — скорость света.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Энергия свободной частицы. Импульс частицы



Любое тело благодаря факту своего существования обладает энергией, которая пропорциональна массе покоя.

Физическое явление, термин	Формула
Энергия свободной частицы	$E = m \cdot c^2,$ где E — энергия покоя (Дж), m — масса тела (кг), c — скорость света
Масса частицы, движущейся со скоростью v	$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}},$ где m_0 — масса покоя, c — скорость света
Импульс частицы в релятивистской физике	$p = m \cdot v = \frac{m_0 \cdot v}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА



Квантовая физика изучает квантовые (корпускулярные) свойства света, то есть явления, в которых свет проявляет себя как поток частиц.

КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ

Термин	Определение, пояснение
Тепловое излучение	Электромагнитное излучение, испускаемое нагретыми телами за счёт собственной внутренней энергии
Проблема теории теплового излучения	Сложность нахождения зависимости плотности энергии равновесного излучения от частоты и температуры: при увеличении температуры тела возрастает энергия теплового излучения на всех частотах
Абсолютно чёрное тело	Тело, которое полностью поглощает падающее на него электромагнитное излучение любой частоты
Свойства абсолютно чёрного тела	• Может испускать электромагнитное излучение любой частоты и визуально иметь цвет. • Спектр излучения абсолютно чёрного тела определяется его температурой
Интегральная светимость $R(T)$ абсолютно чёрного тела	$R(T)$ пропорциональна четвёртой степени абсолютной температуры T : $R(T) = \sigma \cdot T^4,$ где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$ — постоянная Стефана — Больцмана

Гипотеза Планка о квантах



Гипотеза Планка: процессы излучения и поглощения нагретым телом электромагнитной энергии происходят не непрерывно, как это принимала классическая физика, а конечными порциями — квантами.

ФОРМУЛА ПЛАНКА

Энергия излучения (поглощения) кванта прямо пропорциональна частоте ν излучения.

$$E = h \cdot \nu,$$

где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка, ν — частота излучения



Квант (лат. *quantum* — количество) — минимальная порция энергии, излучаемой или поглощаемой телом.

ФОТОНЫ

Термин	Пояснение, формула
Фотон	Элементарная частица, квант электромагнитного излучения
Свойства фотона	• Не имеет состояния покоя. • Безмассовая частица ($m=0$). • Электрически нейтрален ($q=0$). • Скорость движения фотона равна скорости света во всех инерциальных системах отсчёта. • Энергия фотона пропорциональна частоте соответствующего электромагнитного излучения (согласно формуле Планка)
Импульс фотона	$p = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda} = \frac{h \cdot \nu}{c},$ где E — энергия фотона, p — импульс фотона, $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка, ν — частота фотона, λ — длина волны фотона



М. Планк доказал, что формулу для спектральной плотности энергии теплового излучения можно получить только в том случае, если допустить квантование энергии.

Фотоэффект



Фотоэффект — явление взаимодействия электромагнитного излучения с веществом, в результате которого энергия излучения передаётся электронам вещества.

Внешний фотоэффект	Внутренний фотоэффект
Явление вырывания электронов из вещества под действием падающего на него света	Явление увеличения концентрации носителей заряда в веществе, следовательно, и увеличения электропроводности вещества под действием света
Фотоэффект сопровождается вылетом электронов с поверхности вещества. Вылетающие электроны называются фотоэлектронами	Фотоэффект не сопровождается вылетом электронов с поверхности вещества
Внешний фотоэффект был открыт в 1887 г. Г. Герцем и детально исследован в 1888—1890 гг. А. Г. Столетовым	Внутренний фотоэффект был открыт в 1873 г. У. Смитом и Дж. Мейем



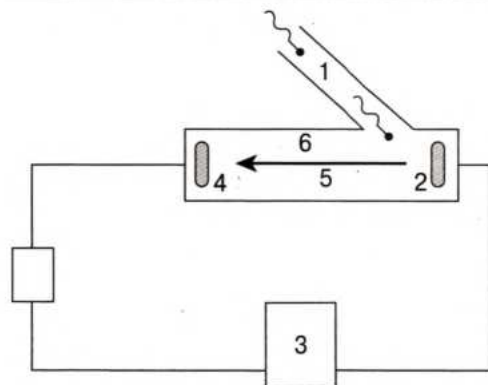
Теория фотоэффекта была развита А. Эйнштейном (1905 г.) на основе квантовых представлений. Классическая волновая теория света оказалась неспособной объяснить закономерности этого явления.

Опыты А. Г. Столетова



В 1888—1890 гг. русский учёный А. Г. Столетов провёл серию опытов по изучению фотоэффекта и выявил зависимости, которые впоследствии назвали законами внешнего фотоэффекта.

Схема опыта Столетова



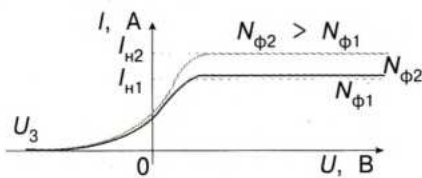
1 — поток фотонов, 2 — катод из исследуемого металла, 3 — источник напряжения, 4 — анод, 5 — поток электронов, 6 — вакуумная трубка

Описание опыта

Без освещения катода тока в цепи нет, так как нет носителей заряда.

При освещении электроны вырываются из катода и под действием электрического поля движутся к аноду (положительный электрод). Возникающий при этом ток называют фототоком, а носителей заряда — фотоэлектронами. Фототок возникает даже при нулевой разности потенциалов между электродами.

До некоторого момента не все фотоэлектроны достигают анода, образуя вокруг катода электронное облако

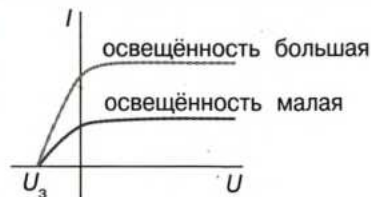
Физическое явление	Определение, пояснение
Ток насыщения I_n	Максимальное значение, которое достигается при определённом уровне силы тока в цепи вследствие увеличения напряжения
Задерживающее (запирающее) напряжение U_3	Напряжение, при котором сила фототока равна нулю. Сила тока уменьшается до нуля при изменении полярности подключения
Вольт-амперная характеристика $I(U)$ на электродах при фотоэффекте	 $N_{\Phi 1}$ и $N_{\Phi 2}$ — число фотонов в единицу времени (интенсивность падающего света) в первом и втором опытах, I_{n1} и I_{n2} — ток насыщения в первом и втором опытах, U_3 — запирающее напряжение

Законы фотоэффекта



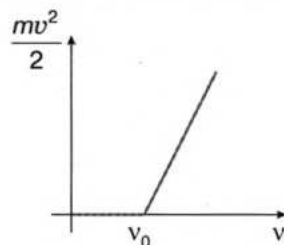
Для большинства веществ фотоэффект возникает только под действием ультрафиолетового излучения. Однако некоторые металлы, например литий, натрий и калий, испускают электроны и при облучении видимым светом.

Первый закон фотоэффекта



Фототок насыщения — максимальное число фотоэлектронов, вырывааемых из вещества за единицу времени, — прямо пропорционален интенсивности падающего излучения. Увеличение интенсивности света означает увеличение числа падающих фотонов, которые выбивают с поверхности металла больше электронов

Второй закон фотоэффекта



Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно зависит от частоты света и не зависит от его интенсивности:

$$E_{\kappa}^{\max} = \frac{mv^2}{2} = eU_3,$$

где $E_{\kappa}^{\max}$ — максимальная кинетическая энергия электронов, e — заряд электронов, U_3 — задерживающее напряжение.

Движение электронов начинается только при достижении определённой начальной частоты света, которую называют красной границей. Если частота излучения меньше данного показателя, фотоэффект не происходит, то есть фототок равен нулю

Третий закон фотоэффекта

Для каждого вещества существует минимальная частота света, называемая **красной границей фотоэффекта**, ниже которой фотоэффект невозможен.

$$h\nu_{\min} = A_{\text{вых}},$$

$$\nu_{\min} = \frac{A_{\text{вых}}}{h},$$

$$\lambda_{\text{кр}} = \frac{ch}{A_{\text{вых}}},$$

где $A_{\text{вых}}$ — работа выхода электронов, $\nu_{\min}$ — частота излучения, соответствующая красной границе фотоэффекта, $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка, c — скорость света, $\lambda_{\text{кр}}$ — длина волны, соответствующая красной границе

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

Описание	Формула
Энергия $E_{\text{ф}}$ фотона идёт на совершение работы выхода $A_{\text{вых}}$ и на сообщение вылетевшему фотоэлектрону кинетической энергии $E_{\text{к}}$	$E_{\text{ф}} = A_{\text{вых}} + E_{\text{к}}$ Интенсивность света пропорциональна числу квантов энергии в световом пучке, определяет число вырванных электронов. Скорость электронов определяется только частотой света и работой выхода, то есть зависит от типа металла и состояния поверхности и не зависит от интенсивности света
Энергия фотона	$E_{\text{ф}} = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda},$ где $E_{\text{ф}}$ — энергия фотона, $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка, ν — частота фотона, c — скорость света, λ — длина волны фотона
Работа выхода электронов	$A_{\text{вых}} = h \cdot \nu_{\text{мин}} = \frac{h \cdot c}{\lambda_{\text{max}}},$ где $\nu_{\text{мин}}$ — минимальная частота, c — скорость света, λ_{max} — максимальная длина волны
Кинетическая энергия фотоэлектронов	$E_{\text{к}} = e \cdot U_{\text{з}} = \frac{m \cdot v^2}{2},$ где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — модуль заряда электрона, $U_{\text{з}}$ — задерживающее напряжение, m — масса электрона, v — скорость электрона

Волновые свойства частиц



Гипотеза де Бройля: любая микрочастица обладает, помимо корпускулярных, ещё и волновыми свойствами. Частица массой m , движущаяся со скоростью v , характеризуется не только импульсом p и энергией E , но и, подобно фотону, частотой ν и длиной волны λ_B .



Микрочастицы — частицы, которые проявляют волновые свойства. К ним относятся элементарные частицы (электроны, протоны, нейтроны и т. д.), а также атомы, ядра и молекулы.

Теория волновых свойств частиц	Описание
Волны де Бройля	Волновые свойства любой частицы, обладающей импульсом p, характеризует длина волны де Бройля λ_B: $\lambda_B = \frac{h}{p},$ где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка. Импульс движения электрона: $p = m_e v,$ где m — масса электрона, v — скорость электрона. $\lambda_B = \frac{h}{m_e v}$

Физический смысл волн де Бройля, связанных с движущимися частицами, например с электронами	• Волны де Бройля не имеют аналогов в классической физике. Они имеют квантовую природу. • Волны де Бройля не связаны с распространением какого-либо электромагнитного поля. • Волны де Бройля имеют статистический (вероятностный) характер. Интенсивность волн в данной точке пространства определяет количество электронов, попавших в эту точку за одну секунду. • Волна де Бройля описывает движение материальной частицы, но не даёт никаких сведений о том, что принято называть структурой микрочастицы (электрона)
Экспериментальные подтверждения гипотезы де Бройля	• В 1927 г. К. Дэвиссон и Л. Джермер исследовали отражение электронного пучка от монокристаллов Ni и показали возможность дифракции для электронов; независимо от них, а также независимо друг от друга учёные Дж. П. Томсон и П. С. Тартаковский провели опыты по дифракции электронов на тонкой поликристаллической фольге. • В 1949 г. Л. М. Биберман, Н. Г. Сушкин и В. А. Фабрикант исследовали явление дифракции единичных электронов и установили, что волновые свойства присущи каждому движущемуся электрону. Эти опыты по дифракции являются экспериментальным подтверждением волновых свойств микрочастиц



Волны де Бройля заполняют всё пространство и существуют неограниченное время. Свойства этих волн всегда и везде одинаковы: постоянны их амплитуда и частота, неизменны расстояния между волновыми поверхностями и др. С другой стороны, микрочастицы сохраняют свои корпускулярные свойства, то есть обладают определённой массой, локализованной в некоторой области пространства. Поэтому частицы представляют не монохроматическими волнами де Бройля, а наборами волн с близкими частотами (волновыми числами) — волновыми пакетами.

Корпускулярно-волновой дуализм



Корпускулярно-волновой дуализм — физический принцип, утверждающий, что материальный микроскопический объект может вести себя и как частица, и как волна.

Тип свойства	Описание свойства
Волновые свойства	Свет демонстрирует свойства волны при масштабах, сравнимых с длиной световой волны. Подтверждения: дифракция, интерференция, поляризация
Корпускулярные свойства	Фотон ведёт себя как частица, которая излучается или поглощается целиком объектами, размеры которых намного меньше длины его волны. Подтверждения: распространение света в виде потока фотонов, квантовый характер взаимодействия света с веществом, действие законов фотоэффекта

Дифракция электронов на кристаллах

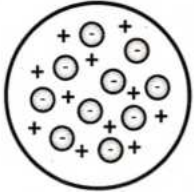
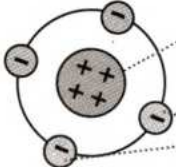
Эксперимент Томсона	Схема опыта Томсона
Дж. П. Томсон в своих экспериментах наблюдал дифракционную картину (концентрические светлые и тёмные кольца, радиусы которых изменялись с изменением скорости электронов), возникающую при прохождении пучка электронов через тонкую поликристаллическую фольгу из золота	Фотолампа К А Ф Упрощённая схема опытов Томсона по дифракции электронов: К — накаливаемый катод, А — анод, Ф — фольга из золота Распределение электронов на фотопластинке

Давление света

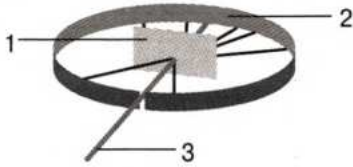
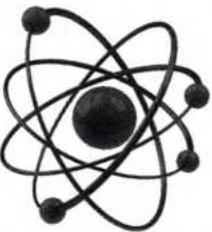
Физическое явление	Формула
Фотоны, распространяясь лишь в одном направлении, подобно частицам идеального газа, упруго отражаются от стенок	Величина давления на стенки составляет $p = 2 \cdot \varpi_{\text{эм}} = 2 \cdot \frac{I}{c},$ где $\varpi_{\text{эм}}$ — объёмная плотность энергии электромагнитного излучения, I — интенсивность электромагнитного излучения

Физическое явление	Давление света на полностью отражающую поверхность	Давление света на полностью поглощающую поверхность
Давление	$p = \frac{\Delta p}{S \cdot \Delta t},$ где S — площадь поверхности, Δp — изменение импульса, Δt — время действия силы	$p = \frac{\Delta p}{S \cdot \Delta t},$ где S — площадь поверхности, Δp — изменение импульса, Δt — время действия силы
Изменение импульса	$ \Delta p_{\text{отр}} = -p_{\text{отр}} - p_{\text{отр}} = 2 \cdot p_{\text{отр}} = \frac{2 \cdot N \cdot h}{\lambda},$ где N — число фотонов падающего света, λ — длина волны фотонов	$ \Delta p_{\text{погл}} = 0 - p_{\text{погл}} = p_{\text{погл}} = \frac{N \cdot h}{\lambda},$ где N — число фотонов падающего света, λ — длина волны фотонов
Давление фотонов	$p = \frac{2 \cdot h \cdot N}{S \cdot \Delta t \cdot \lambda}$	$p = \frac{h \cdot N}{S \cdot \Delta t \cdot \lambda}$

ФИЗИКА АТОМА

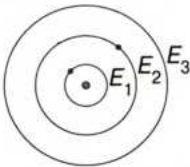
Модель атома Томсона	Планетарная модель
 Первую модель строения атома предложил Дж. Томсон в 1904 г. Корпускулы в этой модели распределены внутри положительно заряженного облака с одинаковой по объёму плотностью заряда, как изюминки в пудинге	В 1911 г. Э. Резерфорд предложил планетарную модель атома  Ядро: протоны + нейтроны Электроны

Планетарная модель атома

Результаты эксперимента	Выводы (следствие эксперимента)
 Рассеяние α-частиц в атоме Резерфорда: 1 — золотая фольга, 2 — экран, покрытый сернистым цинком, 3 — радиоактивное вещество	Модель атома Резерфорда 

Результаты эксперимента	Выводы (следствие эксперимента)
Отклонились на углы $\varphi < 1^\circ$: большинство α -частиц	Большую часть атома занимает пустота
Отклонились на углы $90^\circ < \varphi < 180^\circ$: 0,01 % α -частиц	α -Частицы столкнулись с тяжёлым положительно заряженным ядром, масса которого соизмерима с массой α -частицы. Размер ядра — 0,01 % размера атома. В центре атома находится положительно заряженное ядро, в котором сосредоточена практически вся масса атома. Радиус ядра $\approx 10^{-15}$ м
Отклонились на углы $30^\circ < \varphi < 90^\circ$: небольшая часть α -частиц	α -Частицы столкнулись с очень лёгкими частицами — электронами, рассеянными по всему объёму атома. Вокруг ядра, подобно планетам, движутся электроны, удерживаемые у ядра силами кулоновского притяжения. Совокупность электронов образует оболочку атома, которая своим отрицательным зарядом компенсирует заряд ядра

Постулаты Бора

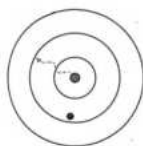
Первый постулат Бора	Пояснение к постулату
Постулат стационарных состояний. Электрон в атоме может находиться только в особых (квантовых) состояниях, каждому из которых соответствует определённая энергия. Когда электрон находится в стационарном состоянии, вращаясь по орбите, он не излучает	Стационарные состояния можно проинтуитивно понять, каждое состояние обладает своей фиксированной энергией  

Второй постулат Бора

Правило частот. При переходе атома из одного стационарного состояния в другое испускается или поглощается квант электромагнитного излучения, энергия которого равна разности энергий электрона в данных состояниях. Второй постулат Бора позволил объяснить линейчатую структуру атомных спектров

Пояснение к постулату

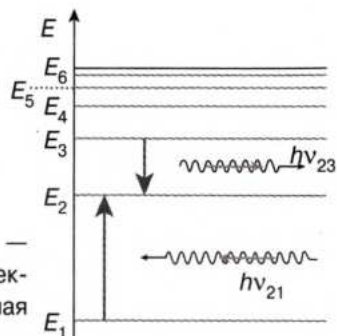
Основное состояние — состояние атома, которому соответствует наименьшая энергия. **Возбуждённое состояние** — состояние атома, которому соответствует наибольшая энергия.



$E_k > E_n$ — излучение энергии.
 $E_k < E_n$ — поглощение энергии

$$E_{kn} = h\nu_{kn} = E_k - E_n,$$

где E_{kn} — энергия электромагнитного излучения, E_k — энергия электрона на k -й орбите, E_n — энергия электрона на n -й орбите, $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка, ν_{kn} — частота излучения



Третий постулат Бора

Правило квантования орбит

Пояснение к постулату

Стационарные электронные орбиты находятся из условия:

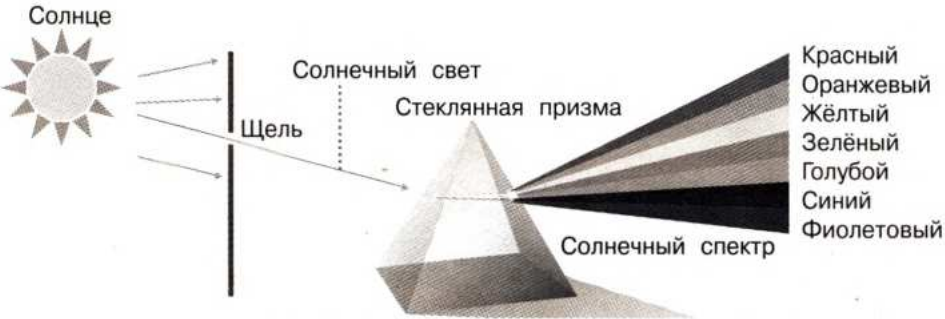
$$mvr_n = nh',$$

где m — масса электрона, v — линейная скорость движения электрона по орбите, r_n — радиус n -й орбиты.

$$h' = \frac{h}{2\pi},$$

где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка, n — номер орбиты

Линейчатые спектры

Физическое явление, термин	Описание, формула
Спектр	Распределение энергии, излучаемой или поглощаемой веществом, по частотам или длинам волн 
Линейчатый спектр	Спектр излучения, состоящий из отдельных узких спектральных линий различной интенсивности
Энергия электрона на n -й орбите E_n	$E_n = \frac{-13,6 \text{ эВ}}{n^2}$
Спектральный анализ	Метод определения химического состава и других характеристик вещества по его спектру

Закономерности излучения атомов

Описание закономерности излучения атомов	Формула
Излучение света происходит при переходе электрона в атоме с высшего энергетического уровня E_k на один из низших энергетических уровней E_n ($k > n$). Атом в этом случае излучает фотон с энергией $h\nu_{kn}$	$\nu_{kn} = R c \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right),$ где ν_{kn} — частота излучения, R — постоянная Ридберга, n, k — главные квантовые числа, $n = k + 1, k + 2$ и т. д.
Поглощение света — процесс, обратный излучению. Атом поглощает фотон, переходит из низшего состояния k в более высокое n ($n > k$). Атом в этом случае поглощает фотон с энергией $h\nu_{kn}$	$\nu_{kn} = R c \cdot \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$
Энергия излучаемого фотона при переходе электрона с n -й дальней от ядра орбиты на более близкую k -ю орбиту	$E_{kn} = E_u \cdot \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right),$ где E_{kn} — энергия излучаемого фотона, E_u — энергия ионизации



Уровни энергии атома, у которого удалён один из электронов с глубокого уровня, называют рентгеновскими термами. Данное название связано с тем, что для большинства атомов переходы между такими уровнями сопровождаются рентгеновским излучением или поглощением рентгеновского излучения.

Лазер

Понятие	Определение, пояснение
Спонтанное излучение	Излучение, испускаемое при самопроизвольном переходе атома из возбуждённого состояния в основное
Индукированное (вынужденное) излучение	Излучение атома, возникающее при переходе на более низкий энергетический уровень под действием внешнего электромагнитного излучения
Инверсная населённость энергетических уровней	Неравновесное состояние среды, при котором концентрация атомов в возбуждённом состоянии больше, чем концентрация атомов в основном состоянии



Лазер — источник излучения, усиливаемого в результате индуцированного излучения.



Метастабильное состояние — возбуждённое состояние электрона в атоме, в котором он может находиться достаточно долго $[\sim 10^{-3}]$.

Свойства лазерного излучения	Устройство лазера
- Временная и пространственная когерентность. - Строгая монохроматичность. - Большая плотность потока энергии. - Очень малое угловое расхождение в пучке	Энергия источника накачки Лазерный луч Активная среда Оптический резонатор с зеркалами Основные компоненты: - активная среда, в которой создаются состояния с инверсией населённости; - система накачки (устройство для создания инверсии в активной среде); - оптический резонатор (устройство, выделяющее в пространство избирательное направление пучка фотонов и формирующее выходящий световой пучок)

ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА



Атомная физика — раздел физики, который изучает строение атомов и элементарные процессы на атомном уровне.

Нуклонная модель ядра Гейзенберга — Иваненко



Нуклонная модель атомного ядра была предложена русским физиком Д. Д. Иваненко и немецким учёным В. Гейзенбергом в 1932 г. после открытия нейтрона английским исследователем Дж. Чедвиком. Согласно гипотезе, атомное ядро состоит из протонов и нейтронов.

Название частицы	Физическая характеристика
Нуклон (лат. <i>nucleus</i> — ядро)	По современным представлениям протон и нейтрон являются двумя разными состояниями одной и той же частицы — нуклона
Протон 1_1p (греч. <i>protos</i> — первый, первичный) — ядро изотопа атома водорода	Заряд протона: $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Масса протона: $m_p = 1,6726231 \cdot 10^{-27}$ кг = 1,007276470 а. е. м.
Нейтрон 1_0n (лат. <i>neutrum</i> — нейтральный)	Заряд нейтрона: $q = 0$. Масса нейтрона: $m_n = 1,6749286 \cdot 10^{-27}$ кг = 1,008664902 а. е. м.

Понятие	Определение, пояснение
Символ обозначения ядра: ${}_Z^AX^A$. Важнейшие характеристики ядра: • заряд Z; • масса A. ✓ ${}_{92}^{235}\text{U}$	Z — зарядовое число, число протонов в ядре, соответствует номеру элемента в таблице Менделеева. A — массовое число, равно сумме масс протонов и нейтронов в ядре: $A = Z + N.$ N — число нейтронов в ядре: $N = A - Z$
Изотопы	Атомы одного и того же химического элемента, имеющие одинаковое число протонов в ядре (зарядовое число Z) и разное число N нейтронов. Вследствие разницы числа N массовые числа изотопов отличаются. ✓ Изотопы кислорода: ${}_8\text{O}^{16}$, ${}_8\text{O}^{17}$, ${}_8\text{O}^{18}$
Единица массы атома	Атомная единица массы (а. е. м.) равна $\frac{1}{12}$ массы атома углерода: $\text{а. е. м.} = 1,6603 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

Виды изотопов	Разделение изотопов
Изотопы можно разделить на стабильные и нестабильные. Первые характеризуются устойчивостью, они способны оставаться неизменными. Ко второй группе относятся те изотопы, которые самостоятельно распадаются с течением времени	Разделение изотопов одного элемента — сложный и трудоёмкий процесс. Один из наиболее распространённых методов — физико-химический. Он строится на описании различий таких свойств, как скорость реакций или скорость испарения

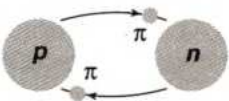
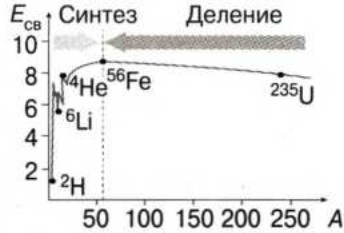


У водорода имеется три изотопа, у урана — 26. Наиболее распространён изотоп, в ядре которого 238 нуклонов; самым востребованным является уран с 235 нуклонами.

Энергия связи нуклонов в ядре



Между нуклонами в ядре действуют силы незлектрического происхождения, которые называются **ядерными** и относятся к сильным взаимодействиям.

Основные положения энергии связи	Физическая характеристика
Энергия связи ядра — минимальная энергия, которую необходимо затратить для полного расщепления ядра на отдельные частицы	 Ядерные силы, действующие между протоном p и нейтроном n в ядре за счёт обмена π-мезонами
Удельная энергия связи — энергия связи, приходящаяся на один нуклон	 График зависимости удельной энергии связи $E_{\text{св}}$ от массового числа A ядер
Энергия связи ядра связана с массой нуклонов	$E_{\text{св}} = \Delta m \cdot c^2,$ где Δm — дефект масс, $c^2 = 931,5 \frac{\text{МэВ}}{\text{а. е. м.}}$ — эквивалент квадрата скорости света
Сумма масс нуклонов в ядре атома всегда больше массы ядра. Разница между этими величинами называется дефектом масс Δm	$\Delta m = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n) - m_{\text{я}},$ где Δm — дефект масс, Z — число протонов в ядре, N — число нейтронов в ядре, m_p — масса протона, m_n — масса нейтрона, $m_{\text{я}}$ — масса ядра

Радиоактивность



Радиоактивность — явление самопроизвольного превращения одних ядер в другие с испусканием различных частиц.

Понятие	Определение
Естественная радиоактивность	Радиоактивность, наблюдаемая у неустойчивых изотопов, существующих в природе
Искусственная радиоактивность	Радиоактивность изотопов, полученных искусственно при ядерных реакциях
Радиоактивный распад	Радиоактивное (самопроизвольное) превращение исходного (материнского) ядра в новые (дочерние) ядра

Основные виды излучений различной физической природы

Альфа-лучи	Бета-лучи	Гамма-лучи
Поток ядер атомов гелия: $\alpha = {}^4_2\text{He}$. Обладают наименьшей проникающей способностью (слой бумаги толщиной $\sim 0,1$ мм для них непроходим), слабо отклоняются в магнитном поле	Поток электронов $\beta = {}^0_{-1}\text{e}$, движущихся со скоростями, близкими к скорости света. Обладают большей, чем α -лучи, проходимостью (алюминиевая пластинка толщиной в несколько миллиметров непроходима), сильно отклоняются в магнитном и электрическом полях	Поток квантов жёсткого рентгеновского излучения (электромагнитные волны) $\gamma = {}^0_0\gamma$. Обладают наибольшей проникающей способностью (слой свинца толщиной больше 1 см уменьшает интенсивность в два раза), не отклоняются магнитным полем



Радиоактивность была открыта в 1896 г. А. Беккерелем.

α -Распад	β -Распад	γ -Излучение
Спонтанное превращение радиоактивного ядра в новое ядро с испусканием α -частицы	β -Распад — спонтанное превращение радиоактивного ядра в новое ядро с испусканием электрона или позитрона. Электронный β -распад — спонтанное превращение радиоактивного ядра в новое ядро с испусканием электрона и антинейтрино. Позитронный β -распад — спонтанное превращение радиоактивного ядра в новое ядро с испусканием позитрона и нейтрино	Электромагнитное излучение, возникающее при переходе ядра из возбуждённого в более низкое энергетическое состояние; γ -излучение не сопровождается изменением заряда; масса ядра меняется ничтожно мало

Уравнение α -распада	Уравнение β -распада	Уравнение γ -распада
${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2\text{He}$	Уравнение электронного β -распада: ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + {}^0_{-1}e + \bar{\nu}_e$. Уравнение позитронного β -распада: ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + {}^0_{+1}e + \nu_e$	${}^A_ZX \rightarrow {}^A_ZY + {}^0_0\gamma$



В настоящее время, кроме α -, β - и γ -распадов, обнаружены распады с испусканием нейтрона, протона (а также двух протонов), кластерная радиоактивность, спонтанное деление.

Кластерная радиоактивность	Спонтанное деление
Явление самопроизвольного испускания ядрами ядерных фрагментов (кластеров) тяжелее, чем α -частица	Деление ядра, происходящее без внешнего возбуждения, имеющее на выходе такие же продукты, как и вынужденное деление: осколки и несколько нейтронов. По современным представлениям причиной спонтанного деления является туннельный эффект

Закон радиоактивного распада

Физическая величина, свойство	Описание
Период полураспада $T_{\frac{1}{2}}$	Промежуток времени, за который распадается примерно половина первоначального числа атомов
Радиоактивные элементы могут иметь различные периоды полураспада. При этом период полураспада для каждого данного вещества строго определён и не изменяется при изменении внешних условий	⁹⁰Th Торий 232 1,39 · 10¹⁰ лет ⁹²U Уран 238 4,56 · 10⁹ лет ⁹⁴Pu Плутоний 239 24 100 лет ⁸⁸Ra Радий 226 1590 лет ⁸⁴Po Полоний Ra A 218 3,05 мин ⁸⁴Po Полоний 212 3 · 10⁻⁷ с
Закон радиоактивного распада	Закон убывания числа радиоактивных атомов со временем: $N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}},$ где N — количество активных ядер, N_0 — начальное количество активных ядер, $T_{\frac{1}{2}}$ — период полураспада, t — время
Активность A (или скорость распада). Единица активности: беккерель (Бк)	Число распадов в единицу времени, согласно закону радиоактивного распада, зависит от времени: $A = A_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}},$ где A_0 — начальная активность препарата, $T_{\frac{1}{2}}$ — период полураспада, t — время

Ядерные реакции

Понятие	Определение, пояснение
Ядерные реакции	Преобразования атомных ядер, вызванные их взаимодействием с частицами или друг с другом
Выполняемые законы	- Закон сохранения зарядового числа: сумма зарядовых чисел до и после реакции остаётся постоянной. - Закон сохранения массового числа: сумма массовых чисел до и после реакции остаётся постоянной
Энергетический выход ядерной реакции	$Q = (M_A + M_B + M_C - M_D) \cdot c^2 = \Delta M \cdot c^2$, где M_A и M_B — массы исходных продуктов, M_C и M_D — массы конечных продуктов реакции, c^2 — эквивалент квадрата скорости света

Деление тяжёлых ядер

Основные понятия	Определение, пояснение
Реакция деления	Нестабильное ядро делится на два крупных фрагмента сравнимых масс
Цепная ядерная реакция	Реакция деления атомных ядер тяжёлых элементов под действием нейтронов. В результате деления ядра, инициированного нейтроном, возникают новые нейтроны, способные вызвать реакции деления других ядер
Коэффициент размножений нейтронов	Отношение числа нейтронов в каждом последующем поколении к числу нейтронов в новом поколении: $k = \frac{N}{N_0}$. При $k < 1$ деление ядра прекращается, при $k > 1$ происходит взрыв
Термоядерная реакция	Процесс образования ядра в результате соединения (слияния) лёгких атомных ядер. Протекает лишь в условиях очень высоких температур ($T \sim 10^6$ К)

АСТРОФИЗИКА

СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА



Солнечная система включает центральную звезду (Солнце) и все естественные космические объекты, обращающиеся вокруг неё. Она сформировалась путём гравитационного сжатия газопылевого облака около 4,57 млрд лет назад.

Физическое явление	Определение, характеристика
Солнечная система	Система планет, в центре которой находится звезда Солнце
Планеты земной группы	Меркурий, Венера, Земля и Марс. Схожи с Землёй размерами, имеют твёрдую каменистую поверхность и находятся близко к Солнцу
Планеты-гиганты	Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. Имеют очень большие размеры, низкую плотность, так как состоят в основном из газов; для них характерно наличие колец из ледяной пыли и осколков. Крупнейшие планеты Солнечной системы Юпитер и Сатурн состоят в основном из водорода и гелия; меньшие газовые гиганты Уран и Нептун, помимо водорода и гелия, содержат в составе своих атмосфер метан и угарный газ

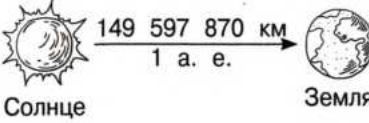
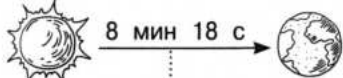


Солнечная система разделена на внутреннюю и внешнюю области, которые разграничены скоплением мелких объектов — поясом астероидов, который располагается за Марсом.

Особенности планет земной группы

Характеристика	Наименование планет, пояснение
Наличие спутников	Земля и Марс
Плотность атмосферы	Самой плотной атмосферой обладает Венера, на втором месте — Земля, у Марса атмосфера слабее, чем у Земли, и почти совсем незаметна она у Меркурия
Гидросфера	Земля
Направление вращения	Венера вращается в направлении, обратном её движению вокруг Солнца, в отличие от других трёх планет земной группы
Магнитное поле	У всех планет земной группы есть магнитные поля: почти незаметное — у Венеры, сильное — у Земли, средней напряжённости — у Меркурия и Марса

Единицы измерения

Астрономическая единица (а. е.)	Световой год	Парсек (пк)
Длина большой полуоси орбиты Земли: 1 а. е. $\approx$ 150 млн км  Солнце → Земля	Расстояние, которое свет проходит за год. 1 св. год = $9,5 \cdot 10^{15}$ м  Время, за которое луч света достигает Земли	Расстояние до звезды, для которой угол параллакса $\alpha = \frac{1}{3600}$ градуса. 1 пк $\approx$ 3,26 св. года 

НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА

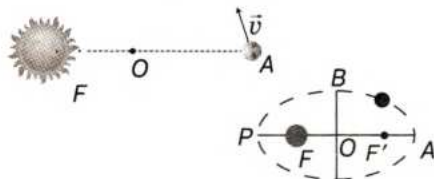
Законы Кеплера



Планеты вращаются вокруг Солнца в разных плоскостях по эллиптическим орбитам в соответствии с законами Кеплера.

Первый закон Кеплера

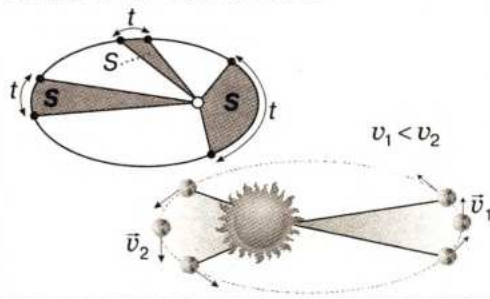
Каждая планета движется по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце.



Траектория движения планеты в Солнечной системе: O — центр эллипса, OA — большая полуось, OB — малая полуось, F и F' — фокусы эллипса. В фокусе F находится Солнце. Ближайшая точка к Солнцу называется **перигелием** (точка P), наиболее удалённая (точка A) — **афелием**.

Второй закон Кеплера

Закон равных площадей. Радиус-вектор планеты за равные промежутки времени описывает равновеликие площади. Каждая планета движется в плоскости, проходящей через Солнце. Так как площади равны, то, чем большее расстояние пройдёт планета по орбите за данное время, тем больше у неё скорость на этом участке.

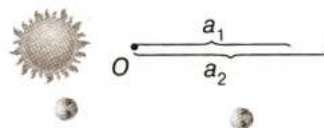


Третий закон Кеплера

Квадраты периодов обращения планет вокруг Солнца пропорциональны кубам больших полуосей их эллиптических орбит:

$$\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2 = \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^3,$$

где T_1, T_2 — периоды обращения планет, a_1, a_2 — большие полуоси обращения планет



Основные формулы небесной механики

Физические величины	Формулы	Физические величины	Формулы
Гравитационная постоянная	$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$	Угловая скорость вращения	$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T} = \frac{v}{R}$
Объём планеты	$V = \frac{4\pi R_0^3}{3},$ где R_0 — радиус планеты	Центростремительное ускорение	$a_{\text{ц}} = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R = \frac{4\pi^2}{T^2} R = \omega v$
Средняя плотность	$\rho = \frac{M}{V} = \frac{3M}{4\pi R_0^3},$ где M — масса планеты	Ускорение свободного падения	$g = G \frac{M}{R_0^2}$
Период вращения	$T = \frac{2\pi R}{v},$ где R — радиус орбиты	Первая космическая скорость	$v_{\text{1к}} = \sqrt{G \frac{M}{R_0}} = \sqrt{\frac{4}{3} G \pi \rho R_0^2}$
Частота вращения	$\nu = \frac{1}{T} = \frac{v}{2\pi R}$	Вторая космическая скорость	$v_{\text{2к}} = \sqrt{2} v_{\text{1к}} = \sqrt{2G \frac{M}{R_0}} = \sqrt{2gR_0}$
Линейная скорость вращения	$v = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi R \nu = \omega R$	Эксцентриситет орбиты	$e^2 = 1 - \frac{b^2}{a^2},$ где a — размер большой полуоси орбиты, b — размер малой полуоси орбиты

МАЛЫЕ ТЕЛА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Физическое явление	Определение
Астероид	Малая планета, невидимая невооружённым глазом. Общее число астероидов в кольце между Марсом и Юпитером составляет около 1 млн
Метеор	Световое явление, заключающееся во вспышках на различных высотах над земной поверхностью мельчайших твёрдых частиц, вторгшихся в атмосферу
Метеориты	Достигшие Земли метеороиды. По химическому составу и структуре различают три основные группы метеоритов: • каменные (аэролиты); • железоканменные (сидеролиты); • железные (сидериты)
Болид	Крупный метеорит, проникающий из межпланетного пространства в нижние слои атмосферы
Комета	Тело Солнечной системы, движущееся вокруг Солнца по эллиптической орбите на значительном расстоянии; имеет вид туманного светящегося пятна с ярким длинным хвостом
Дамоклоиды	Небольшие космические тела, обращающиеся вокруг Солнца по орбитам, похожим на кометные (сильно вытянуты и сильно наклонены к плоскости земной орбиты), но не проявляющие кометной активности (не дающие комы и не образующие хвостов)



Самый большой дамоклоид имеет диаметр 72 км, в настоящее время известно более 40 этих объектов. Дамоклоиды — одни из самых тёмных тел Солнечной системы. Считается, что дамоклоиды являются ядрами комет, зародившихся в облаке Оорта, но потерявших свои летучие вещества. Некоторые дамоклоиды обращаются вокруг Солнца в направлении, противоположном движению больших планет.

ЗВЁЗДЫ И ГАЛАКТИКИ

Схема строения спиральной Галактики

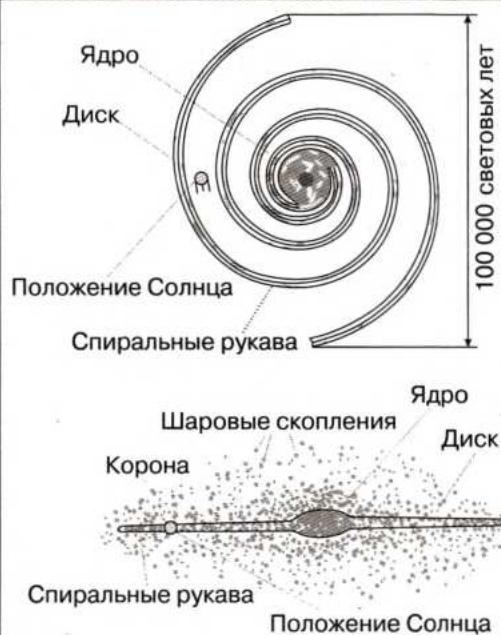
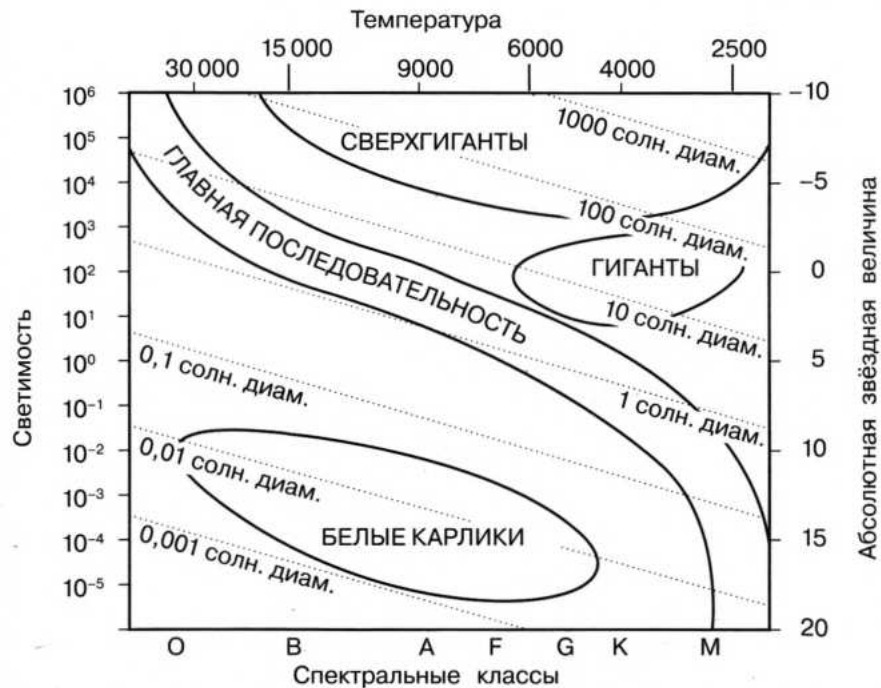


Диаграмма Герцшпрунга — Рассела



Термин	Определение
Звёздное скопление	Гравитационно связанная группа звёзд, имеющая общее происхождение и движущаяся в гравитационном поле галактики как единое целое. Возраст звёзд скопления примерно одинаков, и параллаксы должны быть близки, все остальные параметры могут отличаться
Шаровое звёздное скопление	Звёздное скопление, в состав которого входит большое число звёзд, связанных значительными гравитационными силами. Скопление обращается вокруг галактического центра как спутник. В отличие от рассеянных звёздных скоплений, расположенных в галактическом диске, шаровые находятся в гало
Квazarы	Внегалактические объекты
Магеллановы Облака	Галактики — спутники Млечного Пути
Галактический диск	Компонент структуры линзовидных и спиральных галактик. Галактический диск представляет собой плоскость, в которой находятся спирали, рукава и перемиčky. Галактический диск состоит из газа, пыли и звёзд



Млечный Путь — одна из многочисленных галактик Вселенной. Является спиральной галактикой с четырьмя рукавами и перемичкой типа SBb по классификации Хаббла, вместе с галактикой Андромеды (M31) и галактикой Треугольника (M33), а также несколькими десятками меньших галактик-спутников образует Местную группу галактик, которая, в свою очередь, входит в Сверхскопление Девы.

Классификация звёзд



Солнце — жёлтая звезда главной последовательности (подкласс главной последовательности — жёлтый карлик), единственная звезда Солнечной системы.

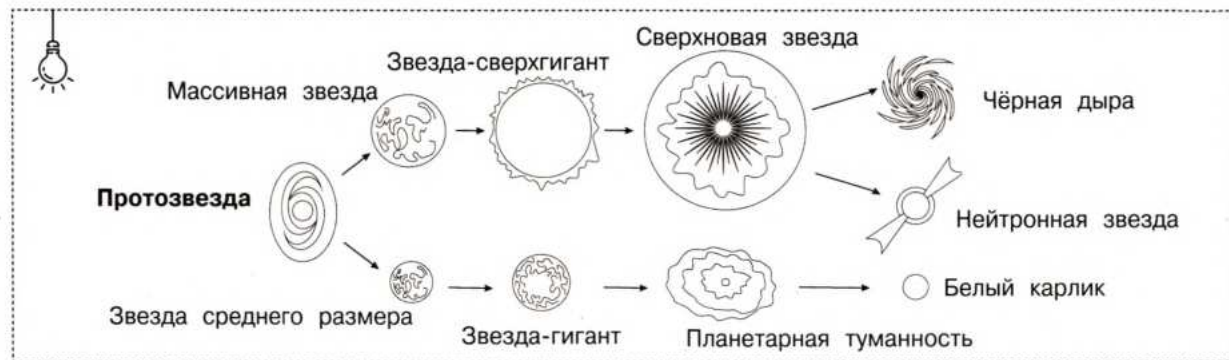
Температура поверхности — 5778 К, относится к классу G (по гарвардской классификации).



Спектральная классификация звёзд, разработанная в Гарвардской обсерватории в 1890—1924 гг., — температурная классификация, основанная на виде и относительной интенсивности линий поглощения и испускания спектров звёзд. Внутри класса звёзды делятся на подклассы от 0 (самые горячие) до 9 (самые холодные).

Класс	Температура	Цвет звезды	Особенности спектра
O	30 000—60 000 К	Голубые ✓ Минтака	Интенсивные линии ионизированного гелия, линий металлов нет
B	11 000—30 000 К	Бело-голубые ✓ Спика	Линии нейтрального гелия. Слабые линии H и K ионизированного кальция
A	7500—11 000 К	Белые ✓ Сириус, Вега	Линии водорода достигают наибольшей интенсивности. Видны линии H и K ионизированного кальция, слабые линии металлов
F	6000—7500 К	Желтовато-белые ✓ Прокцион, Канопус	Ионизированные металлы. Линии водорода ослабевают
G	5000—6000 К	Жёлтые ✓ Солнце, Капелла	Нейтральные металлы, интенсивные линии ионизированного кальция H и K
K	3500—5000 К	Оранжевые ✓ Арктур, Альдебаран	Линий водорода почти нет. Присутствуют слабые полосы окиси титана. Многочисленные линии металлов
M	2000—3500 К	Красные ✓ Антарес, Бетельгейзе	Сильные полосы окиси титана и других молекулярных соединений

Жизненный цикл звёзд



Современные представления о происхождении и эволюции Солнца и звёзд

Гипотеза Канта и Лапласа	Гипотеза Большого взрыва. Космологическая модель Г. А. Гамова
Звёзды и планетные системы образовались в едином процессе в результате сжатия облака межзвёздной газопылевой материи. Звёзды зарождаются из водородно-гелиевых туманностей. Под действием сил тяготения газ сжимается, температура повышается. Гравитационной энергии, освобождающейся при образовании звезды, оказывается достаточно для свечения в течение нескольких миллионов лет. Гравитационная энергия Солнца будет израсходована за ≈ 8 млн лет	Расширение Вселенной возникло в результате Большого взрыва, который произошёл около 14 млрд лет назад. При этом за счёт очень высокой температуры и расширения Вселенной происходил термоядерный синтез лёгких химических элементов — водорода и гелия. Остальные элементы были синтезированы в процессе образования звёзд

Все права защищены. Книга или любая ее часть не может быть скопирована, воспроизведена в электронной или механической форме, в виде фотокопии, записи в память ЭВМ, репродукции или каким-либо иным способом, а также использована в любой информационной системе без получения разрешения от издателя. Копирование, воспроизведение и иное использование книги или ее части без согласия издателя является незаконным и влечет уголовную, административную и гражданскую ответственность.

Справочное издание
анықтамалық баспа
Для среднего и старшего школьного возраста
Орта және ажа возраста үшін
ШКОЛЬНЫЙ КУРС В НАГЛЯДНЫХ ТАБЛИЦАХ

Вахнина Светлана Васильевна
Черепова Ксения Григорьевна

ФИЗИКА

7—11 КЛАССЫ
(орыс тілінде)

Ответственный редактор Т. Судакова
Редактор П. Умитбаева
Художественный редактор Н. Кривошта

Во внутреннем оформлении использованы иллюстрации: Albert Stephen Julius, AleksOrel, AlexHliv, Andris Torms, Art Corner, A-spring, BLKstudio, BlueRingMedia, bsd, Chirpunk131, Cube29, davoada, deonissio123, Designua, DMaryashin, Dzm1try, eduardonunez, Emir Kaan, Emre Terim, Fouad A. Saad, fridas, Gmens Graphic Studio, Iconic Bestiary, LHF Graphics, lisheng2121, Mariusz Uchman, mijatnjatovic, miniwde, Mountain Brothers, Nasky, nikiteev_konstantin, NikWB, olllikeballoon, Patricia F. Carvalho, Peter Hermes Furian, Pranch, RaulAlmu, Sansanorth, Sergey Merkulov, Serorion, ShadeDesign, SpicyTruffel, stockakia, Tanya K, udaix, Vector, VectorMine, vectorWalker2019, Andriy Lipkan / Shutterstock.com
Используется по лицензии от Shutterstock.com

Соответствует техническому регламенту ТР ТС 007/2011
КО ТР 007/2011 техникалық регламентіне сәйкес келеді

Страна происхождения: Российская Федерация
Шығарылған елі: Ресей Федерациясы

ООО «Индустриальность-Экспо»
123308, Россия, город Москва, улица Зарядье, дом 1, строение 1, этаж 20, каб. 2010
Тел. 8 (495) 471-66-86.
Home page: www.starmo.ru E-mail: info@starmo.ru
@starmo @STARMO АНГЛ. E-mail: starmo@starmo.ru
123308, Russia, city Moscow, Zaryadye square, 1, building 20, office 2010 k.
Tel. 8 (495) 471-66-86.
Home page: www.starmo.ru E-mail: info@starmo.ru
@starmo @STARMO

Интернет-магазин: www.boroda.kz
 Интернет-банк: www.boroda.kz
 Интернет-Республика Казахстан: ТОО «ИЭИ-Алматы»
 Казахстан Республикасындағы интернет-ТОО «ИЭИ-Алматы» ЖШС.
 Дистрибуция и предоставление по лицензии патентов на производство,
 в Республике Казахстан: ТОО «ИЭИ-Алматы»
 Компания Республикасында имеет один филиалный пункт на территории
 казахстанской республики: ТОО «ИЭИ-Алматы» ЖШС.
 Алматы, г. Домбайский ск. 2-ой, этаж 5, офис 1.
 Тел.: 8 (777) 281-59-30/59-12; e-mail: boroda@boroda.kz
 E-mail: boroda@boroda.kz
 Сайт: www.boroda.kz
 Тел.: 8 (777) 281-59-30/59-12; e-mail: boroda@boroda.kz
 E-mail: boroda@boroda.kz
 Сайт: www.boroda.kz

Сведения о подтверждении соответствия моделям согласно законодательству РФ о техническом регулировании можно получить на сайте Идентификация «Эксперт» www.ekspert.ru/identification
Выданы лицензиями: Роспотребнадзор, Служба ФТС, Росстандарт

Дата изготовления / Подписано в печать 14.06.2023.
Формат 60x90^{1/16}. Печать офсетная. Бумага типографская
Усл. печ. л. 14,0. Доп. тираж 3000 экз. Заказ С-1517.

Отпечатано в типографии филиала
АО «ТАТМЕДИА» «ПИК «Идел-Пресс».
420066, Россия, г. Казань, ул. Декабристов, 2



ЭКСМО

Издательство «Эксмо» — универсальное издательство №1 в России, является одним из лидеров книжного рынка Европы.

eksmo.ru eksmo



ISBN 978-5-04-179904-5



9 785041 799045 >



Хочешь стать автором «Эксмо»?

eksmo.ru

Официальный интернет-магазин
издательства «Эгмонт»



EAD