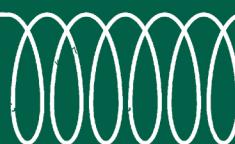


НАГЛЯДНЫЙ СПРАВОЧНИК для подготовки

к ОГЭ

и

ЕГЭ



И.А. Попова

ФИЗИКА

- ✓ ВСЕ ТЕМЫ ШКОЛЬНОГО КУРСА
- ✓ ТРЕНИРОВОЧНЫЕ ЗАДАНИЯ
- ✓ ОТВЕТЫ И КОММЕНТАРИИ



НАГЛЯДНЫЙ СПРАВОЧНИК для подготовки

к ОГЭ
и
ЕГЭ

И.А. Попова

ФИЗИКА

МОСКВА
2020



УДК 373:53
ББК 22.3я721
П58

Макет подготовлен при содействии ООО «Айдиономикс»

Попова, Ирина Александровна.

П58 Физика / И. А. Попова. — Москва : Эксмо, 2020. — 320 с. —
(Наглядный справочник для подготовки к ОГЭ и ЕГЭ).

ISBN 978-5-04-093006-7

Справочник содержит теоретические сведения за весь школьный курс физики, а также практические задания с ответами и пояснениями. Весь материал изложен в наглядной и доступной форме, что способствует быстрому усвоению большого количества информации.

Издание окажет помощь старшеклассникам при подготовке к ОГЭ и ЕГЭ, урокам, различным формам текущего и промежуточного контроля.

УДК 373:53
ББК 22.3я721

ISBN 978-5-04-093006-7

© Попова И.А., 2018
© Оформление. ООО «Издательство «Эксмо», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
■ МЕХАНИКА.....	6
Кинематика	6
Механическое движение	6
Материальная точка	10
Скорость материальной точки.....	12
Ускорение материальной точки.....	18
Равномерное прямолинейное движение.....	20
Равноускоренное прямолинейное движение.....	23
Свободное падение.....	26
Движение точки по окружности	32
Динамика	35
Инерциальные системы отсчёта	35
Первый закон Ньютона	36
Принцип относительности Галилея	38
Масса тела	39
Плотность вещества.....	39
Сила	41
Второй закон Ньютона	43
Третий закон Ньютона для материальных точек.....	45
Закон всемирного тяготения.....	48
Движение небесных тел.....	51
Деформация.....	54
Различия силы тяжести и веса тела	60
Векторная разность.....	61
Сила трения	64
Законы Ньютона в решении задач.....	68
Давление	71
Статика	73
Основные понятия.....	73
Момент силы относительно оси вращения.....	74
Условия равновесия твёрдого тела.....	76
Давление в жидкости	79
Атмосферное давление	82
Закон Паскаля	83
Сообщающиеся сосуды.....	83
Закон Архимеда	84
Законы сохранения в механике.....	88
Важные понятия	88
Импульс материальной точки.....	88
Импульс системы тел.....	91
Закон изменения и сохранения импульса	92
Работа силы на малом перемещении.....	95
Мощность силы	98
Кинетическая энергия материальной точки.....	99
Потенциальная энергия.....	101
Закон изменения и сохранения механической энергии	104
Механические колебания и волны.....	107
Важные понятия	107
Период и частота колебаний	107
Гармонические колебания.	
Кинематическое описание	111
Вынужденные колебания	119
Поперечные и продольные волны.....	122
Звук. Скорость звука.....	126
❖ МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА	129
Молекулярно-кинетическая теория.....	129
Основные положения	129
Модели строения твёрдых тел, жидкостей и газов.....	130
Тепловое движение атомов и молекул вещества.....	132
Взаимодействие частиц вещества	132
Броуновское движение.....	133
Диффузия.....	134
Модель идеального газа в МКТ	135
Основное уравнение МКТ	136
Абсолютная температура	137
Температура — мера средней кинетической энергии молекул	138
Уравнение $p = n \cdot k \cdot T$	138
Модель идеального газа в термодинамике.....	141
Закон Дальтона для давления смеси разреженных газов.....	142
Изопроцессы в разреженном газе.....	145
Насыщенные и ненасыщенные пары	147
Влажность воздуха	150
Изменение агрегатных состояний вещества	151
Преобразование энергии в фазовых переходах	155
Термодинамика	157
Тепловое равновесие и температура	157
Внутренняя энергия	157
Теплопередача.....	162
Количество теплоты.	
Удельная теплоёмкость вещества	164
Элементарная работа в термодинамике.....	167
Первый закон термодинамики	169

Второй закон термодинамики.	
Необратимость	170
Принципы действия тепловых машин. КПД.....	171
Уравнение теплового баланса.....	173
— ЭЛЕКТРОДИНАМИКА	175
Электрическое поле.....	175
Электризация тел и её проявления	175
Взаимодействие зарядов	178
Электрическое поле	180
Принцип суперпозиции электрических полей	182
Потенциальность электростатического поля	185
Проводники в электростатическом поле.....	188
Дизэлектрики в электростатическом поле.....	191
Конденсатор	192
Законы постоянного тока	197
Сила тока	197
Условия существования электрического тока.....	199
Закон Ома для участка цепи.....	199
Электрическое сопротивление.....	200
Источники тока.....	203
Закон Ома для полной (замкнутой) электрической цепи	204
Соединение проводников.....	205
Работа электрического тока.....	208
Мощность электрического тока.....	210
Свободные носители электрических зарядов в проводниках	214
Полупроводники	215
Магнитное поле	220
Механическое взаимодействие магнитов.....	220
Магнитное поле проводника с током.	
Опыт Эрстеда	225
Сила Ампера: направление, величина	226
Сила Лоренца: направление, величина.....	229
Электромагнитная индукция.....	234
Поток вектора магнитной индукции	234
Явление электромагнитной индукции	234
Закон электромагнитной индукции Фарадея	237
ЭДС индукции в прямом проводнике длиной L , движущемся со скоростью v в однородном магнитном поле B	238
Правило Ленца	240
Индуктивность	242
Энергия магнитного поля катушки с током	244
Электромагнитные колебания и волны.....	246
Колебательный контур	246
Вынужденные электромагнитные колебания	253
Переменный ток	256
Электромагнитные волны	260
Оптика	265
Прямолинейное распространение света	265
Закон отражения света	266
Построение изображений в плоском зеркале	267
Преломление света	269
Полное внутреннее отражение	271
Линзы	273
Фотоаппарат как оптический прибор	279
Глаз как оптическая система	280
Интерференция света	282
Дифракция света	285
Дисперсия света	286
▲ СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ	289
Понятия СТО	289
Принцип относительности Эйнштейна	290
Следствия постулатов Эйнштейна	291
Энергия свободной частицы.	
Импульс частицы	292
Связь массы и энергии свободной частицы. Энергия покоя	293
❖ КВАНТОВАЯ ФИЗИКА	294
Корпускулярно-волновой дуализм	294
Гипотеза Планка о квантах	294
Фотоны	295
Фотоэффект	297
Волновые свойства частиц	300
Давление света	301
Физика атома	303
Планетарная модель атома	303
Постулаты Бора	305
Линейчатые спектры	307
Лазер	308
Физика атомного ядра	310
Нуклонная модель ядра Гейзенberга — Иваненко	310
Энергия связи нуклонов в ядре	311
Дефект массы ядра	312
Радиоактивность	313
Закон радиоактивного распада	316
Ядерные реакции	318

ВВЕДЕНИЕ



Перед вами самый удобный справочник, который поможет школьнику систематизировать и закрепить знания по физике за курс средней школы.

Пособие содержит основную и самую важную информацию из курсов механики, молекулярной физики, электродинамики, специальной теории относительности и квантовой физики.

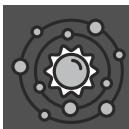
Материал книги представлен в виде таблиц, схем, рисунков, упорядочен и систематизирован, изложен доступным для усвоения языком. Это обеспечит максимальную сконцентрированность внимания, эффективное повторение и подготовку школьника по предмету.

Теоретический материал каждой темы сопровождается блоком практических заданий, куда вошли как стандартные классические задачи, так и упражнения, составленные в соответствии с форматом требований ЕГЭ. Приведённые примеры с развёрнутыми разъяснениями позволяют детально разобраться в темах школьного курса, отработать навыки выполнения различных заданий и освоить применение основных законов и формул.

Справочник предназначен учащимся средней школы для самоподготовки к различным видам контроля, сдаче ОГЭ и ЕГЭ, а также может использоваться учителями физики для работы на уроке.

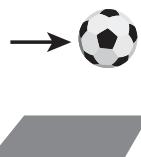
Желаем успехов!

МЕХАНИКА



КИНЕМАТИКА

Кинематика (от греч. *kinematos* — движение) изучает механическое движение тел, не рассматривая причины, которыми это движение вызывается. Задача кинематики — дать математическое описание движения тел.



МЕХАНИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

Механическим движением тела называют изменение его положения в пространстве относительно других тел с течением времени.

В таблице представлена зависимость координат тела от времени.

$t, \text{ с}$	0	1	2	3	4
$x, \text{ м}$	0	2	4	6	8

■ Виды движения

Движение может быть двух видов: прямолинейным и криволинейным.

Прямолинейное движение

Равномерное — движение, при котором тело за равные промежутки времени проходит одинаковое расстояние. При равномерном движении скорость тела остаётся постоянной.

Неравномерное — движение, при котором тело за **равные промежутки времени** проходит **неодинаковое расстояние**.

Тело за первые 10 мин проходит 30 м, а за следующие 10 мин — 40 м.

Один из видов неравномерного движения: **равнопеременное** — движение, при котором за равные про-

межутки времени скорость тела изменяется на одну и ту же величину.

- Шарик уронили в воду с некоторой высоты. Первые 3 с шарик двигался равноускоренно, а после 3 с движение продолжалось с постоянной скоростью.

На рисунке показан график изменения координаты шарика с течением времени.

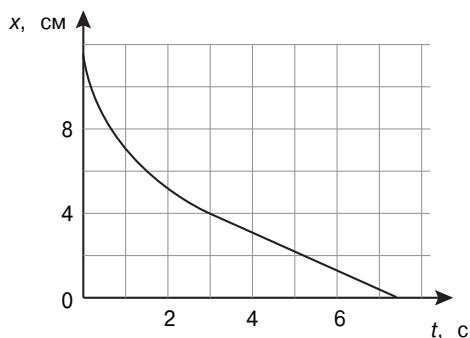
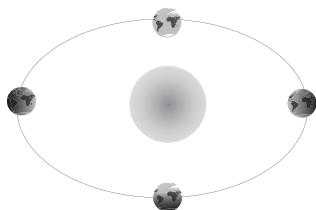


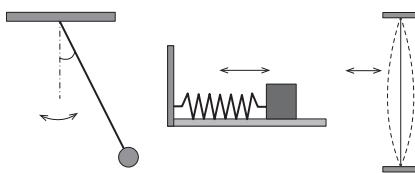
График изменения координаты шарика с течением времени, где x — координата тела, t — время движения

Криволинейное движение

Вращательное — движение в одном направлении **по плоской** (или пространственной) **замкнутой** траектории. Примером может служить движение Земли вокруг Солнца.



Колебательное — это движение, которое полностью или практически полностью повторяется с течением времени.



Колебательное движение

■ Относительность механического движения

Относительность механического движения — это зависимость траектории движения тела, пройденного пути, перемещения и скорости от выбора системы отсчёта.

■ Система отсчёта

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

Система отсчёта — совокупность системы координат и часов, связанных с телом отсчёта. В прямоугольной системе координат положение точки в пространстве задаётся её проекциями на три взаимно перпендикулярные оси. Совокупность координат $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ в момент времени t определяет закон движения материальной точки в координатной форме.



Практические задания

1

Четыре объекта двигались по шоссе (ось Ox). В таблице представлена зависимость их координат от времени.

$t, \text{ с}$	0	1	2	3	4	5
$x_1, \text{ м}$	0	2	4	6	8	10
$x_2, \text{ м}$	0	0	0	0	0	0
$x_3, \text{ м}$	0	1	4	9	16	25
$x_4, \text{ м}$	0	2	0	-2	0	2

У какого из тел скорость могла быть постоянна и отлична от нуля?

Решение:

Способ 1

Рассмотрим каждый объект.

Объект x_1 за каждую секунду изменял координату на 2 м, значит, $s=2\text{ м}$, $t=1\text{ с}$. Тогда его скорость постоянна и равна:

$$v = \frac{s}{t}; \quad v = \frac{2\text{ м}}{1\text{ с}} = 2 \text{ м/с.}$$

Объект x_2 не изменял координату, значит, оставался на месте.

Объект x_3 изменял координату неравномерно, значит, его скорость непостоянна.

Объект x_4 изменял координату периодически от 2 до -2 и обратно, то есть это колебательное движение.

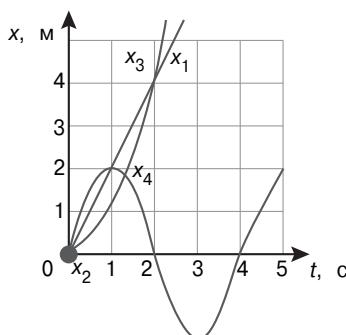
Таким образом, скорость постоянна и отлична от нуля только у объекта x_1 .

Способ 2

Начертим графики каждого объекта.

Графику равномерного движения (с постоянной скоростью) соответствует только движение объекта x_1 .

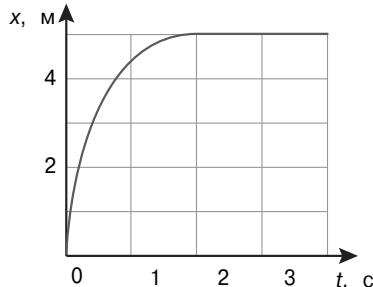
Ответ: x_1 .



- 2** Мячик катится по горке. Изменение его координаты с течением времени в инерциальной системе отсчёта показано на графике. Охарактеризуйте движение мячика на каждом участке.

Решение:

На участке 1–2 с изображена парабола, то есть график равнопеременного движения, причём со временем движение замедляется (за каждую следующую секунду мячик проходит меньшее расстояние). На участке 2–4 с координата мячика не изменяется, значит, мячик остановился и остаётся неподвижным.



Ответ: на участке 1 движение равнозамедленное, на участке 2 мячик покоится.

- 3** Эскалатор метро поднимается со скоростью 1 м/с. Может ли человек, находящийся на нём, быть в покое в системе отсчёта, связанной с землёй?

- 1) Может, если движется в противоположную сторону со скоростью 1 м/с.
- 2) Может, если движется в ту же сторону со скоростью 1 м/с.
- 3) Может, если стоит на эскалаторе.
- 4) Не может ни при каких условиях.

Решение:

Скорость человека относительно земли v_3 будет равна нулю, если:

$$V_3 = v_3 - v_4 = 0,$$

где v_3 — скорость эскалатора относительно земли, v_4 — скорость человека относительно эскалатора, то есть если эти скорости равны по модулю и направлены противоположно друг другу.

Ответ: 1.

МАТЕРИАЛЬНАЯ ТОЧКА

Тело, размерами которого в данных условиях можно пренебречь, называется **материальной точкой**.

Решаются две задачи: рассчитать манёвр стыковки двух космических кораблей и вычислить период обращения космических кораблей вокруг Земли.

Только во втором случае космические корабли можно рассматривать как материальные точки, так как для стыковки кораблей важны их размеры.

■ Радиус-вектор, траектория, перемещение, путь

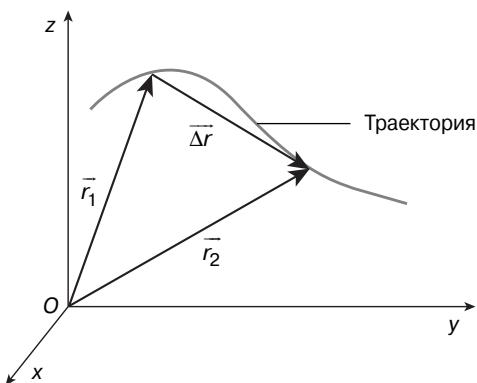
Радиус-вектор \vec{r} — вектор, соединяющий начало отсчёта с положением материальной точки в произвольный момент времени.

Координаты x и y связаны (см. рисунок) с r и α следующими соотношениями:

$$\begin{cases} x = r \cos \alpha \\ y = r \sin \alpha \end{cases}$$

Траектория — линия, которую описывает тело (материальная точка) с течением времени, перемещаясь из одной точки в другую.

Перемещение — вектор, проведённый из начального положения материальной точки в конечное.



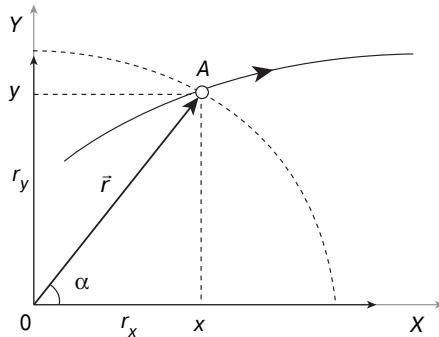
Траектория и перемещение:

\vec{r}_1 и \vec{r}_2 — радиус-векторы материальной точки в двух положениях;

$\Delta\vec{r} = \vec{r}(t_2) - \vec{r}(t_1) = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$ — перемещение;

$\vec{r} = (x(t), y(t), z(t))$ — координаты радиус-вектора;

$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ — модуль (длина) радиус-вектора

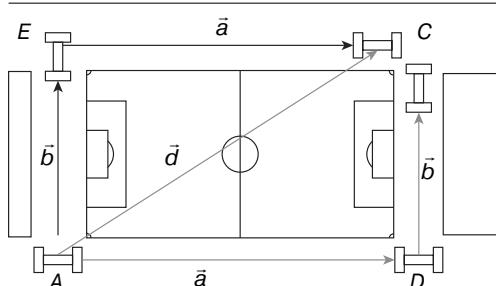


Связь радиус-вектора с координатами точки:

r_x и r_y — проекции радиус-вектора на координатные оси; α — угол наклона радиус-вектора к оси Ox ; x , y — координаты точки A и радиус-вектора \vec{r}

Пройденный путь s — длина участка траектории, пройденного материальной точкой за данный промежуток времени.

Для разных видов движения перемещение и пройденный путь вычисляются разными способами.



Сложение перемещений

Сложение перемещений — результирующее перемещение, равное **векторной сумме** последовательных перемещений:

$$\vec{d} = \vec{a} + \vec{b}.$$



Практические задания

4 Вертолёт поднимается вертикально вверх. Какова траектория движения точки на конце лопасти винта вертолёта в системе отсчёта, связанной с человеком, стоящим на земле?

- 1) точка
- 2) прямая
- 3) окружность
- 4) винтовая линия

Решение:

Точка на конце лопасти винта вертолёта вращается относительно человека, стоящего на земле, и одновременно удаляется от него, образуя винтовую линию.

Ответ: 4.

5 Сколько секунд пассажир, сидящий у окна в вагоне поезда, идущего со скоростью 12 м/с, будет видеть проходящий мимо него встречный поезд, скорость которого 9 м/с, а длина 168 м?

Решение:

Время движения встречного поезда относительно пассажира, сидящего в первом поезде:

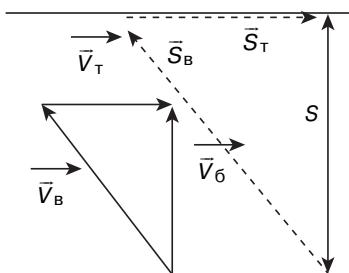
$$t = \frac{s}{v_1 + v_2},$$

где v_1 — скорость первого поезда, v_2 — скорость встречного поезда. Тогда

$$t = \frac{168 \text{ м}}{12 \text{ м/с} + 9 \text{ м/с}} = 8 \text{ с.}$$

Ответ: 8 с.

- 6** Лодка переплывает реку шириной 600 м, причём рулевой держит курс таким образом, что лодка всё время плывёт перпендикулярно берегам. Скорость лодки относительно воды 5 м/с, скорость течения реки 3 м/с. Через какое время лодка достигнет противоположного берега?



Результирующее перемещение:
 V_b — скорость лодки относительно воды; \bar{V}_t — скорость течения;
 \bar{V}_b — скорость лодки относительно берега; \bar{S}_b — перемещение лодки относительно воды;
 \bar{S}_t — перемещение течения;
 \bar{S}_b — перемещение лодки относительно берега

Решение:

Треугольник скоростей подобен треугольнику перемещений, поэтому

$$t = \frac{S}{V_b} = \frac{S}{\sqrt{V_b^2 - V_t^2}} = \frac{600 \text{ м}}{\sqrt{(5 \text{ м/с})^2 - (3 \text{ м/с})^2}} = 150 \text{ с.}$$

Ответ: через 150 с.

СКОРОСТЬ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

Средняя путевая скорость — скалярная величина, равная отношению пути к промежутку времени, затраченному на его прохождение:

$$V_{cp} = \frac{S}{t}, \text{ где } V_{cp} \text{ — средняя путевая}$$

скорость, S — пройденный путь, t — время, затраченное на его прохождение.

Единица скорости — метр в секунду (**м/с**).

✓ На рисунке представлен график зависимости пути S велосипедиста от времени t . Рассмотрим характер движения велосипедиста на каждом участке.

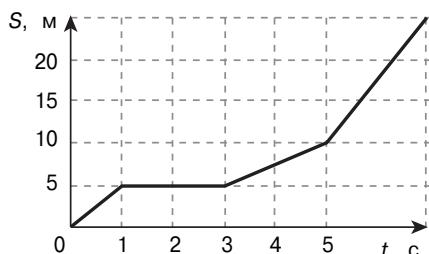


График движения велосипедиста

От 0 до 1 с — движение равномерное со скоростью:

$$V_1 = \frac{5 \text{ м}}{1 \text{ с}} = 5 \text{ м/с.}$$

От 1 до 3 с — велосипедист неподвижен.

От 3 до 5 с — движение равномерное со скоростью:

$$V_2 = \frac{(10 - 5) \text{ м}}{2 \text{ с}} = 2,5 \text{ м/с.}$$

От 5 до 7 с — движение равномерное со скоростью:

$$V_3 = \frac{(25 - 10) \text{ м}}{2 \text{ с}} = 12,5 \text{ м/с.}$$

На всём интервале времени можно определить среднюю скорость:

$$V_{\text{ср}} = \frac{25 \text{ м}}{7 \text{ с}} \approx 3,57 \text{ м/с.}$$



Скалярная величина — величина, которая не имеет направления и характеризуется только числовым значением (например, масса, мощность, температура).

■ Мгновенная скорость

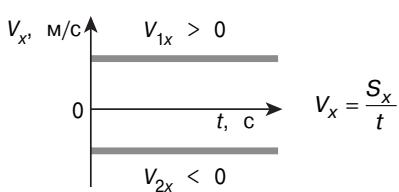
При уменьшении промежутка времени, за которое совершается перемещение, до минимального значения (мгновения) можно определить

мгновенную скорость \vec{V} — скорость движения в данный момент времени — предел, к которому стремится средняя скорость на бесконечно малом промежутке времени Δt :

$$\vec{V} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{S}}{\Delta t}.$$

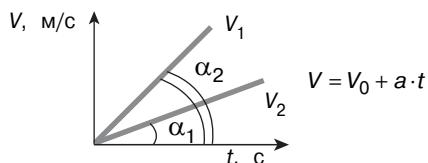
Графики скорости

При равномерном движении

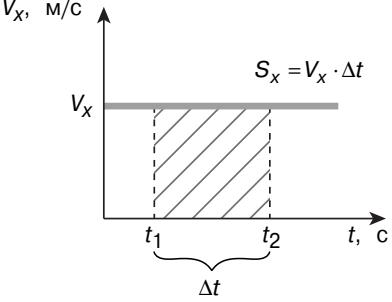
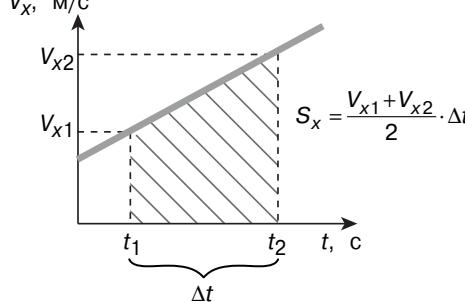


\bar{V}_1 и \bar{V}_2 направлены противоположно

При равнопеременном движении



Чем больше угол наклона прямой скорости, тем больше ускорение тела

Определение перемещения по графику скорости	
При равномерном движении	При равнопеременном движении
	

Площадь фигуры под графиком скорости равна пройденному пути

- Четыре тела движутся вдоль оси Ox . На рисунке изображены графики зависимости проекций скоростей V_x от времени t для этих тел.

Рассмотрим характер движения каждого тела. Тела 1, 2 и 3 движутся с положительным ускорением (разгоняются), причём с наименьшим ускорением разгоняется тело 3, с наибольшим — тело 1. Тело 4 движется с отрицательным ускорением (тормозит).

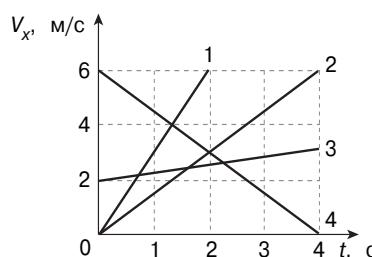


График движения четырёх тел

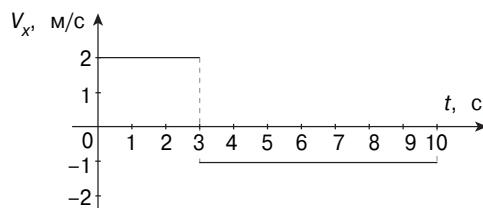
Наибольшее по модулю ускорение имеет тело 1.

- На графике изображена зависимость проекции скорости тела, движущегося вдоль оси Ox , от времени. Чему равен модуль перемещения тела к моменту времени $t = 10$ с?

Решение:

Модуль перемещения тела равен площади фигуры под (над) графиком скорости:

$$s = |2 \text{ м/с} \cdot 3 \text{ с} - 1 \text{ м/с} \cdot 7 \text{ с}| = 1 \text{ м.}$$



Ответ: $s = 1 \text{ м.}$

■ Относительная скорость

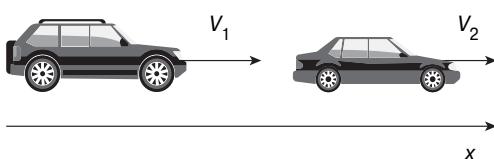
Относительная скорость — скорость одной материальной точки в системе отсчёта, связанной с другой. Относительная скорость равна векторной разности скоростей этих тел:

$$\vec{V}_{21} = \vec{V}_2 - \vec{V}_1.$$

Частные случаи определения относительной скорости

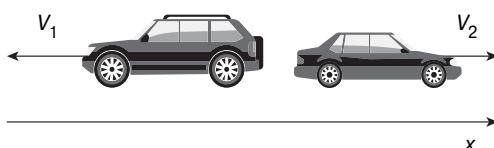
При движении тел в одном направлении модуль относительной скорости равен разности скоростей:

$$V_{21} = V_2 - V_1.$$



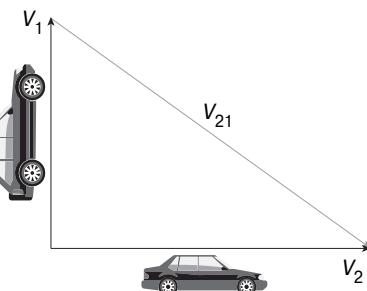
При движении тел в противоположных направлениях они удаляются или сближаются с относительной скоростью, равной сумме их скоростей:

$$V_{21} = V_2 + V_1.$$



При движении под прямым углом относительная скорость вычисляется по теореме Пифагора:

$$V_{21} = \sqrt{V_2^2 + V_1^2}.$$



■ Сложение скоростей

Правило сложения скоростей: скорость тела в неподвижной системе отсчёта \vec{V}_1 равна векторной сумме скорости тела в подвижной системе отсчёта \vec{V}_2 и скорости подвижной системы отсчёта относительно неподвижной \vec{V}_{21} :

$$\vec{V}_1 = \vec{V}_2 + \vec{V}_{21}.$$

✓ Два автомобиля движутся по прямому шоссе: первый — со скоростью v , второй — со скоростью $(-3v)$. Какова скорость второго автомобиля относительно первого?

Решение:

Случай встречного движения:
 $V_{21} = V_2 + V_1 = v + 3v = 4v.$

Ответ: $V_{21} = 4v.$



Практические задания

7 Велосипедист начинает движение из состояния покоя с постоянным ускорением 1 м/с^2 . Какова будет его скорость через 10 с?

■ Дано:

$$v_0 = 0$$

$$a = 1 \text{ м/с}^2$$

$$t = 10 \text{ с}$$

$$v = ?$$

■ Решение:

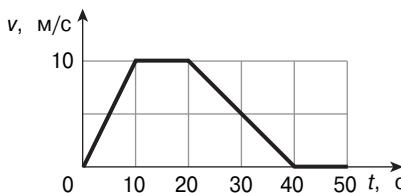
При равноускоренном движении $v = v_0 + a \cdot t = a \cdot t$, при

$v_0 = 0$ получим: $v = a \cdot t$.

$$v = 1 \text{ м/с}^2 \cdot 10 \text{ с} = 10 \text{ м/с.}$$

Ответ: $v = 10 \text{ м/с.}$

8 На рисунке представлен график зависимости модуля скорости v автомобиля от времени t . Определите по графику путь, пройденный автомобилем в интервале времени от 0 до 40 с после начала движения.



■ Решение:

График скорости в интервале времени от 0 до 40 с представляет собой трапецию с основаниями $a = 40 \text{ с}$, $b = 10 \text{ с}$, высотой $h = 10 \text{ м/с}$, площадь которой ($S = \frac{a+b}{2} \cdot h$) будет равна пройденному пути:

$$S = \frac{40 \text{ с} + 10 \text{ с}}{2} \cdot 10 \text{ м/с} = 250 \text{ м.}$$

Ответ: $s = 250 \text{ м.}$

9 Два автомобиля движутся по прямому шоссе в одном направлении. Скорость первого автомобиля относительно земли 120 км/ч, второго — 70 км/ч. Чему равен модуль скорости первого автомобиля в системе отсчёта, связанной со вторым автомобилем?

Дано:

$$v_1 = 120 \text{ км/ч}$$

$$v_2 = 70 \text{ км/ч}$$

$$v_{12} - ?$$

Решение:

При движении тел в одном направлении скорость первого автомобиля относительно второго:

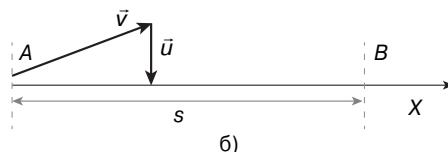
$$v_{12} = v_1 - v_2; v_{12} = 120 \text{ км/ч} - 70 \text{ км/ч} = 50 \text{ км/ч.}$$

Ответ: $v_{12} = 50 \text{ км/ч.}$ **10**

В безветренную погоду самолёт затрачивает на перелёт между городами 6 ч. Если во время полёта дует боковой ветер, то затрачивается на 9 мин больше. Найдите скорость ветра, если скорость самолёта относительно воздуха постоянна и равна 328 км/ч.



a)



б)

Дано:

$$t = 6 \text{ ч}$$

$$v = 328 \text{ км/ч}$$

$$\Delta t = \frac{3}{20} \text{ ч}$$

$$u - ?$$

Решение:

В первом случае (рис. а) расстояние между городами: $s = v \cdot t$.

Во втором случае (рис. б) скорость самолёта относительно земли: $v_3 = \sqrt{v^2 - u^2}$.

Тогда тот же путь самолёт проходит со скоростью v_3 за время $t + \Delta t$: $s = \sqrt{v^2 - u^2} \cdot (t + \Delta t)$.

Приравнивая правые части уравнений, получим:

$$v \cdot t = \sqrt{v^2 - u^2} \cdot (t + \Delta t), \text{ или } \frac{t^2}{(t + \Delta t)^2} = \frac{v^2 - u^2}{v^2};$$

$$1 - \frac{u^2}{v^2} = \frac{t^2}{(t + \Delta t)^2}, \text{ или } \frac{u^2}{v^2} = \frac{(t + \Delta t)^2 - t^2}{(t + \Delta t)^2}, \text{ откуда}$$

$$u = v \cdot \frac{\sqrt{(t + \Delta t)^2 - t^2}}{t + \Delta t} = \frac{v}{t + \Delta t} \cdot \sqrt{\Delta t \cdot (2 \cdot t + \Delta t)}.$$

$$u = \frac{328 \text{ км/ч}}{6 \text{ ч} + \frac{3}{20} \text{ ч}} \cdot \sqrt{\frac{3}{20} \text{ ч} \cdot \left(2 \cdot 6 \text{ ч} + \frac{3}{20} \text{ ч}\right)} = 72 \text{ км/ч} = 20 \text{ м/с.}$$

Ответ: $u = 20 \text{ м/с.}$

УСКОРЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

Ускорение является физической величиной, характеризующей изменение скорости с течением времени.

■ Мгновенное ускорение

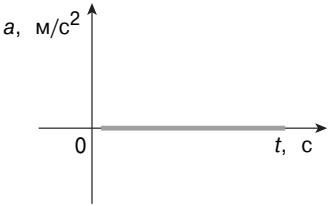
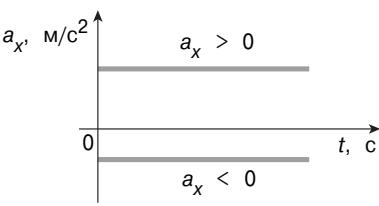
Мгновенное ускорение \vec{a} — векторная физическая величина, равная пределу отношения изменения скорости к промежутку времени, в те-

чение которого это изменение произошло:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t}.$$

Единица ускорения — метр в секунду в квадрате (**м/с²**).

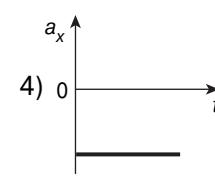
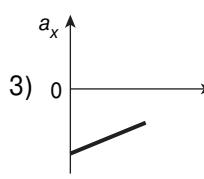
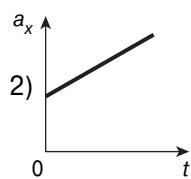
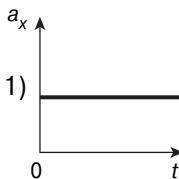
При прямолинейном ускоренном движении тела вектор ускорения параллелен (соправлен) вектору скорости: $\vec{a} \parallel \vec{V}$.

Графики и формулы ускорения	
При равномерном движении	При равнопеременном движении
 $a = 0$	 $a_x = \frac{V_x - V_{0x}}{t}$



Практические задания

- 11 Тело, двигаясь вдоль оси Ox прямолинейно и равноускоренно, за некоторое время уменьшило свою скорость в 2 раза. Какой из графиков зависимости проекции ускорения от времени соответствует такому движению?

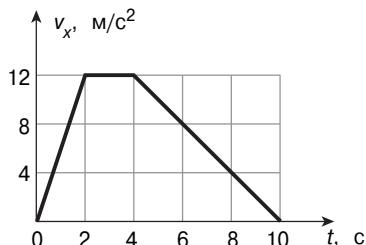


Решение:

Поскольку движение прямолинейно и равноускоренно, а скорость тела уменьшается, то проекция его ускорения постоянна и отрицательна. Этим условиям соответствует график 4.

Ответ: 4.

- 12 На рисунке показан график зависимости скорости тела от времени для проекции v_x . Какова проекция a_x ускорения этого тела в интервале времени от 4 до 8 с?



Дано:

$$v_0 = 12 \text{ м/с}$$

$$v = 4 \text{ м/с}$$

$$t = 4 \text{ с}$$

$$a - ?$$

Решение:

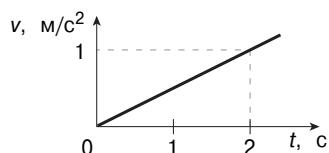
По формуле ускорения равнопеременного движения

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t};$$

$$a_x = \frac{4 \text{ м/с} - 12 \text{ м/с}}{4 \text{ с}} = -2 \text{ м/с}.$$

Ответ: $a_x = -2 \text{ м/с}^2$.

- 13 Бегун начинает двигаться из начала координат вдоль оси Ox , причём проекция скорости v_x меняется с течением времени по закону, приведённому на графике. Чему будет равно ускорение бегуна через 2 с?



Дано:

$$v_0 = 0$$

$$v = 1 \text{ м/с}$$

$$t = 2 \text{ с}$$

$$a - ?$$

Решение:

По графику скорости заметим, что движение является равнопеременным, а значит, ускорение постоянно в любой момент времени и равно:

$$a = \frac{v - v_0}{t}; \quad a = \frac{1 \text{ м/с} - 0}{2 \text{ с}} = 0,5 \text{ м/с}^2.$$

Ответ: $a = 0,5 \text{ м/с}^2$.

РАВНОМЕРНОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ

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

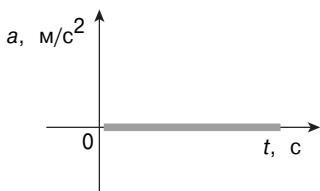


СИ — международная система единиц физических величин, современный вариант метрической системы. Все расчёты в физике ведутся в СИ.

■ Формулы и графики равномерного прямолинейного движения

Ускорение:

$$a = 0.$$



a — ускорение, t — время

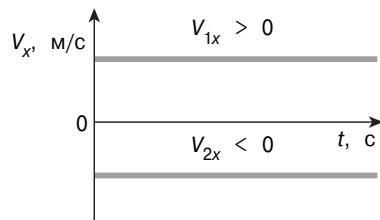
Скорость:

$$v = \frac{S}{t},$$

где S — пройденный путь, t — время движения.

$v_x > 0$, если направление движения совпадает с осью Ox (см. линию V_1);

$v_x < 0$, если направление движения противоположно направлению оси Ox (см. линию V_2).

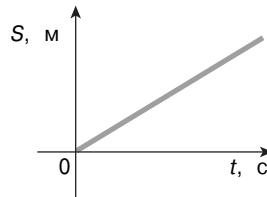


v_x — проекция скорости, t — время

Перемещение:

$$S = v \cdot t,$$

где v — скорость, t — время движения.

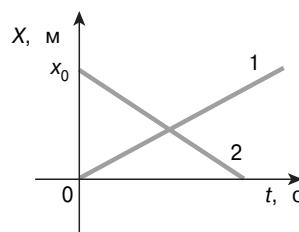


S — пройденный путь, t — время движения

Закон движения:

$$X = x_0 + v_x \cdot t,$$

где x_0 — начальная координата тела, v_x — проекция скорости на ось Ox , t — время движения.



x_0 — начальная координата тела, v_x — проекция скорости на ось Ox , t — время движения

Прямая 1 — график движения тела, выходящего из начала координат и движущегося вдоль оси Ox .

Прямая 2 — график движения тела, находящегося в начальный момент

в точке с координатой x_0 , движущегося противоположно направлению оси Ox и возвращающегося в начало координат.



Практические задания

14

Координата тела меняется с течением времени согласно закону $x = 4 - 2t$, где все величины выражены в СИ. Начертите график движения и график скорости этого движения.

Решение:

Нарисуем график зависимости проекции скорости движения тела от времени.

Сопоставляя коэффициенты в уравнении движения

$$\begin{cases} X = x_0 + V_x t \\ X = 4 - 2t \end{cases}, \text{ имеем } \begin{cases} x_0 = 4 \\ V_x = -2 \text{ м/с} \end{cases}.$$

Для построения графика можно начертить таблицу, как в алгебре.

t	0	2
X	4	0

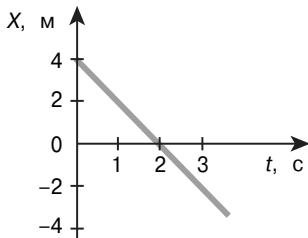


График движения

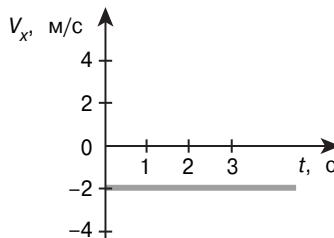
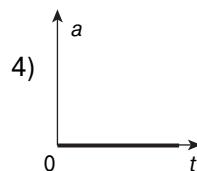
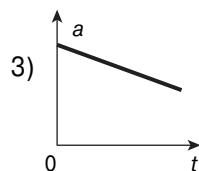
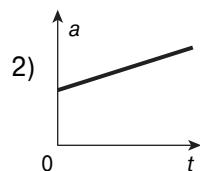
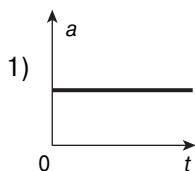


График скорости

Ответ: график движения — убывающая прямая линия $x = 4 - 2t$; график скорости — прямая, параллельная оси t : $v_x = -2$.

15

На рисунках изображены графики зависимости модуля ускорения от времени для разных видов движения. Какой график соответствует равномерному движению?



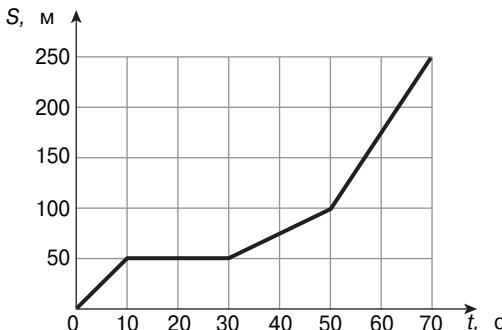
Ответ: 4.

Пояснение:

Поскольку при равномерном движении ускорение равно нулю, то графику равномерного движения соответствует график 4.

16

На рисунке представлен график зависимости пути S велосипедиста от времени t . Определите скорость велосипедиста на каждом промежутке.



Решение:

Определим скорость велосипедиста по формуле скорости равномерного движения $v = \frac{S}{t}$.

$$\text{На промежутке от } 0 \text{ до } 10 \text{ с: } v = \frac{50 \text{ м}}{10 \text{ с}} = 5 \text{ м/с.}$$

На промежутке от 10 до 30 с велосипедист не движется (координата не меняется).

$$\text{На промежутке от } 30 \text{ до } 50 \text{ с: } v = \frac{100 \text{ м} - 50 \text{ м}}{20 \text{ с}} = 2,5 \text{ м/с.}$$

$$\text{На промежутке от } 50 \text{ до } 70 \text{ с: } v = \frac{250 \text{ м} - 100 \text{ м}}{20 \text{ с}} = 7,5 \text{ м/с.}$$

Ответ: 5 м/с; 0 м/с; 2,5 м/с; 7,5 м/с.

РАВНОУСКОРЕННОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Равнопеременное движение — движение, при котором за любые равные промежутки времени материальная точка изменяет свою скорость на одну и ту же величину. При таком движении ускорение материальной точки $a = \text{const}$.

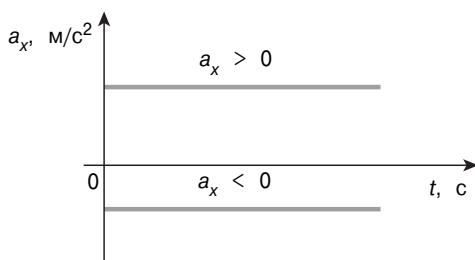
- Примеры равноускоренного движения: ракета при запуске спутника, пуля в стволе автомата, свободно падающее тело.

Формулы и графики равноускоренного прямолинейного движения

Ускорение:

$$a = \frac{v - v_0}{t},$$

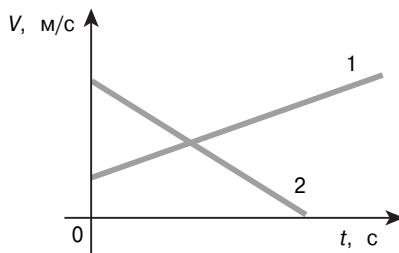
где v_0 и v — начальная и конечная скорости тела, t — время движения.



a_x — проекция ускорения, t — время

Скорость:

$$v = v_0 + a \cdot t.$$



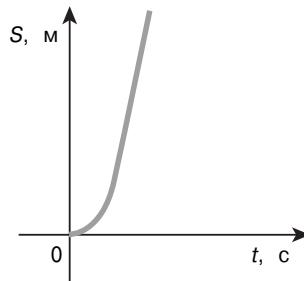
v — скорость, t — время

Тело 1 движется с возрастающей скоростью (разгоняется), тело 2 — с убывающей скоростью (тормозит).

Перемещение:

$$S = v_0 \cdot t + \frac{a \cdot t^2}{2};$$

$$S = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot a}.$$

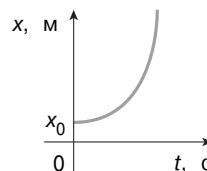


S — проходженый путь (перемещение), t — время

Закон движения:

$$X = x_0 + V_{0x} \cdot t + \frac{a_x \cdot t^2}{2},$$

где x_0 — начальная координата тела, a_x — проекция ускорения на ось Ox , t — время движения, V_{0x} — проекция начальной скорости на ось Ox .



x — координата тела, x_0 — начальная координата, t — время

**Практические задания**

- 17** Зависимость координаты от времени для некоторого тела описывается уравнением $x = 8t - t^2$, где все величины выражены в СИ. В какой момент времени скорость тела равна нулю?

Решение:

Сопоставляя коэффициенты в уравнении движения

$$\begin{cases} X = x_0 + V_{0x} \cdot t + \frac{a_x \cdot t^2}{2}, \\ x = 8t - t^2 \end{cases} \text{ имеем } \begin{cases} x_0 = 0 \\ V_0 = 8 \text{ м/с} \\ \frac{a_x}{2} = -1 \text{ м/с}^2, a_x = -2 \text{ м/с}^2 \end{cases}.$$

По определённым величинам запишем уравнение скорости

$V_x = V_{0x} + a_x \cdot t = 8 - 2 \cdot t$ и приравняем её к нулю (по условию):

$V_x = 8 - 2 \cdot t = 0$, откуда $t = 4$ с.

Ответ: $t = 4$ с.

- 18** Начальная скорость автомобиля, движущегося прямолинейно и равноускоренно, — 5 м/с. Конечная скорость через 10 с равна 25 м/с. Какой путь прошёл автомобиль за это время?

Дано:

$$V_0 = 5 \text{ м/с}$$

$$V = 25 \text{ м/с}$$

$$t = 10 \text{ с}$$

$$l = ?$$

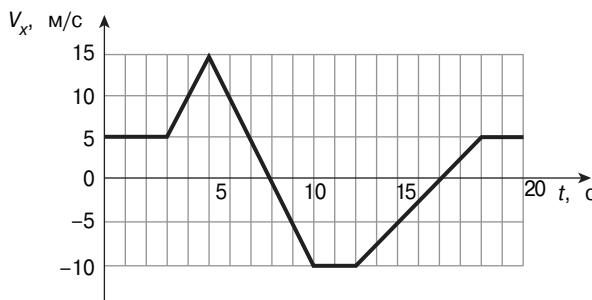
Решение:

$$l = \frac{V^2 - V_0^2}{2 \cdot a}; a = \frac{V - V_0}{t}.$$

$$a = \frac{25 \text{ м/с} - 5 \text{ м/с}}{10 \text{ с}} = 2 \text{ м/с}^2; l = \frac{(25 \text{ м/с})^2 - (5 \text{ м/с})^2}{2 \cdot 2 \text{ м/с}^2} = 150 \text{ м.}$$

Ответ: $l = 150$ м.

- 19** На рисунке приведён график зависимости проекции скорости тела v_x от времени t . Определите путь тела за первые 5 с движения.



Решение:

График скорости в первые 3 с движения представляет собой прямоугольник со сторонами $a=3$ с, $b=5$ м/с, в следующие 2 с — трапецию с основаниями $c=5$ м/с, $d=15$ м/с и высотой $h=2$ с. Сумма площадей этих фигур ($S_1=a\cdot b$, $S_2=\frac{c+d}{2}\cdot h$) будет равна пройденному пути:

$$s=S_1+S_2=a\cdot b+\frac{c+d}{2}\cdot h=3\cdot 5 \text{ м/с} + \frac{5 \text{ м/с} + 15 \text{ м/с}}{2}\cdot 2 \text{ с} = 35 \text{ м.}$$

Ответ: $s = 35$ м.

- 20** За 2 с прямолинейного равноускоренного движения тело прошло 20 м, увеличив свою скорость в 3 раза. Определите начальную скорость тела.

Дано:

$$\Delta t = 2 \text{ с}$$

$$s = 20 \text{ м}$$

$$v = 3v_0$$

$$v_0 - ?$$

Решение:

Выразим ускорение через начальную скорость:

$$a = \frac{v - v_0}{t} = \frac{3v_0 - v_0}{t} = \frac{2v_0}{2 \text{ с}} = v_0 \text{ м/с}^2.$$

Пройденный путь:

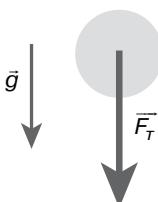
$$s = \frac{v^2 - v_0^2}{2 \cdot a} = \frac{(3v_0)^2 - v_0^2}{2 \cdot v_0} = 4v_0, \text{ откуда } v_0 = \frac{s}{4};$$

$$v_0 = \frac{20}{4} = 5 \text{ м/с.}$$

Ответ: $v_0 = 5$ м/с.

СВОБОДНОЕ ПАДЕНИЕ

Свободное падение — движение, которое совершает тело под действием только силы тяжести, без учёта силы сопротивления.



Векторы силы тяжести \vec{F}_T и ускорения свободного падения \vec{g}

■ Ускорение свободного падения

Все тела независимо от их массы в отсутствие силы сопротивления воздуха падают на Землю с одинаковым ускорением, которое называется **ускорением свободного падения**. Впервые это утверждение экспериментально было доказано Галилео Галилеем.

Идеальное свободное падение возможно лишь в вакууме, где нет силы сопротивления воздуха, и независимо от массы, плотности и формы все тела падают одинаково быстро, то есть в любой момент времени тела имеют одинаковые мгновенные скорости и ускорения.

Ускорение свободного падения:

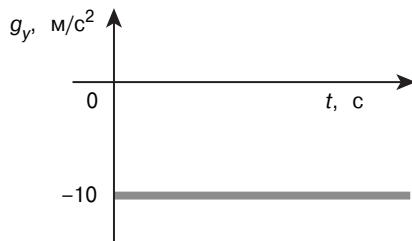
- всегда направлено к центру Земли;
- приблизительно равно $9,81 \text{ м/с}^2$;
- при решении задач, если не требуется высокая точность результата, принимают $g \approx 10 \text{ м/с}^2$.

Поскольку Земля сплюснута на полюсах, то значение ускорения свободного падения на полюсах больше, а на экваторе меньше.

■ Формулы и графики свободного падения

Ускорение:

$$g \approx 9,81 \text{ м/с}^2 \approx 10 \text{ м/с.}$$

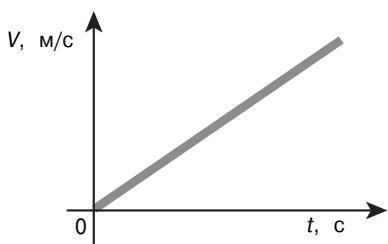


g_y — проекция ускорения свободного падения на ось Oy , t — время движения

Скорость:

$$v = v_0 + g \cdot t,$$

где v_0 и v — начальная и конечная скорости тела, g — ускорение свободного падения, t — время движения.



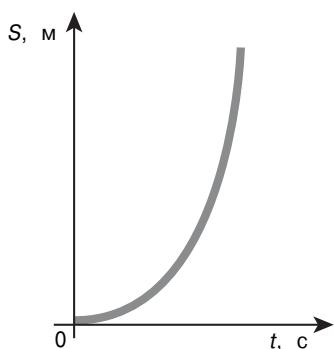
v — скорость тела, t — время

Перемещение:

$$S = \frac{g \cdot t^2}{2},$$

$$S = \frac{v_k^2}{2 \cdot g},$$

где v_k — конечная скорость тела, g — ускорение свободного падения, t — время движения.

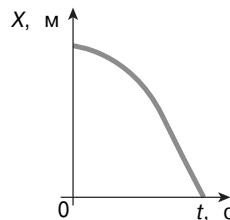


S — пройденный путь (перемещение), t — время

Закон движения:

$$X = x_0 + \frac{g_x \cdot t^2}{2},$$

где x_0 — начальная координата тела, g_x — проекция ускорения свободного падения, t — время движения.



X — координата тела, x_0 — начальная координата, t — время

Ось Ox направлена вертикально вверх.

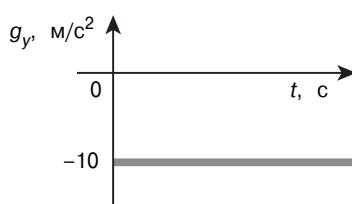
■ Одномерное движение в поле тяжести при наличии начальной скорости

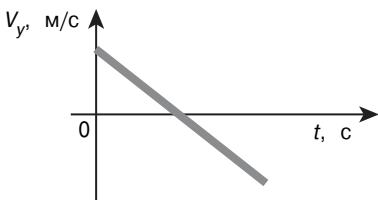
Брошенный вверх мяч вплоть до высшей точки подъёма движется **равнозамедленно**, а вниз — **равноускоренно**. Но в целом его движение является **равнопеременным**, так как при движении и вверх, и вниз его ускорение остаётся постоянным (равным g).

■ Графики и формулы движения в поле тяжести при наличии начальной скорости

Ускорение:

$$g \approx 9,81 \text{ м/с}^2 \approx 10 \text{ м/с}^2.$$



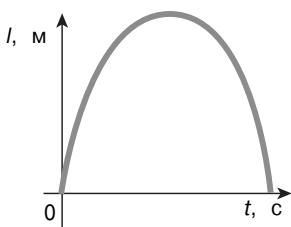
Скорость:при движении вверх $V_y = V_{0y} - g \cdot t$;при движении вниз $V_y = V_{0y} + g \cdot t$.**Перемещение:**

при движении тела вверх

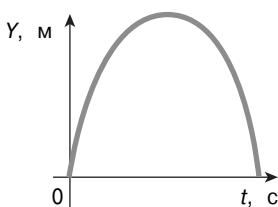
$$S_y = V_{0y} \cdot t - \frac{g \cdot t^2}{2};$$

$$\text{при движении вниз } S_y = V_{0y} \cdot t + \frac{g \cdot t^2}{2};$$

$$\text{на любой половине пути } S_y = \frac{V_0^2}{2 \cdot g}.$$

**Закон движения:**

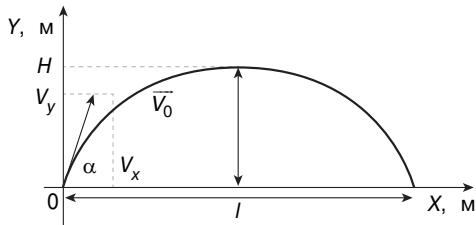
$$Y = y_0 + V_{0y} \cdot t + \frac{g_y \cdot t^2}{2}.$$



■ **Движение тела, брошенного под углом к горизонту**

Движение тела происходит в вертикальной плоскости XY с начальной скоростью v_0 под действием силы тяжести Земли, а значит, с ускорением свободного падения $g \approx 10 \text{ м/с}^2$, направленным вертикально вниз.

В евклидовом физическом пространстве перемещение тела по координатным осям X и Y можно рассматривать независимо.



Траектория движения тела, брошенного под углом к горизонту:

$\overline{V_0}$ — начальная скорость, V_x и V_y — проекции начальной скорости на оси координат, α — угол наклона начальной скорости к оси Ox , I — дальность полёта, H — максимальная высота подъёма



Евклидово пространство — понятие, которое отражает трёхмерное пространство, в котором мы живём, описывается трёхмерной системой координат, строящейся на трёх взаимно перпендикулярных осях: Ox , Oy , Oz .

Разложим движение на две составляющие: горизонтальную и вертикальную.

■ Формулы движения в поле тяжести при наличии начальной скорости

Горизонтальная составляющая

Движение равномерное, так как проекция ускорения на ось Ox равна нулю

Ускорение:

$$g_x = 0$$

Проекция начальной скорости:

$$v_{0x} = v_0 \cdot \cos \alpha,$$

где v_0 — начальная скорость тела, α — угол наклона начальной скорости к оси Ox

Вертикальная составляющая

Движение равнопеременное, так как ускорение параллельно оси Oy

Ускорение:

$$g_y \approx 10 \text{ м/с}^2 = \text{const}$$

Проекция начальной скорости:

$$v_{0y} = v_0 \cdot \sin \alpha,$$

где v_0 — начальная скорость тела, α — угол наклона начальной скорости к оси Oy .

Проекция скорости в верхней точке траектории равна нулю:

$$v_y = v_0 \cdot \sin \alpha - g \cdot t = 0,$$

где g — ускорение свободного падения, t — время движения.

$$\text{Время полёта: } t = \frac{2 \cdot v_0 \cdot \sin \alpha}{g}$$

Дальность полёта:

$$l = v_{0x} \cdot t = v_0 \cdot \cos \alpha \cdot t = \frac{v_0^2 \cdot \sin(2\alpha)}{g}.$$

Дальность полёта максимальна при $\alpha = 45^\circ$

Высота подъёма в силу симметрии движения вверх и вниз может быть определена на второй половине пути:

$$H = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}$$

Закон движения:

$$X = x_0 + v_{0x} \cdot t = x_0 + v_0 \cdot \cos \alpha \cdot t,$$

где x_0 — начальная координата тела

Закон движения:

$$Y = y_0 + v_{0y} \cdot t - \frac{g \cdot t^2}{2} = y_0 + v_0 \times \sin \alpha \cdot t - \frac{g \cdot t^2}{2},$$

где y_0 — начальная координата тела



Практические задания

21 От высокой скалы отколся и стал свободно падать камень. Какую скорость он будет иметь через 3 с от начала падения?

Дано:

$$V_0 = 0 \text{ м/с}$$

$$t = 3 \text{ с}$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$$V = ?$$

Решение:

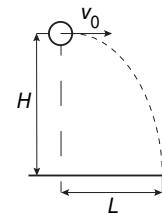
$$V = g \cdot t;$$

$$V = 10 \text{ м/с}^2 \cdot 3 \text{ с} = 30 \text{ м/с.}$$

Ответ: $V = 30 \text{ м/с.}$

22 Шарик, брошенный горизонтально с высоты H с начальной скоростью v_0 , за время полёта t пролетел в горизонтальном направлении расстояние L (см. рисунок). Что произойдёт с дальностью полёта и ускорением шарика, если на той же установке при неизменной начальной скорости шарика уменьшить высоту H ? Сопротивлением воздуха пренебречь. Для каждой величины определите характер её изменения и подберите к каждой букве соответствующую цифру.

- | | |
|---------------------|-----------------|
| A) дальность полёта | 1) увеличится |
| Б) ускорение шарика | 2) уменьшится |
| | 3) не изменится |



Решение:

При уменьшении высоты H уменьшится время полёта в соответствии с формулой:

$$H = \frac{g \cdot t^2}{2}, \text{ а значит, дальность полёта, выраженная формулой}$$

$$L = v_0 \cdot \cos \alpha \cdot t, \text{ тоже уменьшится.}$$

Шарик движется с ускорением свободного падения: $g = 10 \text{ м/с}^2$, которое не изменяется вблизи поверхности земли.

Ответ: А — 2; Б — 3.

23 Тело, свободно падающее с некоторой высоты без начальной скорости, за время $\tau = 1$ с после начала движения проходит путь в $n = 5$ раз меньший, чем за такой же промежуток времени в конце движения. Найдите полное время движения.

Дано:

$$v_0 = 0$$

$$\tau = 1 \text{ с}$$

$$g \approx 10 \text{ м/с}^2$$

$$h^{(n)} = 5 \cdot h^{(\tau)}$$

$$t - ?$$

Решение:

Перемещение за первую секунду падения:

$$h(\tau) = \frac{g \cdot \tau^2}{2}; \quad h(\tau) = \frac{g \cdot (1\text{с})^2}{2} = \frac{g}{2}.$$

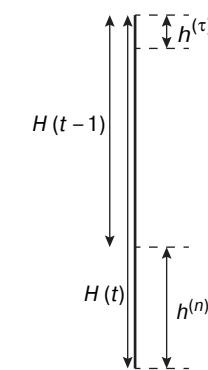
Пусть t — полное время движения. Тогда перемещение за последнюю секунду движения будет определяться разностью путей за последнюю и предпоследнюю секунды (см. рисунок), следовательно:

$$h^{(n)} = H(t) - H(t-1) = \frac{g \cdot t^2}{2} - \frac{g \cdot (t-1)^2}{2} = \frac{g}{2} \cdot (2t - 1).$$

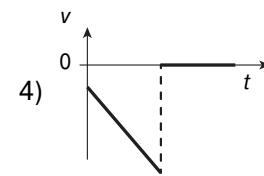
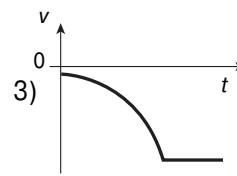
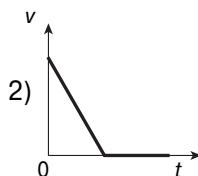
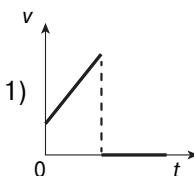
Подставляя полученные выражения в условие $h^{(n)} = 5 \cdot h^{(\tau)}$, имеем:

$$\frac{g}{2} \cdot (2t - 1) = 5 \cdot \frac{g}{2}, \quad \text{или} \quad 2t - 1 = 5, \quad \text{откуда} \\ t = 3 \text{ с.}$$

Ответ: $t = 3$ с.

**24**

Тело, брошенное вертикально вниз с некоторой высоты, через некоторое время упало на землю. Система отсчёта связана с землёй. Какой из приведённых графиков соответствует зависимости от времени для модуля v скорости этого тела? Сопротивлением воздуха пренебречь.



Ответ: 1.

Пояснение:

При падении тела (начальная скорость не равна нулю) его скорость линейно возрастает, а при падении на землю становится равной нулю. Таким условиям соответствует только график 1.

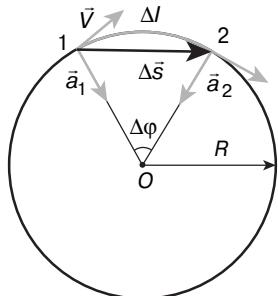
ДВИЖЕНИЕ ТОЧКИ ПО ОКРУЖНОСТИ

Движение по окружности является **периодическим**. Это движение, повторяющееся через равные промежутки времени. Примерами периодического движения являются вращение Земли вокруг Солнца, колебания маятника, колебание струны музыкального инструмента. **Вращательное движение** — движение, при котором все точки тела движутся по окружностям, центры которых лежат на одной прямой, называемой осью вращения.

■ Равномерное движение по окружности, основные характеристики

При равномерном движении по окружности модуль скорости тела остаётся постоянным:

$$|V| = \text{const.}$$



Движение материальной точки по окружности из точки 1 в точку 2:

R — радиус окружности, $\Delta\phi$ — угол поворота, Δl — пройденный путь (длина дуги), Δs — перемещение точки (хорда окружности), \bar{V} — линейная скорость, \bar{a}_1 и \bar{a}_2 — ускорения тела

■ Угловая и линейная скорость точки

Линейная (мгновенная) скорость:

- всегда направлена по касательной к траектории, проведённой к той её точке, где в данный момент находится рассматриваемое физическое тело;
- совпадает по направлению с перемещением за малый промежуток времени.

Единица скорости — метр в секунду (**м/с**).

$$V = \frac{s}{t} = \frac{2\pi \cdot R}{T},$$

где s — линейное перемещение (длина дуги), t — время, за которое это перемещение произошло, R — радиус окружности, T — период вращения.

Угловая скорость ω — физическая величина, равная отношению угла поворота тела к промежутку времени, в течение которого этот поворот произошёл.

Единица угловой скорости — радиан в секунду (**рад/с**).

$$\omega = \frac{\varphi}{t} = \frac{2\pi}{T},$$

где φ — угол поворота при перемещении тела на величину S , T — период вращения.

Связь линейной и угловой скорости:

$$V = \omega \cdot R.$$

Центростремительное ускорение — составляющая ускорения тела, движущегося по криволинейной траектории, направленная перпендикулярно его скорости всегда к центру окружности, характеризует изменение только направления скорости:

$$a = \frac{V^2}{R} = \omega^2 \cdot R.$$

Единица измерения — метр в секунду в квадрате (**м/с²**).

Касательное (тангенциальное) ускорение — составляющая ускорения тела, движущегося по криволинейной траектории, направленная по касательной:

$$a = \frac{\Delta V}{\Delta t} = R \cdot \frac{\Delta \omega}{\Delta t}.$$

Фаза вращения ϕ_0 — угол поворота радиус-вектора в произвольный момент времени относительно его начального положения. Единица измерения — радиан (**рад**).

Период вращения — время одного оборота по окружности.

$$T = \frac{t}{N} = \frac{2\pi \cdot R}{V} = \frac{2\pi}{\omega},$$

где T — время одного оборота по окружности, N — число оборотов за время t .

Частота вращения — число оборотов в единицу времени.

Единица частоты — герц (**Гц**): 1 Гц = 1 с⁻¹.

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{N}{t} = \frac{V}{2\pi \cdot R} = \frac{\omega}{2\pi}.$$

Связь периода и частоты вращения

► С линейной скоростью:

$$V = \frac{2\pi \cdot R}{T} = 2\pi \cdot R \cdot \nu;$$

► с угловой скоростью:

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

► с центростремительным ускорением:

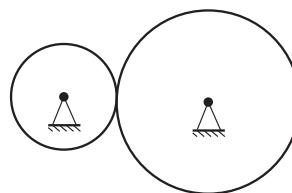
$$a = \frac{4 \cdot \pi^2 R}{T^2} = 4 \cdot \pi^2 \cdot \nu^2 R.$$



Практические задания

25

В механизме две шестерни сцеплены друг с другом и вращаются вокруг неподвижных осей (см. рисунок). Правая шестерня радиусом 10 см делает 20 оборотов за 10 с, а частота обращения левой шестерни равна 5 с⁻¹. Каков радиус левой шестерни? Ответ укажите в сантиметрах.



Дано:

$$R = 0,1 \text{ м}$$

$$N = 20$$

$$t = 10 \text{ с}$$

$$v = 5 \text{ см}^{-1}$$

$$r = ?$$

Решение:

Поскольку шестерни сцеплены друг с другом, то их линейные скорости одинаковы:

$V = v$, где V — скорость правой шестерни, а v — левой.

Линейная скорость связана с частотой или числом колебаний формулой:

$$V = 2\pi \cdot v \cdot R = 2\pi \cdot \frac{N}{t} \cdot R.$$

Подставляя эти формулы в первое равенство, имеем:

$$2\pi \cdot \frac{N}{t} \cdot R = 2\pi \cdot v \cdot r, \text{ откуда } r = \frac{N \cdot R}{v \cdot t}.$$

$$r = \frac{20 \cdot 0,1 \text{ м}}{5 \text{ см}^{-1} \cdot 10 \text{ с}} = 0,04 \text{ м} = 4 \text{ см.}$$

Ответ: $r = 4$ см.

26

Шарик движется по окружности радиусом r со скоростью v . Как изменится его центростремительное ускорение, если радиус окружности увеличить в 3 раза, оставив скорость шарика прежней?

Дано:

$$\frac{r_2}{r_1} = 3$$

$$\frac{v_2}{v_1} = 1$$

$$\frac{a_2}{a_1} = ?$$

Решение:

Ускорение связано с радиусом окружности и линейной скоростью:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1 = \frac{v_1^2}{r_1} \\ a_2 = \frac{v_2^2}{r_2} \end{array} \right.$$

Разделив второе уравнение на первое, получим:

$$\frac{a_2}{a_1} = \frac{v_2^2}{v_1^2} \cdot \frac{r_1}{r_2} = \frac{1}{3}.$$

Ответ: ускорение уменьшится в 3 раза.



ДИНАМИКА

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



ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЁТА

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

Например, летящий теннисный мяч легко остановить или изменить направление его движения, в то же время железнодорожный вагон трудно сдвинуть с места, но если он начнёт двигаться, остановить его будет сложно.

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

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

Принцип инерции: если на тело не действуют внешние силы, то оно сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения.

✓ Мяч, неподвижно лежавший на полу вагона поезда, движущегося относительно земли, покатился назад против хода поезда. Это произошло в результате того, что скорость поезда относительно земли увеличилась.

Но если в вагоне привязать воздушный шарик, то его движение будет противоположно движению мяча, так как шарик будет двигаться в сторону меньшего давления, созданного перемещением потоков воздуха по инерции.

✓ Если систему отсчёта, связанную с землёй, можно рассматривать как инерциальную, то и система отсчёта, связанная с кораблём, плавущим по прямой с постоянной скоростью, или автобусом, движущимся равномерно и прямолинейно, также будет инерциальной.

Инерциальная система отсчёта — система отсчёта, в которой тело, не взаимодействующее с другими телами, сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения.

Системы отсчёта, в которых принцип инерции не выполняется, называют **неинерциальными**.

Понятие инерциальной системы отсчёта является идеализацией, пото-

му что она связана с телом отсчёта, а все тела в природе в большей или меньшей степени взаимодействуют друг с другом.

✓ При резком торможении автобуса пассажира отбрасывает вперёд, в сторону движения. Следовательно, скорость пассажира относительно автобуса изменяется в отсутствие внешних сил. Система отсчёта, связанная с автобусом, является неинерциальной.

ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Формулировка 1. Материальная точка (тело) сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока воздействие со стороны других тел не заставит её (его) изменить это состояние.

Формулировка 2. Существуют инерциальные системы отсчёта, в которых все тела в отсутствие внешних воздействий движутся прямолинейно и равномерно.

Тело движется прямолинейно и равномерно, так как все действующие на него силы скомпенсированы.

Во Вселенной практически невозможно найти тело, не испытывающее внешние воздействия, и не посредственно экспериментально подтвердить первый закон Ньютона. Следует помнить, что при равно-

мерном движении равнодействующая сил и ускорение равны нулю, значит, графики этих величин совпадают с направлением оси Ox .

✓ Рассмотрим случаи движения планет вокруг Солнца, ракеты в космическом пространстве, электронов в трубе кинескопа телевизора, электронов в атоме.

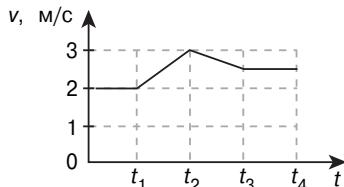
Законы Ньютона нельзя применять при расчёте движения электронов в атоме, так как в этом случае электроны движутся по окружности, то есть движение равноускоренное и систему нельзя считать инерциальной; в остальных случаях тела движутся прямолинейно и равномерно, а значит, подчиняются первому закону Ньютона.



Практические задания

27 На рисунке изображён график зависимости модуля скорости вагона от времени в инерциальной системе отсчёта. В течение каких промежутков времени суммарная сила, действующая на вагон со стороны других тел, равнялась нулю, если вагон двигался прямолинейно?

- 1) $0-t_1, t_3-t_4$
- 2) t_1-t_2, t_2-t_3
- 3) $0-t_4$
- 4) таких промежутков времени нет



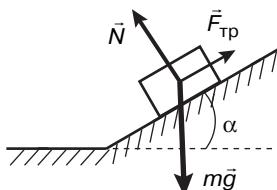
Решение:

По первому закону Ньютона если суммарная сила, действующая на тело со стороны других тел, равна нулю, то тело движется равномерно и прямолинейно. Равномерному движению соответствуют участки $0-t_1$ и t_3-t_4 , где скорость постоянна.

Ответ: 1.

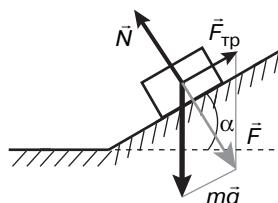
28 Тело массой m скользит по шероховатой наклонной опоре с углом α к горизонту (см. рисунок). На него действуют три силы: сила тяжести $m\vec{g}$, сила упругости опоры \vec{N} и сила трения $\vec{F}_{\text{тр}}$. Если скорость тела не меняется, то модуль равнодействующей сил $\vec{F}_{\text{тр}}$ и $m\vec{g}$ равен

- 1) $N \cos \alpha$
- 2) N
- 3) $N \sin \alpha$
- 4) $mg + F_{\text{тр}}$



Решение:

По первому закону Ньютона равнодействующая сил $\vec{F}_{\text{тр}}$ и $m\vec{g}$ есть \vec{F} (см. рисунок), равная по модулю и противоположная по направлению силе упругости опоры \vec{N} .



Ответ: 2.

ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ГАЛИЛЕЯ

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

отсчёта равноправны. Это положение было впервые установлено итальянским учёным Г. Галилеем в 1636 г.

Принцип относительности Галилея: во всех инерциальных системах отсчёта законы классической динамики **имеют один и тот же вид**.



Практические задания

29

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

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

30

Нельзя установить, движется или покоятся лаборатория относительно какой-либо инерциальной системы отсчёта, на основании наблюдений, проведённых в лаборатории

- 1) только оптических явлений
- 2) только электрических явлений
- 3) только механических явлений
- 4) любых физических явлений

Решение:

Если лаборатория считается инерциальной системой отсчёта, то она может либо покояться, либо двигаться равномерно и прямолинейно, а согласно принципу относительности Галилея данное утверждение применимо ко всем физическим явлениям.

Ответ: 4.

МАССА ТЕЛА

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

Единица измерения массы — килограмм (**кг**).

Гравитационную (инертную) массу m_1 (или m_2) определяют сравнением её с массой эталонного тела — цилиндра, изготовленного из платино-иридиевого сплава, масса которого принята за 1 кг. Процесс сравнения масс на простых рычажных весах называется взвешиванием.

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

✓ Тело на левой чаше весов оказалось уравновешенным, когда на правую чашу положили гири массой 20 г, 1 г, 500 мг, 10 мг. Какова масса взвешиваемого тела?

Ответ: масса взвешиваемого тела $m = 20 \text{ г} + 1 \text{ г} + 500 \text{ мг} + 10 \text{ мг} = 21 \text{ г } 510 \text{ мг}$.

✓ Лодка в момент прыжка мальчика на берег отходит назад почти с такой же скоростью, с какой прыгает мальчик. Что можно сказать о массах лодки и мальчика?

Ответ: поскольку после взаимодействия скорости лодки и мальчика остались одинаковыми, можно сказать, что масса лодки примерно равна массе мальчика.

ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВА

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

$$\rho_{\text{воды}} = 1000 \text{ кг/м}^3, \rho_{\text{льда}} = 900 \text{ кг/м}^3.$$

Поэтому лёд плавает на поверхности воды. Плотность льда меньше за счёт содержания между молекулами льда молекул воздуха.

Плотность ρ — физическая величина, определяемая для однородного вещества массой его единичного объёма:

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

где V — объём тела.

Единица измерения плотности — килограмм на метр в кубе (**кг/м³**).



Практические задания

31 При определении плотности вещества ученик измерил массу образца на очень точных электронных весах: $m = 90,00\text{ г}$. Объём был измерен с использованием мерного цилиндра: $V = (30 \pm 0,1)\text{ см}^3$. На основе этих измерений можно сказать, что плотность, вероятнее всего, составляет

- | | |
|---|--------------------------------------|
| 1) $2,9\text{ г}/\text{см}^3 \leq \rho \leq 3,1\text{ г}/\text{см}^3$ | 3) $\rho < 2,9\text{ г}/\text{см}^3$ |
| 2) $\rho = 3,0\text{ г}/\text{см}^3$ | 4) $\rho > 3,1\text{ г}/\text{см}^3$ |

Дано:

$$\begin{aligned} m &= 90,00\text{ г} \\ V &= (30 \pm 0,1)\text{ см}^3 \\ \rho - ? \end{aligned}$$

Решение:

По формуле плотности

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad \rho = \frac{90,00\text{ г}}{30\text{ см}^3} = 3\text{ г}/\text{см}^3.$$

Масса и объём даны с учётом погрешности:

$\Delta m = 0,01\text{ г}$, $\Delta V = 0,1\text{ см}^3$, поэтому следует учитывать, что при умножении и делении величин погрешности складываются, то есть $\Delta\rho = (3 \pm 0,1)\text{ г}/\text{см}^3$, или $2,9\text{ г}/\text{см}^3 \leq \rho \leq 3,1\text{ г}/\text{см}^3$.

Ответ: 1.

32 Необходимо собрать экспериментальную установку, с помощью которой можно определить плотность алюминия. Для этого школьник взял стакан с водой и алюминиевый шарик. Какие две позиции из представленного ниже перечня оборудования необходимо дополнительно использовать для проведения этого эксперимента?

- | | | |
|---------------------|--------------|------------|
| 1) электронные весы | 3) линейка | 5) пружина |
| 2) мензурка | 4) термометр | |

Решение:

В соответствии с формулой для определения плотности необходимо знать массу и объём вещества: $\rho = \frac{m}{V}$.

Массу определяют с помощью весов, а объём можно измерить мензуркой.

Ответ: 1, 2.

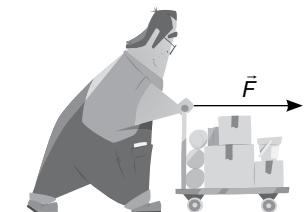
СИЛА

Сила — количественная мера воздействия одного тела на другое.

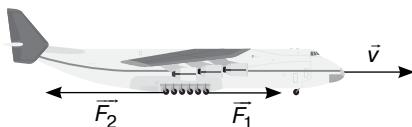
Проявление воздействия меняется в зависимости:

- от значения силы;
- направления её действия;
- точки приложения.

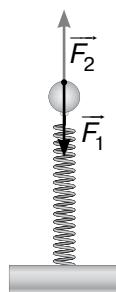
Сила — **векторная** величина.



а) \vec{F} — сила тяги рабочего



б) \vec{F}_1 — сила тяги двигателя, \vec{F}_2 — сила сопротивления воздуха, \vec{v} — скорость самолёта



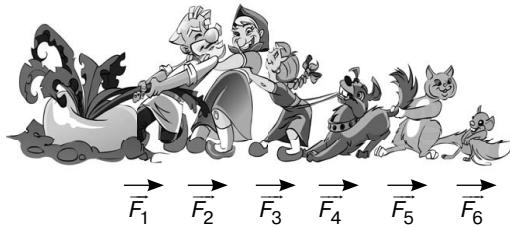
в) \vec{F}_1 — сила тяжести, \vec{F}_2 — сила упругости пружины

■ Вектор и обозначение силы

Единица измерения силы — ньютон (**Н**).

При воздействии других тел на движущееся тело его скорость может изменяться **не только по модулю**, но и **по направлению**.

Физическая природа взаимодействий может быть различной. Воздействие других тел на рассматриваемое изображается векторами, число которых равно числу воздействующих тел.



Воздействие на тело нескольких тел:

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

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

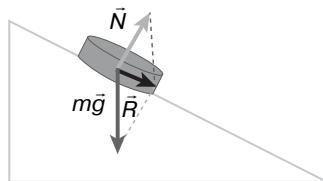
Равнодействующая нескольких сил — сила, эквивалентная данной системе сил, то есть сила, вызывающая такое же механическое воздействие на рассматриваемое тело, что и система сил.

Результат равнодействующей силы определил И. А. Крылов в басне «Лебедь, рак и щука»: «А воз и ныне там!», то есть равнодействующая сила персонажей басни эквивалентна отсутствию действия.

■ Принцип суперпозиции сил

Равнодействующая сила равна **векторной сумме всех сил**, приложенных к материальной точке.

Равнодействующая сила находится по правилу параллелограмма (см. рисунок).



Равнодействующая сила:

$m\bar{g}$ — сила тяжести, \bar{N} — сила реакции опоры, $\bar{R} = m\bar{g} + \bar{N}$ — равнодействующая этих сил



Практические задания

- 33 На тело, находящееся на горизонтальной плоскости, действуют три горизонтальные силы (рис. а). Каков модуль равнодействующей этих сил, если $F_1 = 1$ Н? Ответ округлите до десятых.

Решение:

Сначала найдём равнодействующую сил, направленных вдоль одной прямой, — \vec{F}_1 и \vec{F}_3 .

Из рисунка б видно, что её величина равна:

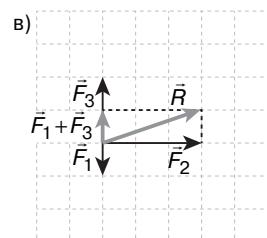
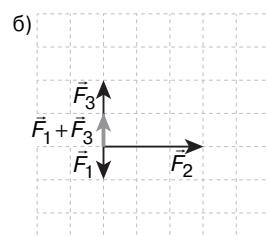
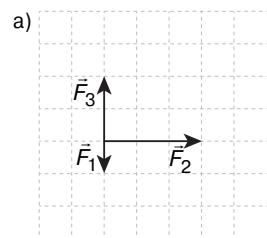
$$|\vec{F}_1 + \vec{F}_3| = 1 \text{ Н.}$$

Равнодействующей сил $\vec{F}_1 + \vec{F}_3$ и \vec{F}_2 будет гипотенуза прямоугольного треугольника (рис. в).

Её величина равна:

$$|\vec{R}| = \sqrt{(|\vec{F}_1 + \vec{F}_3|)^2 + (|\vec{F}_2|)^2} = \sqrt{(1 \text{ Н})^2 + (3 \text{ Н})^2} = \sqrt{10 \text{ Н}^2} \approx 3,2 \text{ Н.}$$

Ответ: $R = 3,2$ Н.



34

Ученик измерял силу тяжести, действующую на груз. Показания динамометра приведены на рисунке. Погрешность измерения равна цене деления динамометра. Запишите показания динамометра.

Решение:

Цена деления прибора равна отношению первого значения шкалы F от нуля к числу делений N между этими значениями:

$$C = \frac{F}{N} = \frac{1\text{H}}{10} = 0,1\text{H}.$$

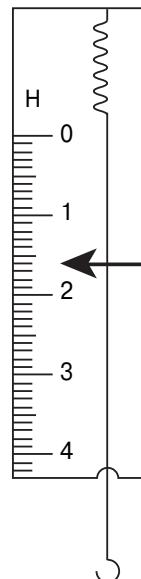
При данном условии погрешность измерения равна цене деления динамометра.

Показание динамометра: $F = 1,6\text{H}$.

С учётом погрешности показания динамометра следует записать в виде:

$$F = (1,6 \pm 0,1)\text{H}, \text{ или } 1,5\text{H} \leq F \leq 1,7\text{H}.$$

Ответ: $(1,6 \pm 0,1)\text{H}$.



ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Формулировка 1. В инерциальной системе отсчёта ускорение тела прямо пропорционально векторной сумме всех действующих на тело сил и обратно пропорционально массе тела:

$$\vec{a} = \frac{\sum \vec{F}}{m} = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n}{m},$$

где \vec{a} — ускорение тела, $\sum \vec{F}$ —

равнодействующая сил $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3 \dots \vec{F}_n$, действующих на тело, m — масса тела.

Формулировка 2. Произведение массы тела и его ускорения равно векторной сумме всех действующих на него сил:

$$m \cdot \vec{a} = \sum \vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n.$$

На тело массой m действует равнодействующая сила F . Какую величину можно определить по этим данным?

Ответ: по второму закону Ньютона можно определить ускорение тела

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

Формулировка 3. Импульс силы равен изменению импульса тела:

$$\sum \vec{F} \cdot t = \Delta p = m \cdot \Delta v,$$

где $\sum \vec{F}$ — равнодействующая сил $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3 \dots \vec{F}_n$, действующих на тело, t — время действия силы, $\Delta p = m \cdot \Delta v = m \cdot (\vec{v}_2 - \vec{v}_1)$ — изменение импульса тела (см. раздел «Импульс материальной точки», с. 88).

Какие из величин (скорость, сила, ускорение, перемещение) при механическом движении всегда совпадают по направлению?

Ответ: согласно второму закону Ньютона, по направлению совпадают сила и ускорение.



Практические задания

35 Автомобиль массой 500 кг, разгоняясь с места равноускоренно, достиг скорости 20 м/с за 10 с. Найдите равнодействующую всех сил, действующих на автомобиль.

Дано:

$$\begin{aligned} m &= 500 \text{ кг} \\ v_0 &= 0 \\ v &= 20 \text{ м/с} \\ t &= 10 \text{ с} \\ F &- ? \end{aligned}$$

Решение:

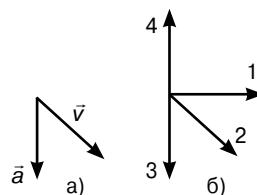
Используем формулировку 3 для вычисления равнодействующей всех сил:

$$\begin{aligned} \vec{F} \cdot t &= m \cdot \Delta \vec{v} = m \cdot (v - v_0), \text{ откуда } F = \frac{m \cdot (v - v_0)}{t} \\ F &= \frac{500 \text{ кг} \cdot (20 \text{ м/с} - 0)}{10 \text{ с}} = 1000 \text{ Н.} \end{aligned}$$

Ответ: $F = 1000$ Н.

36 На рисунке а представлены направления векторов скорости \vec{v} и ускорения \vec{a} мяча в инерциальной системе отсчёта. Какое из представленных на рисунке б направлений имеет вектор равнодействующей всех сил \vec{F} , приложенных к мячу?

- | | |
|------|------|
| 1) 1 | 3) 3 |
| 2) 2 | 4) 4 |



Решение:

По второму закону Ньютона вектор равнодействующей всех сил \vec{F} , приложенных к мячу, сонаправлен вектору ускорения.

Ответ: 3.

- 37** В инерциальной системе отсчёта некоторая сила сообщает телу массой 8 кг ускорение 5 м/с². Какое ускорение в той же системе отсчёта сообщит та же сила телу массой 5 кг?

Дано:

$$\begin{aligned}m_1 &= 8 \text{ кг} \\a_1 &= 5 \text{ м/с}^2 \\F_1 = F_2 &= F \\m_2 &= 5 \text{ кг} \\a_2 - ?\end{aligned}$$

Решение:

По второму закону Ньютона

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

Отсюда:

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

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

Ответ: $a_2 = 8 \text{ м/с}^2$.

ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА ДЛЯ МАТЕРИАЛЬНЫХ ТОЧЕК

Третий закон Ньютона. Силы, с которыми два тела действуют друг на друга, равны по модулю, противоположны по направлению и действуют вдоль прямой, соединяющей эти тела:

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



Равенство сил действия и противодействия при столкновении двух одинаковых шаров:
 \vec{F}_{12} — сила, действующая со стороны второго шара на первый;
 \vec{F}_{21} — сила, действующая со стороны первого шара на второй

Формулировка Ньютона: «Любому действию всегда препятствует равное и противоположное противодействие». Этот закон применим не только для механики. Например, электрические шарики притягиваются с равными по модулю и противоположными по направлению силами.

✓ Земля притягивает к себе подброшенный камень с силой 8 Н. С какой силой этот камень притягивает к себе Землю?

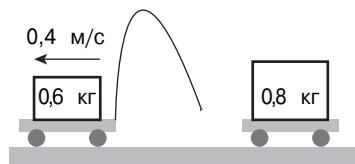
Ответ: согласно третьему закону Ньютона, камень притягивает к себе Землю с такой же силой — 8 Н.



Практические задания

38

После пережигания соединяющей нити первая тележка, масса которой равна 0,6 кг, стала двигаться со скоростью 0,4 м/с (см. рисунок). С какой по модулю скоростью начала двигаться вторая тележка, масса которой равна 0,8 кг?

Дано:

$$m_1 = 0,6 \text{ кг}$$

$$v_1 = 0,4 \text{ м/с}$$

$$m_2 = 0,8 \text{ кг}$$

$$v_2 = ?$$

Решение:

По третьему закону Ньютона $F_1 = F_2$ ($\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$), где \vec{F}_1 — сила, действующая на первую тележку со стороны второй, \vec{F}_2 — сила, действующая со стороны первой тележки на вторую, причём по второму закону Ньютона $F_1 = m_1 \cdot a_1$, $F_2 = m_2 \cdot a_2$.

Тогда

$$m_1 \cdot a_1 = m_2 \cdot a_2, \text{ или } m_1 \cdot \frac{v_1 - v_{10}}{t} = m_2 \cdot \frac{v_2 - v_{20}}{t},$$

где $v_{10} = v_{20} = 0$ — начальные скорости тележек.

Тогда

$$m_1 \cdot v_1 = m_2 \cdot v_2, \text{ откуда } v_2 = \frac{m_1}{m_2} \cdot v_1.$$

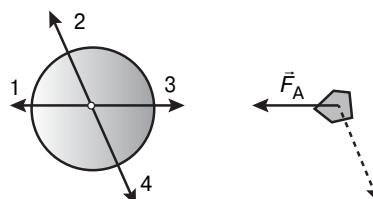
$$v_2 = \frac{0,6 \text{ кг}}{0,8 \text{ кг}} \cdot 0,4 \text{ м/с} = 0,3 \text{ м/с.}$$

Ответ: $v_2 = 0,3 \text{ м/с.}$

39

Мимо Земли летит астероид в направлении, обозначенном на рисунке пунктирной стрелкой. Вектор \vec{F}_A показывает силу притяжения астероида Землёй. Вдоль какой стрелки (1, 2, 3 или 4) направлена сила, действующая на Землю со стороны астероида?

- 1) вдоль стрелки 1
- 2) вдоль стрелки 2
- 3) вдоль стрелки 3
- 4) вдоль стрелки 4

**Решение:**

По третьему закону Ньютона сила, действующая на Землю со стороны астероида, противоположна по направлению и равна по модулю силе притяжения астероида Землёй.

Ответ: 3.**40**

Кубик массой $m=1 \text{ кг}$, сжатый с боков пружинами (см. рисунок), поконится на гладком горизонтальном столе. Первая пружина сжата на 4 см, вторая — на 3 см. Жёсткость первой пружины $k_1=600 \text{ Н/м}$. Чему равна жёсткость второй пружины k_2 ?

Дано:

$$\begin{aligned}m &= 1 \text{ кг} \\x_1 &= 0,04 \text{ м} \\x_2 &= 0,03 \text{ м} \\k_1 &= 600 \text{ Н/м}\end{aligned}$$

$$k_2 = ?$$

Решение:

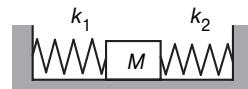
По третьему закону Ньютона

$$F_1 = F_{\text{тр}}, \quad F_{\text{тр}} = F_2,$$

где F_1 — сила упругости со стороны первой пружины, $F_{\text{тр}}$ — сила трения, действующая на тело, F_2 — сила упругости со стороны второй пружины. Значит, $F_1 = F_2$, или по закону Гука $k_1 \cdot x_1 = k_2 \cdot x_2$, откуда

$$k_2 = k_1 \cdot \frac{x_1}{x_2}.$$

$$k_2 = 600 \frac{\text{Н}}{\text{м}} \cdot \frac{0,04 \text{ м}}{0,03 \text{ м}} = 800 \text{ Н/м}.$$

**Ответ:** $k_2 = 800 \text{ Н/м}$.

ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

Слово «гравитация» происходит от латинского слова *gravitas* — вес, тяжесть. Свободное падение тел на Землю объясняется наличием их притяжения к Земле. Закон был открыт И. Ньютоном в 1666 г.

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

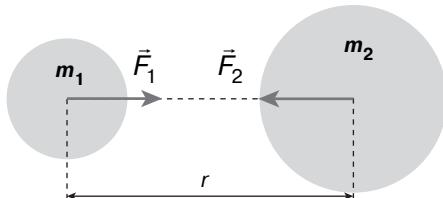
$$F_g = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2},$$

где $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{кг}^2}$ — гравитационная постоянная (коэффициент пропорциональности, одинаковый для всех тел), m_1 и m_2 — массы взаимодействующих тел, r — расстояние между ними.

Гравитационная постоянная численно равна силе гравитационного притяжения двух тел массой по 1 кг каждое, находящихся на расстоянии 1 м одно от другого.



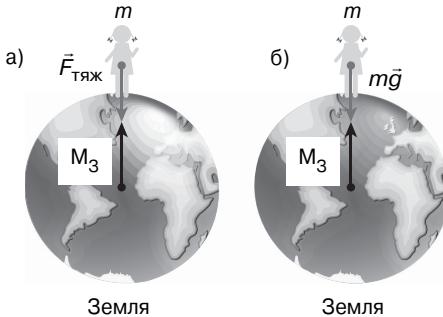
Действие гравитационных сил становится заметным лишь при очень больших массах — порядка 10^6 кг. Именно эти силы удерживают планеты на своих орбитах при движении вокруг Солнца.



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

■ Сила тяжести

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



$\vec{F}_{\text{тяж}}$ — сила тяжести, m — масса тела, M_3 — масса Земли:

- сила тяжести, действующая на тело массой m со стороны планеты Земля;
- силу тяжести принято обозначать формулой $m\bar{g}$



В обозначении силы тяжести (см. рисунок б) знак вектора (стрелку) следует ставить только над векторной величиной — ускорением.

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

$$F_{\text{тяж}} = m \cdot \left(G \cdot \frac{M_3}{R_3^2} \right) = m \cdot g,$$

где m — масса тела,

$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{Н} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{кг}^2}$ — гравитационная постоянная, $M_3 \approx 6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$ — масса Земли, $R_3 \approx 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}$ — радиус Земли, $g \approx G \cdot \frac{M_3}{R_3^2} \approx 6,67 \times$

$$\times 10^{-11} \text{Н} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{кг}^2} \cdot \frac{6 \cdot 10^{24} \text{ кг}}{(6,4 \cdot 10^6 \text{ м})^2} \approx 9,8 \text{ м/с}^2$$

ускорение свободного падения.

✓ Спортсмен совершает прыжок с шестом. Сила тяжести действует на спортсмена:

- 1) только когда он разбегается;
- 2) только когда он сгибает шест в начале прыжка;
- 3) только когда он падает вниз после преодоления планки;
- 4) во всех трёх случаях.

Ответ: 4.



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

■ Зависимость силы тяжести от высоты H над поверхностью планеты радиусом R_0

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

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

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

где $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{Н} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{кг}^2}$ — гравитационная постоянная, m — масса тела, M_3 — масса планеты Земля, R_0 — радиус Земли, $g \approx G \times \frac{M_3}{(R_0 + h)^2}$ — ускорение свободного падения на расстоянии h от поверхности Земли.



Практические задания

41

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

Дано:

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

$$\alpha = 60^\circ$$

$$v = 20 \text{ м/с}$$

$$g \approx 10 \text{ м/с}^2$$

$$F_{\text{тяж}} — ?$$

Решение:

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

$$F_{\text{тяж}} = m \cdot g.$$

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

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

- 42** Искусственный спутник обращается по круговой орбите на высоте 600 км от поверхности планеты. Радиус планеты равен 3400 км, ускорение свободного падения на поверхности планеты равно 4 м/с^2 . Найдите ускорение свободного падения на указанной высоте.

Дано:

$$h = 600 \text{ км} = 6 \cdot 10^5 \text{ м}$$

$$R_0 = 3400 \text{ км} = 3,4 \cdot 10^6 \text{ м}$$

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{кг}^2}$$

$$g \approx 4 \text{ м/с}^2$$

$$g — ?$$

Решение:

Ускорение свободного падения, с которым движется тело вблизи поверхности планеты массой M и радиусом R_0 , равно:

$$g_0 = G \cdot \frac{M}{R_0^2}.$$

Ускорение свободного падения, с которым движется тело на высоте h над поверхностью планеты:

$$g = G \cdot \frac{M}{(R_0 + h)^2}.$$

Разделив второе уравнение на первое, получим:

$$\frac{g}{g_0} = \left(\frac{R_0}{R_0 + h} \right)^2, \text{ откуда } g = \left(\frac{R_0}{R_0 + h} \right)^2 \cdot g_0.$$

$$g = \left(\frac{3,4 \cdot 10^6 \text{ м}}{3,4 \cdot 10^6 \text{ м} + 6 \cdot 10^5 \text{ м}} \right)^2 \cdot 4 \text{ м/с}^2 = 2,89 \text{ м/с}^2.$$

Ответ: $g = 2,89 \text{ м/с}^2$.

ДВИЖЕНИЕ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

Все тела, брошенные с поверхности Земли с некоторой начальной скоростью, падают на Землю вследствие притяжения к Земле. Но при этом планеты не падают на Солнце, а спутники не падают на планеты. Тело становится **спутником** (обращается по траектории, близкой к круговой), если центростремительное ускорение тела равно ускорению свободного падения на планете, то есть

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

откуда $v = \sqrt{g \cdot R_0}$,

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

■ Первая космическая скорость

Первая космическая (круговая) скорость — минимальная скорость, которую надо сообщить телу у поверхности Земли (или небесного тела), чтобы тело могло двигаться вокруг Земли (или небесного тела) по круговой орбите.

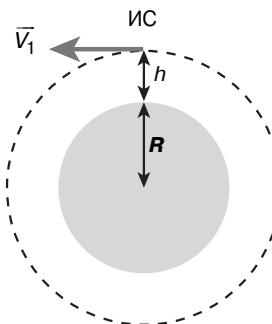
Для планеты Земля первая космическая скорость равна:

$$v_1 = \sqrt{g \cdot R_3} = \sqrt{9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}} = \\ = 7900 \text{ м/с} = 7,9 \text{ км/с},$$

где $R_3 \approx 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}$ — радиус Земли, $g \approx 9,8 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения.

С увеличением высоты орбиты круговая скорость уменьшается.

С увеличением скорости изменяется траектория движения спутника.

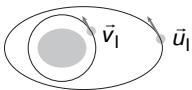
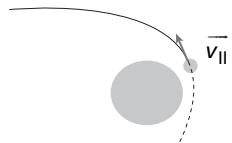
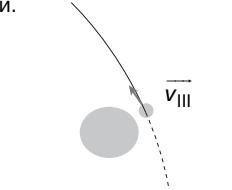


Движение искусственного спутника вблизи планеты:

v_1 — скорость искусственного спутника, ИС — искусственный спутник, R — радиус планеты, h — высота над поверхностью планеты



Средняя скорость движения Земли по орбите вокруг Солнца равна 108 000 км/ч, а средняя скорость движения Солнца по своей орбите составляет 782 000 км/ч. Смена времён года объясняется углом наклона земной оси к направлению движения, а не изменением расстояния до Солнца, так как именно постоянство наклона Земли к плоскости своей орбиты обеспечивает различную освещённость участков Земли при движении вокруг светила.

Зависимость траектории спутника от скорости его движения	
Скорость спутника	Траектория спутника
Первая космическая скорость: $v_I = 7,9 \text{ км/с}$. Чем больше скорость спутника, тем более вытянута траектория (эллипс)	Окружность или эллипс (траектория, близкая к окружности).  \vec{v}_I и \vec{u}_I — первые космические скорости разных тел, причём $v_I < u_I$
Вторая космическая скорость — минимальная скорость, которую надо сообщить телу у поверхности Земли (или небесного тела) для того, чтобы оно преодолело гравитационное притяжение Земли (или небесного тела). При такой скорости тело способно удалиться от Земли на бесконечно большое расстояние. Вторая космическая скорость: $v_{II} = \sqrt{2 \cdot g \cdot R_0} = 11\,200 \text{ м/с} = 11,2 \text{ км/с}$	Парабола  \vec{v}_{II} — вторая космическая скорость
Третья космическая скорость — минимальная скорость, которую надо сообщить телу у поверхности Земли для того, чтобы оно преодолело гравитационное притяжение Солнца. При такой скорости тело способно вырваться за пределы Солнечной системы. Третья космическая скорость: $v_{III} = 16\,700 \text{ м/с} = 16,7 \text{ км/с}$	Гипербола приближается к прямой линии.  \vec{v}_{III} — третья космическая скорость



Практические задания

43

В результате перехода с одной круговой орбиты на другую скорость движения искусственного спутника Земли увеличивается. Как изменяются в результате этого перехода радиус орбиты спутника и его центростремительное ускорение? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения и подберите к каждой букве соответствующую цифру.

- | | |
|----------------------------------|------------------|
| A) радиус орбиты | 1) увеличивается |
| B) центростремительное ускорение | 2) уменьшается |
| | 3) не изменяется |

Решение:

Имеем: при вращательном движении скорость движения тела увеличивается: $v \uparrow$.

Центро斯特ремительное ускорение связано с линейной скоростью формулой: $a = \frac{v^2}{R}$.

Следует учесть, что по условию радиус вращения также изменяется, при этом связь между радиусом и ускорением, сообщаемым спутнику силой притяжения: $a = g = G \frac{m}{R^2} \sim \frac{k}{R^2}$ (G — гравитационная постоянная, m — масса спутника), то есть ускорение обратно пропорционально квадрату радиуса.

Объединяя условия, выявим связь скорости с радиусом: $\frac{v^2}{R} \sim \frac{k}{R^2}$, откуда: $v \sim \frac{k}{\sqrt{R}}$.

При увеличении скорости движения искусственного спутника радиус орбиты уменьшается.

Тогда ускорение $a = \frac{v^2}{R} \sim \frac{k^2}{R \cdot R} \sim \frac{k^2}{R^2}$ увеличивается.

Ответ: А — 2; Б — 1.

44

Искусственный спутник обращается по круговой орбите на высоте 600 км от поверхности планеты. Радиус планеты равен 3400 км, ускорение свободного падения на поверхности планеты равно 4 м/с^2 . Какова скорость движения спутника по орбите?

Дано:

$$h = 600 \text{ км} = 6 \cdot 10^5 \text{ м}$$

$$R_0 = 3400 \text{ км} = 3,4 \cdot 10^6 \text{ м}$$

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{кг}^2}$$

$$g_0 \approx 4 \text{ м/с}^2$$

$$v = ?$$

Решение:

Скорость спутника на высоте h над поверхностью планеты:

$$v = \sqrt{g \cdot (R_0 + h)}$$

Ускорение свободного падения обратно пропорционально расстоянию от планеты радиусом R_0 :

$$g_0 = \frac{k}{R_0^2} \text{ и } g = \frac{k}{(R_0 + h)^2}$$

Тогда $\frac{g}{g_0} = \left(\frac{R_0}{R_0 + h}\right)^2$, откуда $g = \left(\frac{R_0}{R_0 + h}\right)^2 \cdot g_0$.

Подставляя полученное выражение в формулу для вычисления скорости, имеем:

$$v = \sqrt{\left(\frac{R_0}{R_0 + h}\right)^2 \cdot g_0 \cdot (R_0 + h)} = R_0 \cdot \sqrt{\frac{g_0}{R_0 + h}}.$$

$$v = 3,4 \cdot 10^6 \text{ м} \cdot \sqrt{\frac{4 \text{ м/с}^2}{3,4 \cdot 10^6 \text{ м} + 6 \cdot 10^5 \text{ м}}} = 3,4 \cdot 10^3 \text{ м/с.}$$

Ответ: $v = 3,4 \cdot 10^3 \text{ м/с.}$

ДЕФОРМАЦИЯ

Деформацией называют изменение формы, размеров или объёма тела.

Деформация может быть вызвана действием на тело приложенных к нему внешних сил.

Деформации, полностью исчезающие после прекращения действия на тело внешних сил, называют упругими, а деформации, сохраняющиеся и после того, как внешние силы перестали действовать на тело, — пластическими.

При деформации возникает сила, которая стремится восстановить прежние размеры и форму тела.

Эта сила является следствием электромагнитного взаимодействия между атомами и молекулами вещества.

■ Сила упругости и её виды

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

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

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

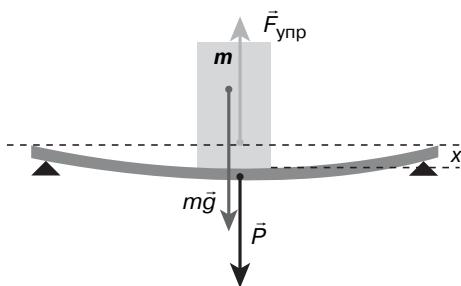
Сила упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$ — сила, возникающая при деформации тела (пружина, трос и др.) и восстанавливающая первоначальные размеры и форму тела при прекращении внешнего воздействия:

$$F_{\text{упр}} = -k \cdot x,$$

где k — коэффициент жёсткости или просто жёсткость пружины (единица измерения — Н/м), x — расстояние (сжатие) пружины или нити (единица измерения — м).

Знак « $-$ » показывает, что сила упругости всегда направлена противоположно деформации тела.

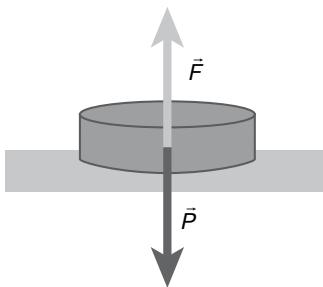
Сила упругости, как и все силы, измеряется в ньютонах (**Н**).



Действие силы упругости:

mg — сила тяжести, действующая на брусков массой m , P — сила, действующая на перекладину вследствие воздействия силы тяжести и вызывающая деформацию x , $\vec{F}_{\text{упр}}$ — противодействующая сила — сила упругости

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



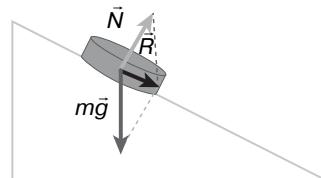
Сила реакции на горизонтальной поверхности:
 P — вес тела — сила, действующая на опору или подвес вследствие действия силы тяжести (см. раздел «Различия силы тяжести и веса тела», с. 60), F — сила реакции опоры (общепринятое обозначение — **N**)

Равнодействующая этих сил равна нулю.

Сила реакции опоры — один из видов **силы упругости**.

Из определения веса тела (вес — это сила, действующая со стороны тела на опору или подвес) сила реакции опоры противодействует весу тела, то есть это сила, действующая на тело со стороны опоры.

При движении тела с ускорением сила реакции опоры меняется.



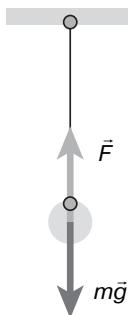
Равнодействующая сила:

mg — сила тяжести, N — сила реакции опоры, $R = mg + N$ — равнодействующая этих сил

$\vec{R} = m\vec{g} + \vec{F}$ — равнодействующая сила не равна нулю, то есть при отсутствии других сил тело будет двигаться вниз по наклонной плоскости.

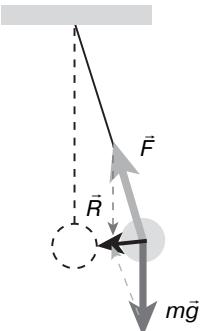
Особые случаи силы реакции опоры

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



Сила натяжения нити в положении равновесия: $m\vec{g}$ — сила тяжести, \vec{F} — сила натяжения, общепринятое обозначение — \vec{T}

Равнодействующая этих сил равна нулю.



Сила натяжения нити 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.

■ Закон Гука

Закон Гука связывает **модуль силы упругости и удлинение**: модуль силы упругости $F_{\text{упр}}$, возникающей при деформации тела, пропорционален его удлинению Δl :

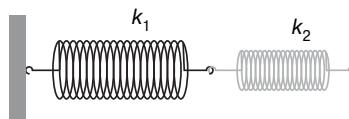
$$F_{\text{упр}} = k \cdot \Delta l,$$

где k — жёсткость пружины, Δl имеет тот же смысл, что и Δx , — растяжение (сжатие), то есть в задачах могут встречаться три обозначения одной величины «растяжение»: Δl , Δx , x .

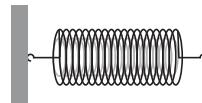
■ Расчёт коэффициента жёсткости двух пружин

Последовательное соединение

Имеем две пружины с коэффициентами жёсткости k_1 и k_2 .



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

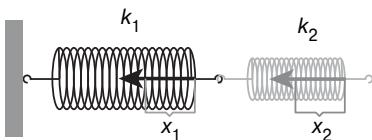


Представим, что мы потянули за концы этих пружин: каждая из них удлинилась на x_1 и x_2 соответственно.

Общее удлинение (деформация) будет равно:

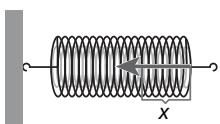
$$x = x_1 + x_2;$$

$$F = k_1 x_1 = k_2 x_2.$$



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

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



Отсюда получаем:

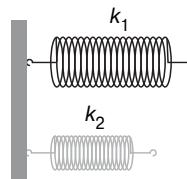
$$x_1 = \frac{F}{k_1}, \quad x_2 = \frac{F}{k_2}.$$

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

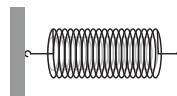
$$\frac{1}{k_{\text{общ}}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}.$$

Параллельное соединение

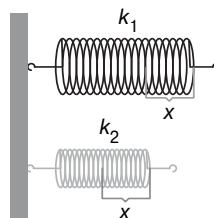
Имеем две пружины с коэффициентами жёсткости k_1 и k_2 .



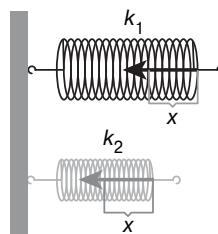
Рассчитаем коэффициент жёсткости пружины, которая может заменить эти две пружины, если они соединены параллельно.



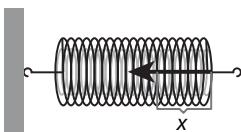
Представим, что мы потянули за концы этих пружин: каждая из них удлинилась на x .



В каждой из них возникнут силы упругости $k_1 x$ и $k_2 x$, которые приложены в одной точке.



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



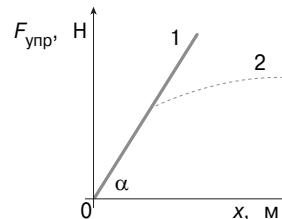
Следовательно,

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

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

■ Закон Гука при больших и малых деформациях

Закон Гука справедлив только при малых (то есть при упругих) деформациях, при больших деформациях тело разрушается.



Графическая интерпретация закона Гука:
 $F_{\text{упр}}$ — сила упругости, возникающая в теле при деформации x , 1 — при упругой деформации, 2 — при пластической деформации (нарушение закона Гука).
 По углу наклона α прямой 1 можно оценить коэффициент жёсткости: $\tan \alpha = k = \frac{F_{\text{упр}}}{x}$

■ Динамометр

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, про-градуированной в единицах силы. Динамометр применяют для измере-ния силы тяжести, силы упругости, силы трения и др.



Практические задания

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

Сила (F , Н)	0	10	20	30
Деформация пружины 1 (Δl , см)	0	1	2	3
Деформация пружины 2 (Δl , см)	0	2	4	6
Деформация пружины 3 (Δl , см)	0	1,5	3	4,5

Сравните жёсткость пружин.

Решение:

По закону Гука

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

Поскольку в таблице для каждой пружины выполняется условие прямой пропорциональности, то для каждой пружины будем брать значения из второго столбца. Единицы измерения должны быть переведены в СИ! Получаем:

$$\text{жёсткость пружины 1: } k_1 = \frac{10 \text{ Н}}{0,01 \text{ м}} = 1000 \text{ Н/м};$$

$$\text{жёсткость пружины 2: } k_2 = \frac{10 \text{ Н}}{0,02 \text{ м}} = 500 \text{ Н/м};$$

$$\text{жёсткость пружины 3: } k_3 = \frac{10 \text{ Н}}{0,015 \text{ м}} \approx 667 \text{ Н/м.}$$

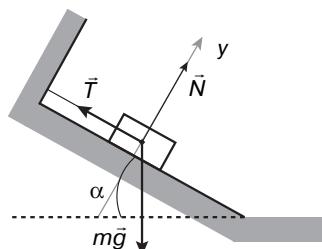
Ответ: $k_2 < k_3 < k_1$.

46

Тело массой m покоятся на гладкой опоре, наклонённой под углом α к горизонту (см. рисунок). На тело действуют три силы: сила тяжести $m\vec{g}$, сила реакции опоры \vec{N} , сила натяжения нити \vec{T} . Чему равен модуль проекции равнодействующей сил $m\vec{g}$ и \vec{T} на ось y ?

- 1) $N + mg$
- 2) $mg \cos \alpha$
- 3) $(N + mg) \sin \alpha$
- 4) $mg + T$

Решение:



По первому закону Ньютона (тело покоятся) равнодействующая сил равна: $m \cdot \vec{g} + \vec{N} + \vec{T} = 0$.

Значит, модуль силы реакции опоры \vec{N} : $|N| = |m \cdot \vec{g} + \vec{T}|$.

$Oy: |mg_y + T_y| = |-mg \cos \alpha| = mg \cos \alpha$.

Ответ: 2.

47

В аттракционе человек массой 70 кг движется на тележке по рельсам и совершает мёртвую петлю в вертикальной плоскости. Каков радиус круговой траектории, если в верхней точке сила давления человека на сиденье тележки равна 700 Н при скорости движения тележки 10 м/с? Ускорение свободного падения принять равным 10 м/с².

Дано:

$$m = 70 \text{ кг}$$

$$P = N = 700 \text{ Н}$$

$$v = 10 \text{ м/с}$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$$R — ?$$

Решение:

По третьему закону Ньютона сила \vec{P} давления на сиденье равна по модулю и противоположна по направлению силе упругости \vec{N} , действующей на человека: $|\vec{P}| = |\vec{N}|$.

По второму закону Ньютона при движении по окружности равнодействующая силы тяжести и силы упругости создаёт центростремительное ускорение:

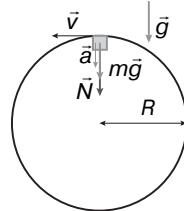
$$m \cdot g + N = m \cdot a, \text{ где } a = \frac{v^2}{R}.$$

Тогда

$$m \cdot g + N = m \cdot \frac{v^2}{R}, \text{ откуда } R = \frac{v^2}{g + \frac{N}{m}}.$$

$$R = \frac{(10 \text{ м/с})^2}{10 \text{ м/с}^2 + \frac{700 \text{ Н}}{70 \text{ кг}}} = 5 \text{ м.}$$

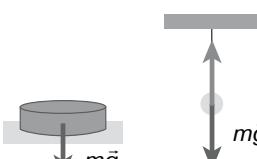
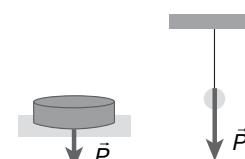
Ответ: $R = 5 \text{ м.}$



РАЗЛИЧИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ И ВЕСА ТЕЛА

Сила тяжести	Вес тела
Определение	
Результирующая гравитационная сила, действующая на любое тело со стороны планеты Земля	Суммарная сила упругости тела, действующая при наличии силы тяжести на все опоры, подвесы

>>>

Сила тяжести	Вес тела
Природа силы	
Гравитационная сила (притяжение к Земле)	Электромагнитная (сила упругости тела)
Направление	
 <p>$m\vec{g}$ — сила тяжести Направлена к центру Земли</p>	 <p>\vec{P} — вес тела Направлена перпендикулярно опоре или подвесу</p>
Точка приложения	
Приложена к центру тела (см. рисунок выше)	Приложена к поверхности плоскости или концу нити (см. рисунок выше)
На какое тело действует	
Действует на само тело	Действует на поверхность плоскости или конец нити
От чего зависит изменение силы	
Не изменяется вблизи поверхности Земли (незначительные изменения на экваторе и полюсах из-за эллиптической формы Земли)	Изменяется при движении тела с ускорением. Так, при движении в автомобиле вниз (с горы) действие на опору (сиденье) уменьшается, а при подъёме вверх (в гору) увеличивается
Формула для вычисления силы	
$\vec{F}_{\text{тяж}} = m \cdot \vec{g}$, где m — масса тела, \vec{g} — ускорение свободного падения	$\vec{P} = m \cdot (\vec{g} - \vec{a})$, где m — масса тела, \vec{g} — ускорение свободного падения, \vec{a} — ускорение, с которым движется тело

ВЕКТОРНАЯ РАЗНОСТЬ

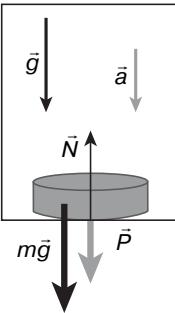
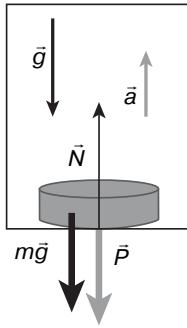
Следует обратить внимание, что в формуле для определения веса тела используется **векторная раз-**

ность. Векторную разность векторов \vec{a} и \vec{b} можно считать суммой векторов \vec{a} и \vec{b} . Это означает, что при

построении вектор \vec{b} следует брать с направлением, противоположным вектору \vec{a} :

$$\vec{a} - \vec{b} = \vec{a} + (-\vec{b}).$$

Применение векторной разности наглядно представляет движение в лифте (лифт движется с ускорением).

Лифт движется с ускорением вниз	Лифт движется с ускорением вверх
	
$m\vec{g}$ — сила тяжести, \vec{P} — вес тела, \vec{N} — сила реакции опоры, \vec{g} — ускорение свободного падения, \vec{a} — ускорение лифта	
Векторная запись второго закона Ньютона для системы	
$\vec{P} = m\vec{g} - m\vec{a}$	
Скалярная запись второго закона Ньютона для системы	
Векторы ускорения направлены в одну сторону, следовательно, векторная разность равна скалярной разности:	Векторы ускорения направлены противоположно, следовательно, векторная разность равна скалярной сумме:
$P = m \cdot (g - a)$	$P = m \cdot (g + a)$
Следствие: перегрузка и невесомость	
При движении лифта 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:	При движении лифта с ускорением вверх сила реакции опоры и вес увеличиваются. В результате возникает перегрузка — увеличение веса тела, вызванное его ускоренным движением
$P = m \cdot (g - g) = 0.$	
В результате такого движения возникает невесомость — состояние тела, при котором оно движется только под действием силы тяжести	



Практические задания

48

В аттракционе человек массой 70 кг движется на тележке по рельсам и совершает мёртвую петлю в вертикальной плоскости. С какой скоростью двигалась тележка в нижней точке круговой траектории радиусом 5 м, если в этой точке сила давления человека на сиденье тележки была равна 2100 Н? Ускорение свободного падения — 10 м/с².

Дано:

$$m = 70 \text{ кг}$$

$$g \approx 10 \text{ м/с}^2$$

$$R = 5 \text{ м}$$

$$P = 2100 \text{ Н}$$

$$N = P = 2100 \text{ Н}$$

$$v = ?$$

Решение:

Сила P давления на сиденье по третьему закону Ньютона равна по модулю силе N упругости (силе реакции опоры), действующей на человека:

$$P = N.$$

Согласно второму закону Ньютона:

$$m \cdot a = N - m \cdot g, \text{ откуда } a = \frac{N}{m} - g.$$

Из кинематических условий центростремительное ускорение равно:

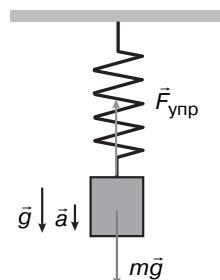
$$a = \frac{v^2}{R}, \text{ откуда } v = \sqrt{a \cdot R} = \sqrt{\left(\frac{N}{m} - g\right) \cdot R}$$

$$v = \sqrt{\left(\frac{2100 \text{ Н}}{70 \text{ кг}} - 10 \text{ м/с}^2\right) \cdot 5 \text{ м}} = 10 \text{ м/с.}$$

Ответ: $v = 10 \text{ м/с.}$

49

Груз массой 200 г подвешен на пружине к потолку неподвижного лифта. Лифт начинает двигаться и в течение 2 с равноускоренно опускается вниз на расстояние 5 м. Каково удлинение пружины при опускании лифта, если её жёсткость 100 Н/м? Движение груза также считать равноускоренным, возникновением колебаний пренебречь.



Дано:

$$m = 0,2 \text{ кг}$$

$$t = 2 \text{ с}$$

$$s = 5 \text{ м}$$

$$k = 100 \text{ Н/м}$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$$\Delta x — ?$$

Решение:

Сила упругости пружины по модулю равна весу тела:

$$|F_{\text{упр}}| = |P|, \text{ причём } P = m \cdot (\bar{g} - \bar{a}).$$

При движении вниз (см. рисунок):

$$P = m \cdot (g - a),$$

где $a = \frac{2 \cdot s}{t^2}$ — ускорение, с которым движется лифт;

$F_{\text{упр}} = k \cdot \Delta x$ — сила упругости пружины. Тогда

$$k \cdot \Delta x = m \cdot \left(g - \frac{2 \cdot s}{t^2} \right), \text{ откуда } \Delta x = \frac{m}{k} \cdot \left(g - \frac{2 \cdot s}{t^2} \right).$$

$$\Delta x = \frac{0,2 \text{ кг}}{100 \frac{\text{Н}}{\text{м}}} \cdot \left(10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} - \frac{2 \cdot 5 \text{ м}}{(2 \text{ с})^2} \right) = 1,5 \text{ см.}$$

Ответ: $\Delta x = 1,5 \text{ см.}$

СИЛА ТРЕНИЯ

Сила трения — сила, возникающая при соприкосновении поверхностей тел, препятствующая их относительному перемещению, направленная вдоль поверхности соприкосновения.

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

Знак « $-$ » показывает, что силы противоположно направлены.

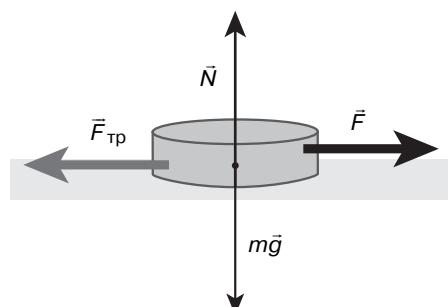
■ Виды трения

Трение покоя

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

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

$$F_{\text{тр.п}} = F \quad (\vec{F}_{\text{тр.п}} = -\vec{F}),$$



Действие сил на покоящееся тело при наличии трения:

mg — сила тяжести, N — сила реакции опоры, $\vec{F}_{\text{тр}}$ — сила трения, \vec{F} — сила тяги

Сила трения покоя в зависимости от величины силы тяги F (см. рисунок «График силы трения») изменяет своё значение до тех пор, пока тело не начнёт двигаться.

На участке 0—1 тело неподвижно:

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

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

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

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

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

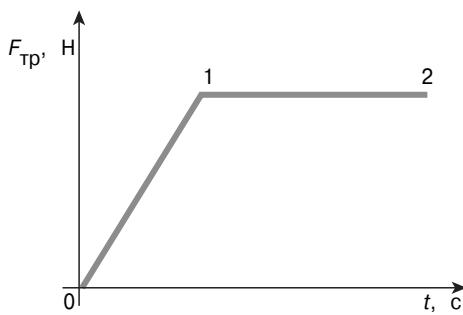


График силы трения:

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

Участок 0—1 — график силы трения покоя.

Участок 1—2 — график силы трения скольжения

Трение скольжения

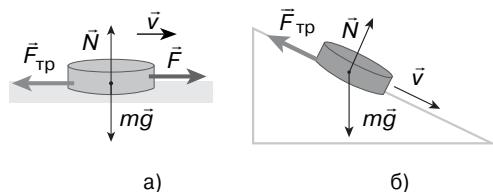
Трение скольжения — трение, возникающее при перемещении (случай поступательного движения) одного тела по поверхности другого.

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

$$F_{\text{тр}} = \mu \cdot N,$$

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

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



Действие сил на движущееся тело при наличии трения:

а) по горизонтальной поверхности;

б) по наклонной поверхности.

$m\vec{g}$ — сила тяжести, \vec{N} — сила реакции опоры, $\vec{F}_{\text{тр}}$ — сила трения, \vec{F} — сила тяги, \vec{v} — скорость тела

Трение качения

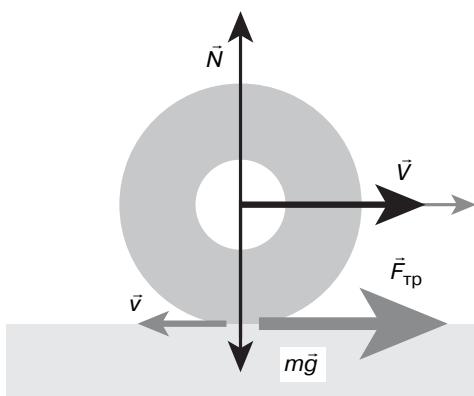
Трение качения — трение, возникающее при перемещении (случай

вращательного движения) одного тела по поверхности другого.

Сила трения качения $F_{\text{тр}}$ — сила трения, возникающая при перемещении (случай вращательного движения) одного тела по поверхности другого:

$$F_{\text{тр}} = \mu \cdot N,$$

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



Действие сил на катящееся тело при наличии трения:

$m\bar{g}$ — сила тяжести, \bar{N} — сила реакции опоры, $\vec{F}_{\text{тр}}$ — сила трения качения, \bar{V} — скорость поступательного движения колеса, \bar{v} — скорость точки колеса, соприкасающейся с поверхностью



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

✓ Деревянный брускок массой m , площади граней которого связаны отношением $S_1 : S_2 : S_3 = 1 : 2 : 3$, скользит равномерно по горизонтальной шероховатой опоре, соприкасаясь с ней гранью площадью S_1 , под действием горизонтальной силы. Какова величина этой силы, если коэффициент трения бруска об опору равен μ ?

Ответ: сила трения скольжения не зависит от площади соприкасающихся поверхностей и равна $F_{\text{тр}} = \mu \cdot N = \mu \cdot m \cdot g$.

■ Коэффициент трения

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

$$\mu = \frac{F_{\text{тр}}}{N},$$

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

Коэффициент трения — **безразмерная** величина.

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



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



Практические задания

- 50** На горизонтальном полу стоит ящик массой 10 кг. Коэффициент трения скольжения между полом и ящиком равен 0,25. К ящику в горизонтальном направлении прикладывают силу 20 Н. При этом ящик
- 1) останется в покое
 - 2) будет двигаться равномерно
 - 3) будет двигаться с ускорением 1,5 м/с²
 - 4) будет двигаться с ускорением 1 м/с²

Дано:

$$m = 10 \text{ кг}$$

$$\mu = 0,25$$

$$F = 20 \text{ Н}$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$$F_{\text{тр}} - ?$$

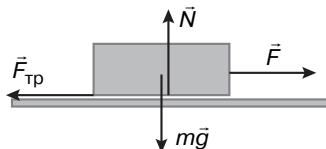
Решение:

Сравним силу тяги и силу трения:

$$F_{\text{тр}} = \mu \cdot N = \mu \cdot m \cdot g;$$

$$F_{\text{тр}} = 0,25 \cdot 10 \text{ кг} \cdot 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = 25 \text{ Н}.$$

Имеем: $F_{\text{тр}} > F$.



Ответ: 1.

- 51** Груз массой m тянут за нить по горизонтальной шероховатой поверхности. На какое расстояние s переместится груз после обрыва нити, если его скорость в момент обрыва равна v , а коэффициент трения груза о поверхность равен μ ? Сопротивление воздуха пренебрежимо мало.

- 1) $\frac{2v^2}{\mu g}$
- 2) $\frac{v^2}{\mu g}$
- 3) $\frac{v^2}{2\mu g}$
- 4) $\frac{4v^2}{\mu g}$

Дано:

$$m$$

$$v$$

$$\mu$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$$s - ?$$

Решение:

По второму закону Ньютона после обрыва нити сила трения сообщает телу ускорение:

$$F_{\text{тр}} = \mu \cdot N = \mu \cdot m \cdot g = m \cdot a, \text{ откуда } a = \mu \cdot g.$$

Груз переместится на расстояние, называемое тормозным путём, которое найдём из кинематической формулы (следует учесть, что конечная скорость равна нулю):

$$s = \frac{v^2}{2 \cdot a} = \frac{v^2}{2 \cdot \mu \cdot g}.$$

Ответ: 3.

ЗАКОНЫ НЬЮТОНА В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ

Главный вопрос любой задачи: чему равна равнодействующая сила?

$$\vec{R} = \sum \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n = ?$$

Равна нулю:

$$\vec{R} = \sum \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n = 0,$$

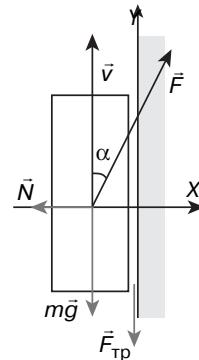
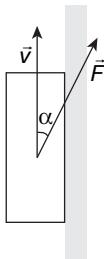
тогда по первому закону Ньютона тело движется равномерно и прямолинейно или покоятся.

Не равна нулю:

$$\vec{R} = \sum \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n \neq 0,$$

тогда по второму закону Ньютона тело движется равноускоренно.

- ✓ Брускок массой m прижат к вертикальной стене силой F , направленной под углом α к вертикали (см. рисунок). Коэффициент трения между бруском и стеной равен μ . При какой величине силы F брускок будет двигаться по стене вертикально вверх с постоянной скоростью?



Решение:

1. Сделайте рисунок с изображением всех сил, действующих на тело.

Выберите координатные оси. Если заранее известно направление ускорения, то целесообразно направить одну из осей вдоль ускорения,

а вторую (если она требуется) — перпендикулярно ему.

2. Запишите для каждого тела в векторной форме первый закон Ньютона:

$$\vec{R} = \sum \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n = 0$$

или второй закон Ньютона:

$$\vec{R} = \sum \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n = m \cdot \vec{a}.$$

>>>

Поскольку брускок будет двигаться с постоянной скоростью, то применим первый закон Ньютона:

$$\vec{R} = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F} + \vec{F}_{\text{тр}} = 0,$$

где \vec{R} — равнодействующая сила, $m\vec{g}$ — сила тяжести, \vec{N} — сила реакции опоры, \vec{F} — сила тяги, $\vec{F}_{\text{тр}}$ — сила трения.

3. Найдите проекции всех сил и ускорения (если оно есть) на оси координат.

$$\begin{cases} mg_x = 0 & mg_y = -mg \\ N_x = -N & N_y = 0 \\ F_x = F \cdot \sin \alpha & F_y = F \cdot \cos \alpha \\ F_{\text{тр}x} = 0 & F_{\text{тр}y} = -F_{\text{тр}} \end{cases}$$

4. Запишите закон Ньютона в скалярной форме, заменив векторные величины на их проекции.

$$\begin{cases} -N + F \cdot \sin \alpha = 0 \\ -mg + F \cdot \cos \alpha - F_{\text{тр}} = 0 \end{cases}$$

5. Часто в задаче необходимо использовать формулу силы трения для уменьшения числа переменных.

$$F_{\text{тр}} = \mu \cdot N;$$

$$\begin{cases} -N + F \cdot \sin \alpha = 0 \\ -mg + F \cdot \cos \alpha - \mu \cdot N = 0 \end{cases}$$

6. Решая алгебраически систему уравнений, выразите искомые величины.

$$\begin{cases} N = F \cdot \sin \alpha \\ -mg + F \cdot \cos \alpha - \mu \cdot F \cdot \sin \alpha = 0 \end{cases}$$

Далее решите второе уравнение отдельно:

$$F \cdot (\cos \alpha - \mu \cdot \sin \alpha) = mg;$$

$$F = \frac{mg}{\cos \alpha - \mu \cdot \sin \alpha}.$$



Практические задания

52

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

- A) сила натяжения нити
Б) коэффициент трения

- 1) увеличится
2) уменьшится
3) не изменится

Решение:

По первому закону Ньютона (см. рисунок)

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

Из треугольника: $N = m \cdot g \cdot \cos \alpha$.

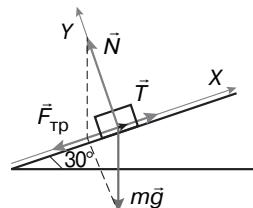
По формуле силы трения $F_{\text{тр}} = \mu \cdot N$, то есть

$$F_{\text{тр}} = \mu \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha.$$

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

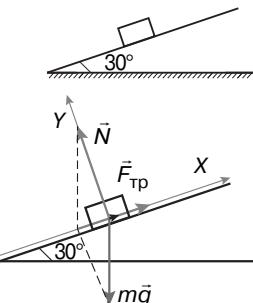
Коэффициент трения зависит только от характера поверхности, поэтому он не изменится.

Ответ: А — 1; Б — 3.



53

Брусок покоится на наклонной плоскости, образующей угол 30° с горизонтом. Сила трения покоя равна 0,5 Н. Определите силу тяжести, действующую на тело.



Дано:

$$\alpha = \frac{\pi}{6}$$

$$F_{\text{тр}} = 0,5 \text{ Н}$$

$$\mu = 0,4$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$$F_t — ?$$

Решение:

По первому закону Ньютона (см. рисунок, где $\vec{F}_t = m \cdot \vec{g}$): $\vec{F}_t + \vec{N} + \vec{F}_{\text{тр}} = 0$.

Значит, сила трения равна векторной сумме сил: $-\vec{F}_{\text{тр}} = \vec{F}_t + \vec{N}$.

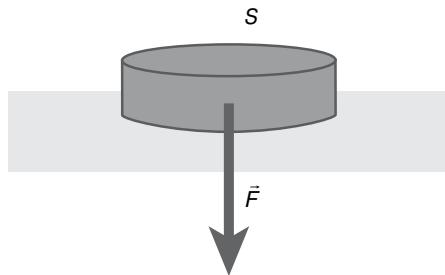
В параллелограмме, построенном на векторах \vec{F}_t и \vec{N} , искомый вектор является диагональю или катетом прямоугольного треугольника с гипотенузой $\vec{F}_t = m \cdot \vec{g}$, тогда

$$F_t = \frac{F_{\text{тр}}}{\sin \alpha}; \quad F_t = \frac{0,5 \text{ Н}}{\sin \frac{\pi}{6}} = 1 \text{ Н.}$$

Ответ: $F_t = 1 \text{ Н.}$

ДАВЛЕНИЕ

Действие силы на поверхность тела характеризуется давлением.



Действие силы на поверхность:

\bar{F} — сила давления тела, S — площадь поверхности тела

Давление — величина, равная отношению силы, действующей перпендикулярно поверхности, к площади этой поверхности:

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

где p — давление, F — приложенная сила давления, S — площадь поверхности (площадь опоры тела), единица измерения — метр квадратный (м^2). Давление — величина скалярная, у давления нет направления. Единица измерения давления — паскаль (**Па**).

■ От чего зависит давление

Давление можно увеличивать или уменьшать в зависимости от того, какой результат необходимо получить.

Чем больше площадь поверхности, на которую действует сила, тем меньше будет давление тела на опору.

Например, лыжи имеют большую площадь поверхности, чем подошва обуви, поэтому меньше проваливаются в снег — оказывают меньшее давление.

Большая по значению сила, действующая на ту же площадь, будет оказывать большее давление.

■ Способы изменения давления

Результат действия силы на поверхность зависит:

- ▀ от её величины;
- ▀ направления;
- ▀ точки приложения;
- ▀ площади опоры давящего тела.

Для увеличения давления увеличивают силу давления, уменьшают площадь поверхности тела	Для уменьшения давления уменьшают силу давления, увеличивают площадь поверхности тела
Примеры: топор, нож, гвозди, кнопки, иголки, зубы, когти, клювы зверей, шипы, колючки растений, жало осы	Примеры: фундамент здания, шасси самолёта, широкие шины автомобилей, гусеницы вездеходов, тракторов, лыжи, шайбы под гайки, шпалы под рельсы



Практические задания

54 Книга лежит на столе. Масса книги 0,6 кг. Площадь её соприкосновения со столом 0,08 м². Чему равно давление книги на стол?

Дано:

$$\begin{aligned}m &= 0,6 \text{ кг} \\S &= 0,08 \text{ м}^2 \\g &\approx 10 \text{ м/с}^2\end{aligned}$$

$$p = ?$$

Решение:

$$\text{По формуле давления } p = \frac{F}{S},$$

где $F = mg$ — приложенная сила давления, равная силе тяжести, S — площадь поверхности.

$$\text{Тогда } p = \frac{mg}{S}; \quad p = \frac{0,6 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2}{0,08 \text{ м}^2} = 75 \text{ Па.}$$

Ответ: $p = 75$ Па.

55 На какую максимальную высоту может поднимать воду насос, если создаваемый им перепад давления равен 200 кПа?

Дано:

$$\begin{aligned}p &= 200\,000 \text{ Па} \\g &= 10 \text{ м/с}^2 \\\rho_{\text{в}} &= 1000 \text{ кг/м}^3\end{aligned}$$

$$h = ?$$

Решение:

Работа по подъёму воды равна потенциальной энергии воды на высоте h :

$$A = E_p = mgh = \rho_{\text{в}}Vgh = \rho_{\text{в}}Shgh = \rho_{\text{в}}gSh^2.$$

При этом работа равна произведению силы на перемещение: $A = Fh = pSh$,

где $F = pS$ — приложенная сила давления, равная силе тяжести, S — площадь поверхности.

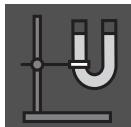
$$\text{Тогда } \rho_{\text{в}}gSh^2 = pSh, \text{ откуда } h = \frac{p}{\rho_{\text{в}}g}.$$

$$h = \frac{200\,000 \text{ Па}}{1000 \text{ кг/м}^3 \cdot 10 \text{ м/с}^2} = 20 \text{ м.}$$

Ответ: $h = 20$ м.

Пояснение:

Из этой задачи следует, что давление жидкости на дно сосуда можно вычислить по формуле $p = \rho gh$, где ρ — плотность жидкости, $g = 10 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения, h — глубина водоёма (сосуда).



СТАТИКА

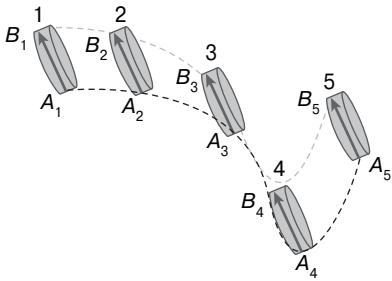
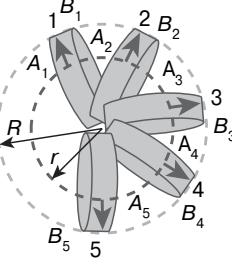
Статика — раздел механики, изучающий равновесие тел — твёрдых, жидких или газообразных, находящихся в состоянии покоя под воздействием внешних сил. Слово «статика» происходит от греч. *statiķe* — равновесие. В статике формулируются **условия отсутствия движения** даже в том случае, когда на тело действуют силы.



ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Абсолютно твёрдое тело (ATT) — тело, для которого расстояние между любыми точками можно считать неизменным.

Произвольное движение абсолютно твёрдого тела можно представить как результат сложения двух движений — поступательного и вращательного.

<p>Поступательное движение — это движение тела, при котором все его точки перемещаются одинаково</p>	<p>Вращательное движение — это движение, при котором все точки тела движутся по окружностям, центры которых лежат на одной и той же прямой, называемой осью вращения</p>
 <p>Пример поступательного движения: $A_1 - B_1, A_2 - B_2, A_3 - B_3, A_4 - B_4, A_5 - B_5$ — пара точек одного и того же тела в положениях 1 — 2 — 3 — 4 — 5; тёмная линия — траектория движения точки A, светлая линия — траектория движения точки B</p>	 <p>Пример вращательного движения: $A_1 - B_1, A_2 - B_2, A_3 - B_3, A_4 - B_4, A_5 - B_5$ — пара точек одного и того же тела в положениях 1 — 2 — 3 — 4 — 5; тёмная линия — траектория движения точки A (окружность радиусом r), светлая линия — траектория движения точки B (окружность радиусом R)</p>

При поступательном движении вектор, соединяющий две произвольные точки, перемещается параллельно самому себе, не изменяясь по длине.

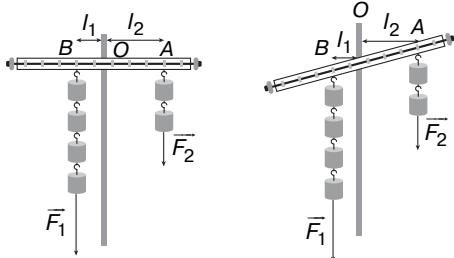
При вращательном движении все точки тела совершают движение по окружностям, центром которых является ось вращения.

МОМЕНТ СИЛЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ОСИ ВРАЩЕНИЯ

Центр тяжести тела — точка приложения равнодействующей всех сил тяжести, действующих на частицы тела при любом его положении в пространстве.

■ Плечо силы

Плечо силы — длина перпендикуляра, опущенного от оси вращения на линию действия силы.



Примеры определения плеча силы:
 l_1 и l_2 — соответственные плечи сил \bar{F}_1 и \bar{F}_2 , действующих на рычаг

■ Момент силы

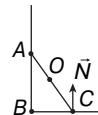
Момент силы M — физическая величина, равная произведению модуля силы на её плечо:

$$M = Fl.$$

Момент силы — величина **скалярная**. Единица измерения — ньютон-метр (**N · м**).

Момент считают положительным, если сила вращает тело относительно выбранной оси против часовой стрелки, отрицательным — если по часовой стрелке.

✓ На рисунке схематически изображена лестница AC , прислонённая к стене. Каков момент силы реакции опоры \bar{N} , действующей на лестницу, относительно точки C ?



Ответ: плечо силы \bar{N} — длина перпендикуляра, опущенного от оси вращения (точка C) на линию действия силы. Поскольку точка C лежит на линии действия силы, то длина перпендикуляра равна нулю: $M = N \cdot 0 = 0$.



Линия плеча силы всегда перпендикулярна силе.



Практические задания

- 56** При выполнении лабораторной работы ученик установил наклонную плоскость под углом 60° к поверхности стола. Длина плоскости равна 0,6 м. Каков момент силы тяжести бруска массой 0,1 кг относительно точки O при прохождении им середины наклонной плоскости?

Дано:

$$\alpha = 60^\circ$$

$$L = 0,6 \text{ м}$$

$$m = 0,1 \text{ кг}$$

$$g \approx 10 \text{ м/с}^2$$

$$M - ?$$

Решение:

Сделаем рисунок с обозначением силы тяжести и её плеча.

В прямоугольном треугольнике OAB

$$\text{по условию гипотенуза } OB = \frac{1}{2}L = 0,3 \text{ м.}$$

Плечо силы OA является катетом, лежащим против угла 30° , а значит, равным половине гипотенузы:

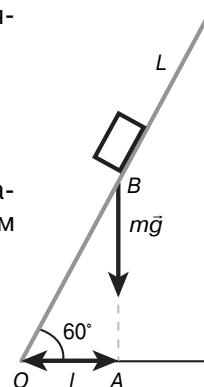
$$I = OA = \frac{1}{2}OB = \frac{1}{2} \cdot 0,3 \text{ м} = 0,15 \text{ м.}$$

Сила тяжести бруска:

$$F = m \cdot g = 0,1 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2 = 1 \text{ Н.}$$

Тогда момент силы равен: $M = F \cdot I = 1 \text{ Н} \cdot 0,15 \text{ м} = 0,15 \text{ Н} \cdot \text{м.}$

Ответ: $M = 0,15 \text{ Н} \cdot \text{м.}$



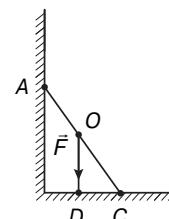
- 57** На рисунке схематически изображена лестница AC , прислонённая к стене. Каков момент силы тяжести \bar{F} , действующей на лестницу, относительно точки C ?

- 1) $F \cdot OC$ 2) $F \cdot OD$ 3) $F \cdot AC$ 4) $F \cdot DC$

Решение:

Плечо силы \bar{F} — длина перпендикуляра, опущенного от оси вращения (точка C) на линию действия силы (прямая OD), есть длина отрезка CD .

Тогда момент силы F : $M = F \cdot DC$.



Ответ: 4.

УСЛОВИЯ РАВНОВЕСИЯ ТВЁРДОГО ТЕЛА

■ Условие отсутствия поступательного движения (первый закон Ньютона)

Поступательное движение тела в инерциальной системе отсчёта отсутствует, если векторная сумма всех сил, действующих на тело, равна нулю:

$$\vec{R} = \sum \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n = 0,$$

где $\vec{R} = \sum \vec{F}_i$ — равнодействующая сил $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3 \dots \vec{F}_n$, действующих на тело.

■ Условие отсутствия вращательного движения

Вращательное движение твёрдого тела в инерциальной системе отсчёта не возникает, если **алгебраическая сумма моментов** (относительно произвольной оси O) всех сил, действующих на тело, **равна нулю**:

$$\sum M_i = M_1 + M_2 + M_3 + \dots + M_n = 0.$$

Произвольное движение твёрдого тела является результатом сложения его поступательного и вращательного движения.



Практические задания

58

Плакат массой 8 кг закреплён на опорах с помощью четырёх тросов, составляющих угол 60° с опорой (см. рисунок). Найдите силы натяжения тросов.

Дано:

$$m = 8 \text{ кг}$$

$$\alpha = 60^\circ$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$$T_1 = ?$$

$$T_2 = ?$$

$$T_3 = ?$$

$$T_4 = ?$$

Решение:

Сделаем рисунок с обозначением всех сил, действующих на плакат.

Запишем условие статического равновесия в векторной форме:

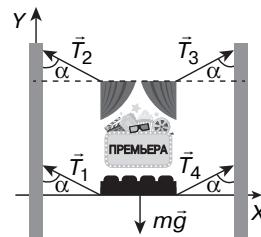
$$m\vec{g} + \vec{T}_1 + \vec{T}_2 + \vec{T}_3 + \vec{T}_4 = 0.$$

Поскольку нагрузка распределяется равномерно, модули всех сил натяжения равны:

$$T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = T.$$

Найдём проекции всех сил на оси координат (см. рисунок).

$$\left\{ \begin{array}{l} mg_x = 0 \\ T_{1x} = -T \cdot \sin \alpha \\ T_{2x} = -T \cdot \sin \alpha \\ T_{3x} = T \cdot \sin \alpha \\ T_{4x} = T \cdot \sin \alpha \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} mg_y = -m \cdot g \\ T_{1y} = T \cdot \cos \alpha \\ T_{2y} = T \cdot \cos \alpha \\ T_{3y} = T \cdot \cos \alpha \\ T_{4y} = T \cdot \cos \alpha \end{array} \right.$$



Запишем условие статического равновесия в скалярной форме:

$$\left\{ \begin{array}{l} -2T \cdot \sin \alpha + 2T \cdot \sin \alpha = 0 \\ -m \cdot g + 4T \cdot \cos \alpha = 0 \end{array} \right.$$

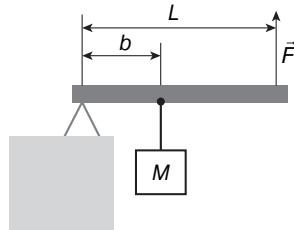
Поскольку первое уравнение является тождеством, решаем отдельно только второе уравнение:

$$4T \cdot \cos \alpha = m \cdot g, \text{ откуда } T = \frac{m \cdot g}{4 \cdot \cos \alpha}.$$

$$T = \frac{8 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2}{4 \cdot \cos 60^\circ} = 40 \text{ Н.}$$

Ответ: $T = 40 \text{ Н.}$

- 59** Груз массой 100 кг удерживают на месте с помощью рычага, приложив вертикальную силу 350 Н (см. рисунок). Рычаг состоит из шарнира без трения и однородного массивного стержня длиной 5 м. Расстояние от оси шарнира до точки подвеса груза равно 1 м. Чему равна масса стержня?



Дано:

$$M = 100 \text{ кг}$$

$$F = 350 \text{ Н}$$

$$L = 5 \text{ м}$$

$$b = 1 \text{ м}$$

$$g \approx 10 \text{ м/с}^2$$

$$m = ?$$

Решение:

Поскольку рычаг имеет массу, то он создаёт момент силы, направленный вниз. Считаем, что сила тяжести приложена к центру масс — середине стержня:

$$M_{mg} = m \cdot g \cdot \frac{1}{2}L.$$

Момент силы, создаваемой силой тяжести груза, также направлен вниз, а момент силы, создаваемой силой F , направлен вверх.

Условие равенства моментов сил, учитывая направления, должно иметь вид: $M_{mg} + M_{Mg} - M_F = 0$, или $M_{mg} = M_F - M_{Mg}$,

где $M_F = F \cdot L$ — момент силы, создаваемой силой F ,

$M_{Mg} = M \cdot g \cdot b$ — момент силы, создаваемой силой тяжести груза.

Подставив эти выражения в условие равенства моментов, получим:

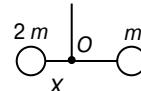
$$\frac{1}{2}m \cdot g \cdot L = F \cdot L - M \cdot g \cdot b, \text{ откуда } m = \frac{2 \cdot (F \cdot L - M \cdot g \cdot b)}{g \cdot L}.$$

$$m = \frac{2 \cdot (350 \text{ Н} \cdot 5 \text{ м} - 100 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2 \cdot 1 \text{ м})}{10 \text{ м/с}^2 \cdot 5 \text{ м}} = 30 \text{ кг}.$$

Ответ: $m = 30$ кг.

60

Два груза массами $2m$ и m закреплены на небесомом стержне длиной L . Чтобы стержень оставался в равновесии, его следует подвесить в точке O , находящейся на расстоянии X от массы $2m$. X равно



- 1) $\frac{L}{3}$ 2) $\frac{L}{6}$ 3) $\frac{L}{4}$ 4) $\frac{2L}{5}$

Дано:

$$m_1 = 2m$$

$$m_2 = m$$

$$l_1 = X$$

$$l_2 = L - X$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$$X - ?$$

Решение:

Из условия равновесия твёрдого тела

$$F_1 \cdot l_1 = F_2 \cdot l_2, \text{ или } m_1 \cdot g \cdot l_1 = m_2 \cdot g \cdot l_2,$$

$$m_1 \cdot g \cdot X = m_2 \cdot g \cdot (L - X) \text{ имеем:}$$

$$m_1 X = m_2 L - m_2 X;$$

$$(m_1 + m_2) X = m_2 L;$$

$$X = \frac{m_2}{m_1 + m_2} L;$$

$$X = \frac{m}{2m + m} \cdot L = \frac{L}{3}.$$

Ответ: 1.

ДАВЛЕНИЕ В ЖИДКОСТИ

■ Сравнение некоторых свойств жидкостей, газов и твёрдых тел

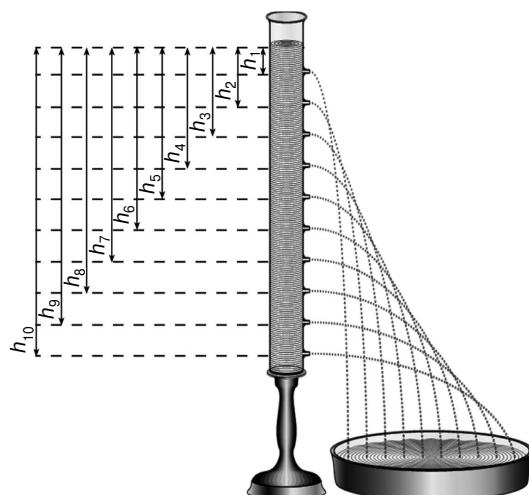
Подвижность молекул	Направление передачи давления
Твёрдое тело	
Молекулы связаны с положением равновесия, только колеблются	Передаётся в направлении действия силы
Жидкость	
Молекулы колеблются около положения равновесия, но иногда совершают перескоки	Передаётся по всем направлениям всем частицам
Газ	
Молекулы подвижны относительно друг друга	Передаётся по всем направлениям всем частицам

■ Гидростатическое давление

В газах и жидкостях существует давление, обусловленное весом. Оно называется **гидростатическим давлением**.

По напору воды (дальности струи) можно видеть, что **чем выше столб жидкости, тем большее давление** она оказывает по всем направлениям.

Давление газа на дно и стенки сосуда (и на помещённое в газ тело) создаётся **ударами беспорядочно движущихся молекул газа**.



Экспериментальное определение зависимости давления жидкости от уровня (высоты столба) жидкости: $h_1 < h_2 < h_3 \dots < h_{10}$ — разные уровни жидкости

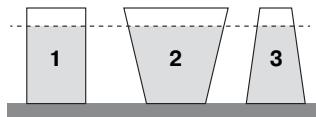
■ Давление в жидкости или газе

Расчётная формула для определения давления жидкости в любой её точке, а также на дно и стенки сосуда:

$$p = \rho \cdot g \cdot h,$$

где ρ — плотность жидкости (газа), g — ускорение свободного падения, h — высота столба жидкости.

На рисунке изображены три сосуда с водой. Площади дна сосудов равны. Сравните значения давления p_1 , p_2 и p_3 на дно каждого сосуда.



Ответ: поскольку давление жидкости на дно сосуда равно $p = \rho \cdot g \cdot h$, а высота столба жидкости во всех трёх случаях одинакова, то и давление, оказываемое на поверхность стока, одинаковое.



Практические задания

61 Давление, измеренное на дне озера, равно $4 \cdot 10^5$ Па. Определите глубину озера.

Дано:

$$p = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$g \approx 10 \text{ м/с}^2$$

$$\underline{h - ?}$$

Решение:

По формуле давления на глубине жидкости

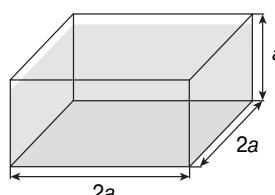
$$p = \rho \cdot g \cdot h, \text{ откуда } h = \frac{p}{\rho \cdot g},$$

где ρ — плотность жидкости (газа), g — ускорение свободного падения, h — высота столба жидкости.

$$h = \frac{4 \cdot 10^5 \text{ Па}}{10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 10 \text{ м/с}^2} = 40 \text{ м.}$$

Ответ: $h = 40$ м.

62 Аквариум, изображённый на рисунке, доверху наполнили водой. Найдите силу давления воды на дно аквариума. Плотность воды равна ρ . Атмосферное давление не учитывать.



Дано:

$$x = y = 2 \cdot a$$

$$h = a$$

$$\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$g \approx 10 \text{ м/с}^2$$

F — ?**Решение:**

По общей формуле давления

$$p = \frac{F}{S}, \text{ откуда } F = p \cdot S,$$

где $S = x \cdot y$ — площадь дна аквариума, то есть соприкасающейся поверхности.

По формуле давления на глубине жидкости

$$p = \rho \cdot g \cdot h.$$

Подставляя последнюю формулу в выражение для расчёта силы, получим:

$$F = \rho \cdot g \cdot h \cdot x \cdot y.$$

$$F = 10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 10 \text{ м/с}^2 \cdot a \cdot 2 \cdot a \cdot 2 \cdot a = 40000 \cdot a^3 \text{ Па.}$$

Ответ: $F = 40000 \cdot a^3 \text{ Па.}$

63 Чему примерно равно давление, созданное водой, на глубине 2 м?

- 1) 200 Па
- 2) 2000 Па
- 3) 5000 Па
- 4) 20 000 Па

Дано:

$$h = 2 \text{ м}$$

$$\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$g \approx 10 \text{ м/с}^2$$

p — ?**Решение:**

По формуле давления на глубине жидкости

$$p = \rho \cdot g \cdot h,$$

где $\rho (\text{кг/м}^3)$ — плотность жидкости (газа);

$g (\text{м/с}^2)$ — ускорение свободного падения;

$h (\text{м})$ — высота столба жидкости.

$$p = 10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 10 \text{ м/с}^2 \cdot 2 \text{ м} = 20000 \text{ Па.}$$

Ответ: 4.

АТМОСФЕРНОЕ ДАВЛЕНИЕ

Земля окружена **атмосферой** — воздушной оболочкой, состоящей из смеси различных газов. **Атмосферное давление** — давление атмосферы на поверхность Земли и находящиеся на ней тела.

Вес 1 м³ воздуха:

$$p = 1,29 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м}/\text{с}^2 \approx 13 \text{ Н.}$$

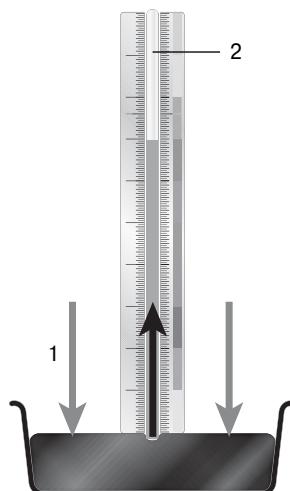
Атмосферное давление, равное давлению столба ртути высотой 760 мм при температуре 0 °C, называется **нормальным атмосферным давлением**.

Нормальное атмосферное давление равно: $p_a = 100\,000 \text{ Па} = 10^5 \text{ Па}$.

■ Атмосферное давление на различных высотах

При подъёме на каждые 12 м стопбик ртути опускается на 1 мм.

Для измерения атмосферного давления используют **барометры**.



Ртутный барометр (барометр Торричелли): 1 — давление атмосферы, 2 — зааянная трубка

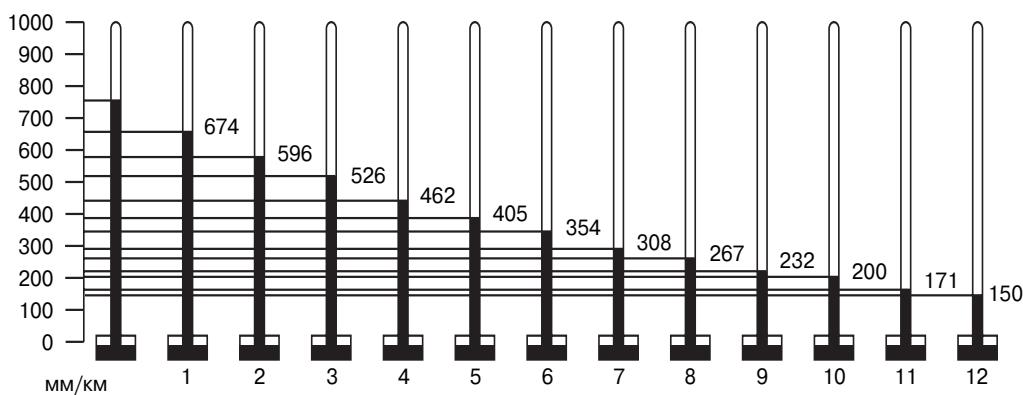


Диаграмма зависимости атмосферного давления (вертикальная ось — в мм) от высоты над уровнем моря (горизонтальная ось — в км)

ЗАКОН ПАСКАЛЯ

Давление жидкости на дно и боковые стенки сосуда зависит **от высоты столба жидкости** (см. раздел «Давление в жидкости или газе», с. 80).

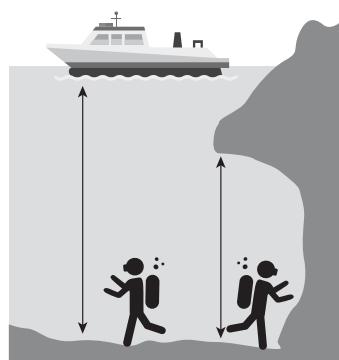
Закон Паскаля. Давление в жидкости или газе передаётся во всех направлениях одинаково и не зависит от ориентации площадки, на которую оно действует.



■ Следствие закона Паскаля

Казалось бы, давление воды в пещере (см. рисунок) должно быть меньше, чем давление в открытом море. Однако если бы это было так, то под действием большего из

давлений вода из моря устремилась бы в пещеру, и уровень воды в море стал бы понижаться. Следовательно, поскольку вода у входа в пещеру (и в море тоже) остаётся в покое, давление воды в пещере равно давлению воды в открытом море.



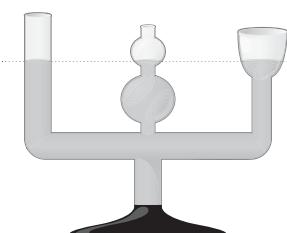
Давление воды на водолаза в открытом море и в пещере

Вывод: вне зависимости от формы и размеров сосуда давление внутри жидкости на одной и той же глубине одинаково.

СООБЩАЮЩИЕСЯ СОСУДЫ

Сосуды, соединённые между собой ниже уровня жидкости, называются сообщающимися.

Закон сообщающихся сосудов. В сосудах любой формы и ширины однородная жидкость устанавливается на одном уровне.



Пример сообщающихся сосудов

■ Условие равновесия жидкости

Давление жидкостей на дно в сообщающихся сосудах **одинаково**:

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = \dots = \rho_n,$$

где ρ_1 , ρ_2 , $\rho_3 \dots \rho_n$ — давление жидкостей в разных коленях сообщающихся сосудов.

■ Разнородные жидкости

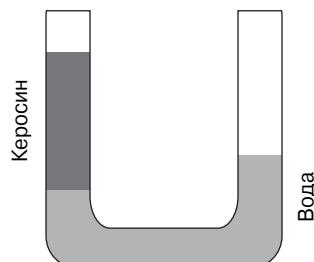
Из условия равновесия для двух жидкостей следует, что

$$\rho_1 \cdot h_1 = \rho_2 \cdot h_2,$$

где ρ_1 и ρ_2 — плотности двух жидкостей, h_1 и h_2 — высота столба жидкости в каждом колене соответственно.

Высоты столбов разнородных жидкостей в сообщающихся сосудах **обратно пропорциональны их плотностям**:

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}.$$



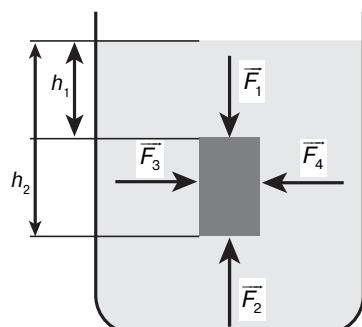
Пример сообщающихся сосудов, наполненных разными жидкостями. В левом колене — керосин, в правом — вода

ЗАКОН АРХИМЕДА

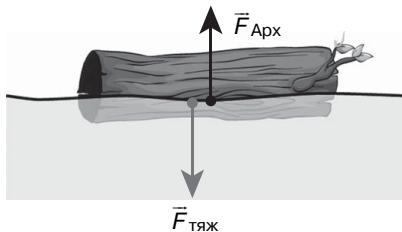
Зависимость давления в жидкости или газе от глубины погружения тела приводит к появлению выталкивающей силы (так называемой силы Архимеда), действующей на любое тело, погруженное в жидкость или газ.

■ Архимедова сила

Выталкивающая (архимедова) сила направлена всегда противоположно силе тяжести, поэтому вес тела в жидкости или газе всегда меньше веса этого тела в вакууме.



Действие жидкости на погруженное тело:
 h_1 и h_2 — высота столба жидкости над верхней и нижней гранями тела соответственно,
 \vec{F}_3 и \vec{F}_4 — силы давления жидкости, действующие на боковые грани, \vec{F}_1 и \vec{F}_2 — силы давления жидкости, действующие на верхнюю и нижнюю грани соответственно



Направление силы Архимеда \vec{F}_A и силы тяжести $\vec{F}_\text{тяж}$, действующих на бревно, плавающее в воде

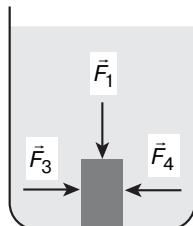
Величина архimedовой силы определяется **по закону Архимеда**:

$F_A = \rho_\text{ж} \cdot g \cdot V_t$ или $F_A = m_\text{ж} \cdot g$, где $\rho_\text{ж}$ — плотность жидкости, $g \approx 10 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения, V_t — объём погруженной в жидкость части тела, $m_\text{ж}$ — масса вытесненной жидкости.

Закон Архимеда. Тело, погруженное в жидкость или газ, теряет в своём весе столько, сколько весит вытесненная им жидкость.

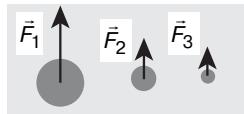
Следствия закона Архимеда

■ Сила Архимеда равна нулю, когда погруженное в жидкость тело плотно, всем основанием прижато к дну.



Действие жидкости на погруженное тело: \vec{F}_3 и \vec{F}_4 — силы давления жидкости, действующие на боковые грани, \vec{F}_1 — сила давления жидкости, действующая на верхнюю грань

■ На тело большего объёма действует большая выталкивающая сила.

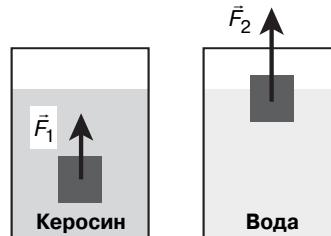


Действие жидкости на тела разного объёма: $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3$ — силы, действующие на погруженные в жидкость тела

■ В более плотной жидкости действует большая выталкивающая сила.

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

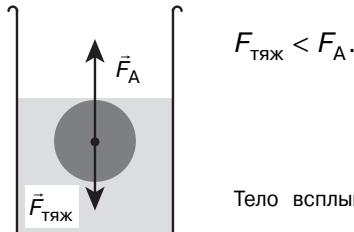
$$\rho_{\text{керосина}} = 800 \text{ кг/м}^3$$



Действие различных жидкостей (керосина и воды) на одно и то же тело: \vec{F}_1 и \vec{F}_2 — силы, действующие на тела, погруженные в керосин и воду соответственно

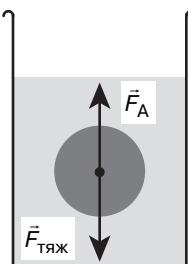
Условия плавания тел

■ Если сила тяжести меньше архimedовой силы (плотность тела меньше плотности жидкости):



Тело всплывает

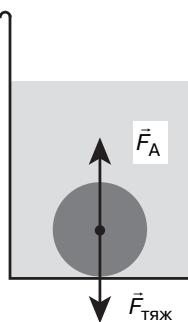
► Если сила тяжести равна архимедовой силе (плотность тела равна плотности жидкости):



$$F_{\text{тяж}} = F_A.$$

Тело плавает

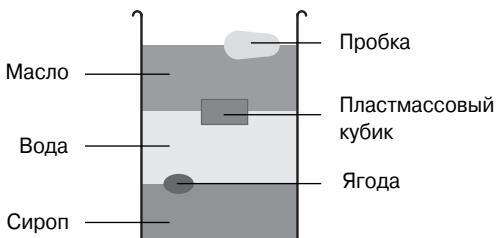
► Если сила тяжести больше архимедовой силы (плотность тела больше плотности жидкости):



$$F_{\text{тяж}} > F_A.$$

Тело тонет

Следствие: чем меньше плотность тела по сравнению с плотностью жидкости, тем меньшая часть тела погружена в жидкость.



Расположение тел и веществ разной плотности в воде

✓ В сосуде находятся три жидкости, не смешивающиеся между собой. На каком уровне будет плавать кусочек льда, брошенный в сосуд?



Ответ: лёд имеет плотность меньше, чем плотность воды, но больше, чем плотность керосина, поэтому кусочек льда, брошенный в сосуд, будет плавать на уровне 3–3.

■ Применение закона Архимеда

Закон Архимеда применяется при плавании судов и воздухоплавании.

Чем меньше плотность газа внутри шара, тем большая подъёмная сила.

Кроме того, подъёмная сила зависит от разницы температур внутри шара и окружающей среды, а также от веса груза. Воздухоплаватели сбрасывают дополнительный груз (балласт) с целью облегчения веса при потере высоты.



Практические задания

- 64** Аэростат объёмом 1000 м^3 заполнен гелием. Плотность гелия $0,18 \text{ кг}/\text{м}^3$. Плотность воздуха $1,29 \text{ кг}/\text{м}^3$. Чему равна выталкивающая сила, действующая на аэростат?

Дано:

$$V_1 = 1000 \text{ м}^3$$

$$\rho_1 = 0,18 \text{ кг}/\text{м}^3$$

$$\rho_2 = 1,29 \text{ кг}/\text{м}^3$$

$$g \approx 10 \text{ м}/\text{с}^2$$

$$F_A - ?$$

Решение:

По закону Архимеда выталкивающая (архимедова) сила не зависит от плотности погруженного тела (гелия), поэтому $F_A = \rho_2 \cdot g \cdot V_1$, где ρ_2 — плотность воздуха, $g \approx 10 \text{ м}/\text{с}^2$ — ускорение свободного падения, V_1 — объём аэростата.

$$F_A = 1,29 \text{ кг}/\text{м}^3 \cdot 10 \text{ м}/\text{с}^2 \cdot 1000 \text{ м}^3 = 12900 \text{ Н} = 12,9 \text{ кН}.$$

Ответ: $F_A = 12,9 \text{ кН}$.

- 65** Четыре одинаковых листа фанеры толщиной L каждый, связанные в стопку, плавают в воде так, что уровень воды приходится на границу между двумя средними листами. На сколько увеличится глубина погружения, если в стопку добавить ещё один такой же лист?

Решение:

В данном случае стопка плавает, а значит, сила тяжести равна силе Архимеда:

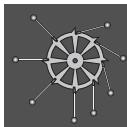
$$mg = F_A, \text{ то есть } \rho_t \cdot g \cdot 4 \cdot V_t = \rho_t \cdot g \cdot 2 \cdot V_t,$$

где mg — сила тяжести, F_A — сила Архимеда, равная по закону Архимеда $F_A = \rho_b \cdot g \cdot V_t$,

где ρ_b — плотность воды, ρ_t — плотность тела, $g \approx 10 \text{ м}/\text{с}^2$ — ускорение свободного падения, V_t — объём одного листа фанеры.

Из выражения следует, что плотность фанеры в 2 раза меньше плотности воды, а значит, если в стопку добавить ещё один такой же лист, то она снова погрузится наполовину, то есть на $2,5$ листа фанеры.

Ответ: глубина погружения увеличится на $0,5L$.



ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

Законы сохранения оказываются справедливыми для явлений различной физической природы — механического движения, теплообмена, прохождения электрического тока, распространения электромагнитных волн, взаимодействия атомов, ядер, элементарных частиц.



ВАЖНЫЕ ПОНЯТИЯ

Абсолютно неупругим ударом называют такое ударное взаимодействие, при котором тела соединяются (слипаются) друг с другом и движутся дальше как одно тело.

Абсолютно упругим ударом называется столкновение, при котором сохраняется механическая энергия системы тел.

Замкнутая система — система тел, для которой равнодействующая внешних сил равна нулю. Силы взаимодействия между телами замкнутой системы называются **внутренними силами**.

Потенциальная сила — сила, работа которой при перемещении материальной точки зависит только от начального и конечного положений точки в пространстве.

Силы, работа которых не зависит от траектории движения тела, определяются только начальным и конечным положениями, называются **консервативными**.

Консервативная система — механическая система, в которой действуют только потенциальные силы.

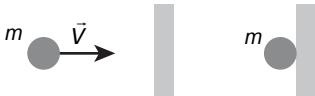
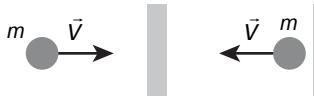
ИМПУЛЬС МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

Импульс тела (или количество движения) \vec{p} — векторная физическая величина, равная произведению массы тела на скорость его движения: $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$,

где m — масса тела, \vec{v} — его скорость.
Единицей измерения импульса в СИ является килограмм-метр в секунду (**кг · м/с**).

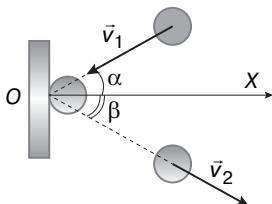
■ Примеры определения изменения импульса тела

Важную роль в физике играет изменение импульса тела. При этом необходимо обращать внимание на характер взаимодействия тел.

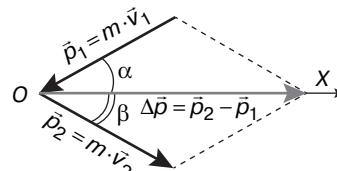
Абсолютно неупругий удар	Абсолютно упругий удар
 <p>Пример абсолютно неупротого удара (шарик «прилипает» к стенке): m — масса шарика, \vec{V} — его скорость до соударения</p>	 <p>Пример абсолютно упругого удара (шарик отскакивает с прежней по величине скоростью): m — масса шарика, \vec{V} — его скорость до и после соударения</p>
<p>Импульсы шарика до и после удара:</p> $\begin{cases} p_1 = m \cdot V \\ p_2 = 0 \end{cases}$ <p>Изменение импульса:</p> $\Delta p = p_2 - p_1 = 0 - m \cdot V = -m \cdot V$	<p>Импульсы шарика до и после удара:</p> $\begin{cases} p_1 = m \cdot V \\ p_2 = -m \cdot V \end{cases}$ <p>Изменение импульса:</p> $\Delta p = p_2 - p_1 = -m \cdot V - m \cdot V = -2 \cdot m \cdot V$

Правило параллелограмма

Если тело **движется в плоскости** (под углом к стенке), то вектор изменения импульса находится **по правилу параллелограмма** (вычитание векторов).



Для определения изменения импульса удобно использовать **диаграмму импульсов**, на которой изображаются векторы импульсов, а также **вектор разности импульсов**, построенный по правилу параллелограмма.



Определение изменения импульса в векторной форме:

OX — координатная ось (ось симметрии), m — масса шарика, \vec{v}_1 — его скорость до соударения, \vec{v}_2 — его скорость после соударения, α — угол между скоростью \vec{v}_1 и осью OX , β — угол между скоростью \vec{v}_2 и осью OX , $\vec{p}_1 = m \cdot \vec{v}_1$ — импульс тела до соударения, $\vec{p}_2 = m \cdot \vec{v}_2$ — импульс тела после соударения; $\vec{p}_2 - \vec{p}_1$ — изменение импульса

■ Импульс силы. Связь импульса тела с импульсом силы

Импульс силы $\vec{F} \cdot \Delta t$ — физическая величина, равная произведению силы на время её действия. Импульс силы — временная характеристика действия силы, векторная

физическая величина. Вектор импульса силы сонаправлен с вектором силы. Единица импульса силы — ньютон-секунда (**N · с**).

Второй закон Ньютона. Импульс силы равен изменению импульса тела:

$$\vec{F} \cdot \Delta t = \Delta \vec{p}.$$



Практические задания

66

Тело движется по прямой в одном направлении. Под действием постоянной силы величиной 5 Н за 3 с импульс тела уменьшился и стал равен 20 кг · м/с. Чему был равен первоначальный импульс тела?

Дано:

$$F = 5 \text{ Н}$$

$$t = 3 \text{ с}$$

$$p_2 = 20 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$$

$$p_1 = ?$$

Решение:

Используем связь импульса тела с импульсом силы:

$$F \cdot \Delta t = \Delta p = p_1 - p_2, \text{ откуда } p_1 = p_2 + F \cdot \Delta t.$$

$$p_1 = 20 \text{ кг} \cdot \text{м/с} + 5 \text{ Н} \cdot 3 \text{ с} = 35 \text{ кг} \cdot \text{м/с}.$$

Ответ: $p_1 = 35 \text{ кг} \cdot \text{м/с}.$

67

Тело движется по прямой под действием постоянной силы, равной по модулю 8 Н. Импульс тела изменился на 40 кг · м/с. Сколько времени для этого потребовалось?

Дано:

$$F = 8 \text{ Н}$$

$$\Delta p = 40 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$$

$$\Delta t = ?$$

Решение:

По второму закону Ньютона

$$F \cdot \Delta t = \Delta p, \text{ откуда } \Delta t = \frac{\Delta p}{F}.$$

$$\Delta t = \frac{40 \text{ кг} \cdot \text{м/с}}{8 \text{ Н}} = 5 \text{ с}.$$

Ответ: $\Delta t = 5 \text{ с}.$

68 Автомобиль массой 10^3 кг движется равномерно по мосту на высоте 5 м над землёй. Скорость автомобиля равна 10 м/с. Каков импульс автомобиля?

Дано:

$$m = 10^3 \text{ кг}$$

$$R = 5 \text{ м}$$

$$v = 10 \text{ м/с}$$

$$p - ?$$

Решение:

Импульс тела зависит от массы и скорости тела, поэтому $p = m \cdot v$.

$$p = 10^3 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с} = 10^4 \text{ кг} \cdot \text{м/с} = 10000 \text{ кг} \cdot \text{м/с}.$$

Ответ: $p = 10000 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$.

69 Легковой автомобиль и грузовик движутся со скоростями $v_1 = 108 \text{ км/ч}$ и $v_2 = 54 \text{ км/ч}$ соответственно. Масса грузовика $m = 3000 \text{ кг}$. Какова масса легкового автомобиля, если импульс грузовика больше импульса легкового автомобиля на $15000 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$?

Дано:

$$v_{\text{л}} = 108 \text{ км/ч} = 30 \text{ м/с}$$

$$v_{\text{г}} = 54 \text{ км/ч} = 15 \text{ м/с}$$

$$m_{\text{г}} = 3000 \text{ кг}$$

$$\Delta p = 15000 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$$

$$m_{\text{л}} - ?$$

Решение:

$$\text{По формуле импульса } \begin{cases} p_{\text{г}} = m_{\text{г}} \cdot v_{\text{г}} \\ p_{\text{л}} = m_{\text{л}} \cdot v_{\text{л}} \end{cases}.$$

Вычитая из первого уравнения второе, определим, на сколько импульс грузовика больше импульса легкового автомобиля:

$$p_{\text{г}} - p_{\text{л}} = m_{\text{г}} \cdot v_{\text{г}} - m_{\text{л}} \cdot v_{\text{л}} = \Delta p, \text{ откуда}$$

$$m_{\text{л}} = \frac{m_{\text{г}} \cdot v_{\text{г}} - \Delta p}{v_{\text{л}}}.$$

$$m_{\text{л}} = \frac{3000 \text{ кг} \cdot 15 \text{ м/с} - 15000 \text{ кг} \cdot \text{м/с}}{30 \text{ м/с}} = 1000 \text{ кг}.$$

Ответ: $m_{\text{л}} = 1000 \text{ кг}$.

ИМПУЛЬС СИСТЕМЫ ТЕЛ

Импульсом системы тел \vec{p} называется **векторная сумма импуль-**

сов всех тел, входящих в систему:

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n,$$

где $\vec{p}_1, \vec{p}_2 \dots \vec{p}_n$ — импульсы первого, второго, ... n -го тел соответственно.

Для импульса системы тел **выполняется второй закон Ньютона**, то есть импульс силы равен изменению импульса системы тел:

$$\vec{F} \cdot \Delta t = \Delta \vec{p},$$

где \vec{F} — равнодействующая сил, действующих на систему, t — время её действия, Δp — суммарный импульс системы тел.

ЗАКОН ИЗМЕНЕНИЯ И СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

В инерциальной системе отсчёта суммарный импульс замкнутой системы тел **остаётся постоянным** при любых взаимодействиях тел системы между собой.

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2, \text{ или}$$

$$m_1 \cdot \vec{v}_1 + m_2 \cdot \vec{v}_2 = m_1 \cdot \vec{u}_1 + m_2 \cdot \vec{u}_2,$$

где \vec{p}_1 и \vec{p}_2 — импульсы тел до взаимодействия, \vec{p}'_1 и \vec{p}'_2 — импульсы тел после взаимодействия, m_1 и m_2 — массы взаимодействующих тел, \vec{v}_1 и \vec{v}_2 — скорости тел до взаимодействия, \vec{u}_1 и \vec{u}_2 — скорости тел после взаимодействия.



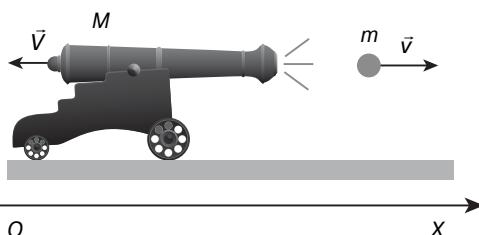
Именно **векторная сумма** импульсов остаётся **постоянной**.

Примеры реактивного движения

При стрельбе из орудия возникает отдача — снаряд движется вперёд, а орудие откатывается назад. Снаряд и орудие — два взаимодействующих тела.

Закон сохранения импульса имеет вид:

$0 = -M \cdot V + m \cdot v$, откуда $M \cdot V = m \cdot v$, где M и m — массы орудия и снаряда, V и v — скорости орудия и снаряда после выстрела.



Возникновение отдачи при стрельбе из пушки: M и m — массы орудия и снаряда, \vec{V} и \vec{v} — скорости орудия и снаряда после выстрела, OX — координатная ось

■ Реактивное движение

Реактивное движение — движение, возникающее при отделении от тела с некоторой скоростью какой-либо его части.

В ракете при сгорании топлива газы, нагретые до высокой температуры, выбрасываются из сопла

с большой скоростью относительно ракеты.

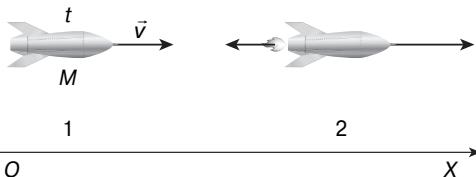
Скорость ракеты рассчитывается по формуле:

$$V = \frac{\Delta M}{M} \cdot v,$$

где M — масса ракеты, $M > 0$ — масса выброшенных газов, v — скорость истечения газов.

Если учитывать, что масса газов изменяется, то $M \cdot \vec{a} = \vec{F}_p = -\mu \cdot \vec{u}$,

где $\mu = \frac{\Delta M}{\Delta t}$ ($\Delta t \rightarrow 0$) — расход топлива в единицу времени, \vec{F}_p — реактивная сила тяги, \vec{u} — относительная скорость газов.



Ракета, движущаяся в свободном пространстве (без гравитации):

1 — в момент времени t : M — масса ракеты, \vec{v} — её скорость;
2 — в момент времени $t + \Delta t$: $M + \Delta M$ — масса ракеты, где $\Delta M < 0$, $\vec{v} + \Delta \vec{v}$ — её скорость, $\Delta M > 0$ — масса выброшенных газов, \vec{u} — относительная скорость газов;
 $\vec{v} + \vec{u}$ — скорость газов в инерциальной системе



Практические задания

70

Навстречу друг другу летят шарики из пластилина. Модули их импульсов равны соответственно $5 \cdot 10^{-2}$ кг·м/с и $3 \cdot 10^{-2}$ кг·м/с. Столкнувшись, шарики слипаются. Чему равен импульс слипшихся шариков?

Дано:

$$p_1 = 5 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$$

$$p_2 = 3 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$$

p — ?

Решение:

Имеем случай неупругого соударения. Сделаем рисунок.

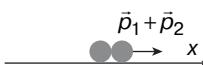
Здесь x — координатная ось, \vec{p}_1 и \vec{p}_2 — импульсы тел до соударения, $\vec{p}_1 + \vec{p}_2$ — импульс слипшихся шариков после соударения, который по закону сохранения импульса не изменится. Но поскольку импульсы шариков направлены в противоположные стороны, получается:

$$|\vec{p}_1 + \vec{p}_2| = p_1 - p_2 = (5 - 3) \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м/с} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м/с}.$$

До соударения



После соударения



Ответ: $|\vec{p}_1 + \vec{p}_2| = 2 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м/с}.$

71

Охотник массой 60 кг, стоящий на гладком льду, стреляет из ружья в горизонтальном направлении. Масса заряда 0,03 кг. Скорость дробинок при выстреле 300 м/с. Какова скорость охотника после выстрела?

Дано:

$$M = 60 \text{ кг}$$

$$m = 0,03 \text{ кг}$$

$$v = 300 \text{ м/с}$$

$$V = ?$$

Решение:

Закон сохранения импульса имеет вид:

$$M \cdot V = m \cdot v, \text{ откуда } V = \frac{m}{M} \cdot v,$$

где M и m — массы охотника и заряда,
 V и v — скорости охотника и заряда соответственно
после выстрела.

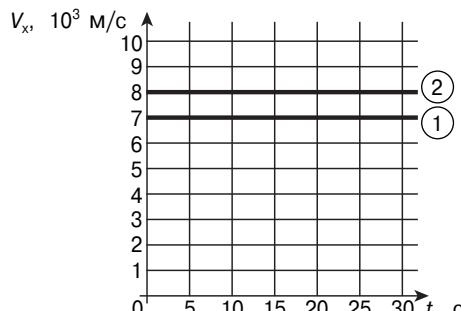
$$V = \frac{0,03 \text{ кг}}{60 \text{ кг}} \cdot 300 \text{ м/с} = 0,15 \text{ м/с.}$$

Ответ: $V = 0,15 \text{ м/с.}$

72

На экране монитора в Центре управления полётами отображены графики скоростей двух космических аппаратов после их расстыковки (см. рисунок). Масса первого из них равна 10 т, масса второго — 15 т. С какой скоростью двигались аппараты перед их расстыковкой?

- | | |
|---------------------------------|---------------------------------|
| 1) $2 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ | 3) $1 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ |
| 2) $7,4 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ | 4) $7,6 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ |

**Дано:**

$$v_1 = 8000 \text{ м/с}$$

$$v_2 = 7000 \text{ м/с}$$

$$m_1 = 10 \cdot 10^3 \text{ кг}$$

$$m_2 = 15 \cdot 10^3 \text{ кг}$$

$$v = ?$$

Решение:

Закон сохранения импульса космических аппаратов имеет вид:

$$(m_1 + m_2) \cdot v = m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2, \text{ откуда } v = \frac{m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2}.$$

$$v = \frac{10 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot 8000 \text{ м/с} + 15 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot 7000 \text{ м/с}}{10 \cdot 10^3 \text{ кг} + 15 \cdot 10^3 \text{ кг}} = 7,6 \cdot 10^3 \text{ м/с.}$$

Ответ: 4.

РАБОТА СИЛЫ НА МАЛОМ ПЕРЕМЕЩЕНИИ

Работой A , совершающейся постоянной силой, называется физическая величина, равная произведению модуля силы F и перемещения s , умноженному на косинус угла α между векторами силы и перемещения:

$$A = F \cdot s \cdot \cos \alpha.$$

Работа является **скалярной** величиной.

В системе СИ работа измеряется в джоулях (**Дж**).

Работа всех приложенных сил равна работе равнодействующей силы.

Графически работа определяется по площади фигуры под графиком $F_s(x)$:

$$A = F_s \cdot \Delta x.$$

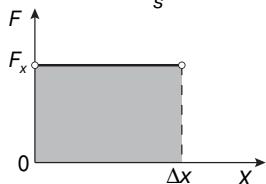


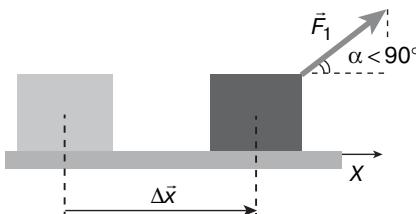
График зависимости равнодействующей силы от перемещения $F_s(x)$:

$F_s(x)$ — проекция равнодействующей силы на ось Ox , совпадающей по направлению с вектором перемещения \vec{s} ; Δx — модуль перемещения

Положительная работа — когда направление силы и направление движения тела совпадают:

$$0^\circ \leq \alpha < 90^\circ.$$

При движении тела вниз работа силы тяжести положительная.



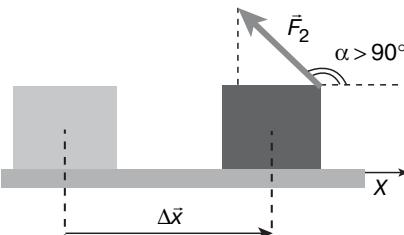
Пример положительной работы:

Δx — перемещение тела под действием силы \vec{F}_1 , $\alpha < 90^\circ$ — угол между вектором силы и вектором перемещения, X — координатная ось

Отрицательная работа — когда направление силы и направление движения тела противоположны, то есть

$$90^\circ < \alpha \leq 180^\circ.$$

Работа силы трения всегда отрицательная.



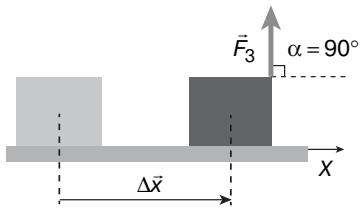
Пример отрицательной работы:

Δx — перемещение тела под действием силы \vec{F}_2 , $\alpha > 90^\circ$ — угол между вектором силы и вектором перемещения, X — координатная ось

Работа равна нулю в следующих случаях

- Если сила перпендикулярна перемещению — $\alpha = 90^\circ$.

Работа силы реакции опоры, перпендикулярной перемещению, равна нулю.



Пример работы, равной нулю:

Δx — перемещение тела под действием силы F_3 , $\alpha=90^\circ$ — угол между вектором силы и вектором перемещения, X — координатная ось

2. Если тело перемещается, а сила равна нулю.

При движении по инерции работа не совершается.

3. Если сила действует, а тело не перемещается.

■ Формулы и особенности работы некоторых сил

Работа силы тяжести зависит от высоты подъёма и не зависит от угла наклона плоскости:

$$A_{\text{тяж}} = mgh,$$

где m — масса тела, $g \approx 10 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения, h — высота подъёма (спуска) тела.

Работа консервативных сил на замкнутой траектории равна нулю.

Сила тяжести совершает положительную работу, когда какое-нибудь тело опускается, и отрицательную работу, когда тело поднимается.

Работа силы тяжести:

■ не зависит от формы траектории;

- не зависит от выбора нулевого уровня;
- на замкнутой траектории равна нулю.

Работа силы упругости:

$$A_{\text{упр}} = \frac{k \cdot x^2}{2},$$

где k — коэффициент жёсткости пружины, x — смещение тела от положения равновесия. Работа силы упругости на замкнутой траектории равна нулю.

Работа силы трения:

■ на горизонтальной поверхности:
 $A_{\text{тр}} = -\mu \cdot m \cdot g \cdot s$, где μ — коэффициент трения, m — масса тела, g — ускорение свободного падения, s — пройденный телом путь;

■ при движении до полной остановки (на тормозном пути):
 $A_{\text{тр}} = -\frac{m \cdot v^2}{2}$, где m — масса тела, v — начальная скорость тела.

Сила трения не является консервативной. Работа силы трения зависит от длины пути.

✓ Шарик скатывали с горки по трём желобам с разными траекториями. В начале пути скорости шарика одинаковы. В каком случае скорость шарика в конце пути наибольшая? Трением пренебречь.

Ответ: поскольку работа силы тяжести не зависит от формы траектории, а зависит только от высоты подъёма, то её работа, как и скорость шарика, во всех трёх случаях будет одинакова.



Практические задания

73 Мальчик тянет санки за верёвку с силой 50 Н. Протащив санки на расстояние 1 м, он совершил механическую работу 50 Дж. Определите угол между верёвкой и дорогой.

- 1) 0° 2) 30° 3) 45° 4) 90°

Дано:

$$F = 50 \text{ Н}$$

$$s = 1 \text{ м}$$

$$A = 50 \text{ Дж}$$

$$\alpha - ?$$

Решение:

Из определения работы $A = F \cdot s \cdot \cos\alpha$ выразим искомую величину: $\cos\alpha = \frac{A}{F \cdot s}$.

$$\cos\alpha = \frac{50 \text{ Дж}}{50 \text{ Н} \cdot 1 \text{ м}} = 1, \text{ то есть } \alpha = 0^\circ.$$

Ответ: 1.

74 Ящик скользит по горизонтальной поверхности. На рисунке приведён график зависимости работы силы трения от пройденного пути. Какой участок был наиболее скользким?

- 1) только от 0 до 1 м
2) только от 1 до 5 м
3) только от 5 до 5,5 м
4) от 0 до 1 м и от 5 до 5,5 м

Решение:

Из определения работы $A = F \cdot s \cdot \cos\alpha$ сила трения пропорциональна работе, то есть чем больше совершена работа, тем больше сила трения.

Учитывая формулу силы трения: $F = \mu \cdot N$.

Сила трения больше там, где больше коэффициент трения. Наиболее скользкий участок там, где коэффициент трения меньше. Значит, там, где работа наименьшая, будет наиболее скользкий участок.

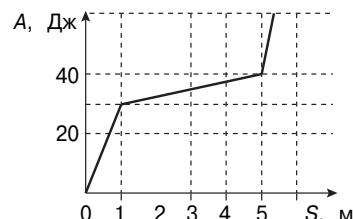
$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{A}{N \cdot s \cdot \cos\alpha} = k \cdot \frac{A}{s}.$$

Вычислим коэффициент трения на каждом участке:

$$\mu_{01} = k \cdot \frac{30 \text{ Дж}}{1 \text{ м}} = 3k; \quad \mu_{15} = k \cdot \frac{10 \text{ Дж}}{4 \text{ м}} = 2,5k; \quad \mu_{56} = k \cdot \frac{60 \text{ Дж}}{0,5 \text{ м}} = 120k.$$

Коэффициент трения на участке 1–5 наименьший.

Ответ: 2.



МОЩНОСТЬ СИЛЫ

Скорость совершения работы характеризуют физической величиной, называемой мощностью.

■ Средняя и мгновенная мощность

Средняя мощность $P_{\text{ср}}$ (иногда обозначается $N_{\text{ср}}$) — скалярная физическая величина, равная отношению работы к промежутку времени, за который она совершена:

$$P_{\text{ср}} = \frac{A}{t},$$

где A — работа силы, t — время совершения работы.

Единица мощности — ватт (**Вт**). Внесистемная единица мощности — лошадиная сила (л. с.).

Мгновенная мощность P (иногда обозначается N) — скалярная физическая величина, равная отношению работы к промежутку времени Δt , в течение которого она совершена (при $\Delta t \rightarrow 0$):

$$\begin{aligned} P &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta A}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F_x \cdot \Delta S}{\Delta t} = \\ &= F \cdot \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} = F \cdot v, \end{aligned}$$

где A — работа силы, Δt — время совершения работы, F_x — проекция силы, которая совершает работу, ΔS — перемещение, совершающееся под действием этой силы за время Δt , v_x — проекция мгновенной скорости на направление перемещения.

Мгновенная мощность равна произведению скорости тела на проекцию силы, действующей на тело, на направление скорости.



Практические задания

75

Подъёмный кран равномерно поднимает груз массой 2 т на высоту 10 м. За какое время поднимается груз, если мощность двигателя крана 10 кВт? Потери энергии незначительны.

Дано:

$$m = 2 \text{ т} = 2000 \text{ кг}$$

$$h = 10 \text{ м}$$

$$P = 10 \text{ кВт} = 10000 \text{ Вт}$$

$$g \approx 10 \text{ м/с}^2$$

$$t = ?$$

Решение:

Из определения мощности $P = \frac{A}{t}$ выразим ис-
комое время: $t = \frac{A}{P}$,

где A — работа крана, равная работе силы
тяжести: $A = mgh$.

$$\text{Тогда } t = \frac{mgh}{P}; \quad t = \frac{2000 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2 \cdot 10 \text{ с}}{10000 \text{ Вт}} = 20 \text{ с.}$$

Ответ: $t = 20 \text{ с.}$

76 Человек, равномерно поднимая верёвку, достал ведро с водой из колодца глубиной 10 м. Масса ведра 1,5 кг, масса воды в ведре 10 кг. Какую работу он при этом совершил?

Дано:

$$h = 10 \text{ м}$$

$$M = 1,5 \text{ кг}$$

$$m = 10 \text{ кг}$$

$$g \approx 10 \text{ м/с}^2$$

$$A - ?$$

Решение:

Из определения работы: $A = F \cdot h \cdot \cos \alpha$, где F — сила натяжения верёвки, равная по третьему закону Ньютона силе тяжести: $F = (M+m) \cdot g$.

Угол $\alpha = 0$ ($\cos \alpha = 1$) — угол между силой натяжения и перемещением (см. рисунок).

$$\text{Получим: } A = (M+m) \cdot g \cdot h;$$

$$A = (1,5 \text{ кг} + 10 \text{ кг}) \cdot 10 \text{ м/с}^2 \cdot 10 \text{ м} = 1150 \text{ Дж.}$$

Ответ: $A = 1150 \text{ Дж.}$

КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

Энергия — от греч. *energeia* — действие; кинетическая — от *kinetikos* — приводящий в движение.

Кинетическая энергия тела E_k — скалярная физическая величина, равная половине произведения массы тела на квадрат его скорости:

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2},$$

m — масса тела, v — скорость.

Кинетическая энергия, как и работа, измеряется в джоулях (**Дж**).

■ Закон изменения кинетической энергии системы материальных точек

Изменение кинетической энергии материальной точки равно работе всех сил, действующих на точку:

$$E_k - E_{k0} = A,$$

где E_{k0} и E_k — начальная и конечная кинетическая энергия тела, A — работа равнодействующей силы.



Практические задания

77 Тележка движется со скоростью 3 м/с. Её кинетическая энергия равна 27 Дж. Какова масса тележки?

- 1) 6 кг 2) 9 кг 3) 18 кг 4) 81 кг

Дано:

$$v = 3 \text{ м/с}$$

$$E_k = 27 \text{ Дж}$$

$$m - ?$$

Решение:

По формуле кинетической энергии $E_k = \frac{m \cdot v^2}{2}$ выразим массу: $m = \frac{2 \cdot E_k}{v^2}$.

$$m = \frac{2 \cdot 27 \text{ Дж}}{(3 \text{ м/с})^2} = 6 \text{ кг.}$$

Ответ: 1.**78**

Автомобиль, движущийся с выключенным двигателем, на горизонтальном участке дороги имеет скорость 30 м/с. Затем автомобиль стал перемещаться вверх по склону горы под углом 30° к горизонту. Какой путь он должен пройти по склону, чтобы его скорость уменьшилась до 20 м/с? Трением пренебречь.

Дано:

$$v_1 = 30 \text{ м/с}$$

$$v_2 = 20 \text{ м/с}$$

$$\alpha = 30^\circ$$

$$g \approx 10 \text{ м/с}^2$$

$$s - ?$$

Решение:

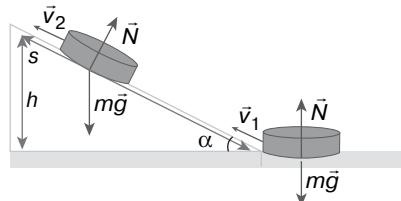
В данном случае кинетическая энергия автомобиля изменяется за счёт преодоления силы тяжести (см. рисунок ниже):

$$A_{\text{тр}} = \frac{m \cdot v_1^2}{2} - \frac{m \cdot v_2^2}{2} = m \cdot g \cdot h,$$

где m — масса автомобиля, $h = s \cdot \sin \alpha$ — высота подъёма, s — пройденный путь. Тогда

$$\frac{m \cdot v_1^2}{2} - \frac{m \cdot v_2^2}{2} = m \cdot g \cdot s \cdot \sin \alpha, \text{ откуда } s = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2 \cdot g \cdot \sin \alpha}.$$

$$s = \frac{(30 \text{ м/с})^2 - (20 \text{ м/с})^2}{2 \cdot 10 \text{ м/с}^2 \cdot \sin 30^\circ} = 50 \text{ м.}$$

Ответ: $s = 50 \text{ м.}$ 

ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

Потенциальная энергия тела в данной точке — скалярная физическая величина, равная работе, совершающей потенциальной силой при перемещении тела из этой точки в точку, принятую за нуль отсчёта потенциальной энергии.

Единица измерения потенциальной энергии — джоуль (**Дж**).

Потенциальная энергия — это **энергия взаимодействия** тел или частей одного тела.

■ Потенциальная энергия тела в однородном поле тяжести

Потенциальная энергия двух тел — это энергия тела в гравитационном поле (энергия взаимодействия с Землёй). Потенциальная энергия в этом случае характеризует энергию гравитационного притяжения материальной точки к Земле.

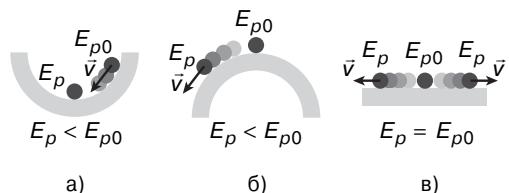
$$E_p = m \cdot g \cdot h,$$

где m — масса тела, $g \approx 10 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения, h — высота над Землёй. Чем выше над Землёй находится тело, тем большую работу оно может совершить при падении.

Например, энергия падающей воды используется в работе гидроэлектростанций.

■ Виды равновесия

Состояние с меньшей потенциальной энергией является **энергетически выгодным**.



Три возможных случая равновесия шара, находящегося на опоре:

E_{p0} — потенциальная энергия тела в начальном положении, E_p — потенциальная энергия тела в конечном положении

Принцип минимума потенциальной энергии: любая замкнутая система стремится перейти в такое состояние, в котором её потенциальная энергия минимальна.

Устойчивое равновесие — равновесие, при котором тело, выведенное из положения равновесия, возвращается в первоначальное положение (рис. а).

Неустойчивое равновесие — равновесие, при котором тело, выведенное из положения равновесия, не возвращается в первоначальное положение (рис. б).

Безразличное равновесие — равновесие, при котором соседние положения тела также являются равновесными (рис. в).

■ Потенциальная энергия деформированной пружины

Потенциальная энергия **частей одногого тела** — это энергия частей упруго деформированного тела (энергия растянутой или сжатой пружины):

$$E_p = \frac{k \cdot x^2}{2},$$

где k — коэффициент жёсткости пружины, x — смещение тела от положения равновесия.

Чем больше сжата или растянута пружина, **тем большую работу** она может совершить при освобождении от деформирующей силы.

Например, энергия натянутой тетивы лука используется при стрельбе.



Практические задания

- 79** Камень массой 1 кг брошен вертикально вверх. В начальный момент его энергия равна 200 Дж. На какую максимальную высоту поднимется камень? Сопротивлением воздуха пренебречь.

Дано:

$$m = 1 \text{ кг}$$

$$E_0 = 200 \text{ Дж}$$

$$g \approx 10 \text{ м/с}^2$$

$$h — ?$$

Решение:

В данном случае камень, поднимаясь на высоту, увеличит свою потенциальную энергию за счёт начальной энергии:

$$E_0 = m \cdot g \cdot h, \text{ откуда } h = \frac{E_0}{m \cdot g}.$$

$$h = \frac{200 \text{ Дж}}{1 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2} = 20 \text{ м.}$$

Ответ: $h = 20 \text{ м.}$

- 80** Легковой автомобиль и грузовик движутся по мосту. Их массы $m_1 = 1000 \text{ кг}$ и $m_2 = 3000 \text{ кг}$ соответственно. Во сколько раз потенциальная энергия грузовика относительно уровня воды больше потенциальной энергии легкового автомобиля?

- 1) в 1,5 раза 2) в 6 раз 3) в 3 раза 4) в 4 раза

Дано:

$$m_1 = 1000 \text{ кг}$$

$$m_2 = 3000 \text{ кг}$$

$$h_1 = h_2 = h$$

$$g \approx 10 \text{ м/с}^2$$

$$\frac{E_2}{E_1} — ?$$

Решение:

По формуле потенциальной энергии $\begin{cases} E_1 = m_1 \cdot g \cdot h \\ E_2 = m_2 \cdot g \cdot h \end{cases}$.

Разделив второе уравнение на первое, получим:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{m_2}{m_1} = \frac{3000 \text{ кг}}{1000 \text{ кг}} = 3.$$

Ответ: 3.

81 Недеформированную пружину жёсткостью 30 Н/м растянули на 0,04 м. Чему равна потенциальная энергия растянутой пружины?

Дано:

$$k = 30 \text{ Н/м}$$

$$x = 0,04 \text{ м}$$

$$E_p - ?$$

Решение:

По формуле потенциальной энергии

$$E_p = \frac{k \cdot x^2}{2},$$

где k — коэффициент жёсткости пружины, x — растяжение пружины.

$$E_p = \frac{30 \text{ Н/м} \cdot (0,04 \text{ м})^2}{2} = 0,024 \text{ Дж.}$$

Ответ: $E_p = 0,024 \text{ Дж.}$

82 Ученик исследовал зависимость модуля силы упругости F пружины от её растяжения x и получил следующие результаты:

$F, \text{ Н}$	0	0,5	1	1,5	2	2,5
$x, \text{ м}$	0	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10

Определите потенциальную энергию пружины при её растяжении на 0,08 м.

- 1) 0,04 Дж 2) 0,16 Дж 3) 25 Дж 4) 0,08 Дж

Решение:

Из формулы силы упругости пружины

$$F = k \cdot x, \text{ откуда } k = \frac{F}{x} = \frac{2 \text{ Н}}{0,08 \text{ м}} = 25 \text{ Н/м.}$$

По формуле потенциальной энергии

$$E_p = \frac{k \cdot x^2}{2} = \frac{25 \text{ Н/м} \cdot (0,08 \text{ м})^2}{2} = 0,08 \text{ Дж.}$$

Ответ: 4.

ЗАКОН ИЗМЕНЕНИЯ И СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Полная механическая энергия системы — сумма её кинетической и потенциальной энергии:

$$E = E_k + E_p,$$

где E_k — кинетическая энергия системы, E_p — её потенциальная энергия.

Формулировка 1. Закон изменения и сохранения механической энергии: в замкнутой системе полная механическая энергия тел остаётся постоянной при любых взаимодействиях:

$$E = E_k + E_p.$$

Формулировка 2. Закон сохранения и превращения энергии: при любых физических взаимодействиях энергия не возникает и не исчезает. Она лишь превращается из одной формы в другую.

Закон сохранения энергии лежит в основе работы всех действующих механизмов.

Так, потенциальная энергия растянутой тетивы лука или сжатой пружины переходит в кинетическую энергию выпущенной стрелы или пули. То есть при расчёте учитывается зависимость скорости движения от деформации или высоты подъёма тела:

$$v = \sqrt{2gh} \text{ или } v = \sqrt{\frac{k}{m}}x.$$

■ Роль силы трения

Если между телами замкнутой системы действуют силы трения, то механическая энергия не сохраняется. Часть этой энергии превращается во внутреннюю энергию тел (нагревание). Одним из следствий закона сохранения и превращения энергии является утверждение о **невозможности создания вечного двигателя** — машины, которая могла бы неопределённо долго совершать работу, не расходуя при этом энергию.



Практические задания

83

Мальчик на санках спустился с ледяной горы высотой 10 м и проехал по горизонтали до остановки 50 м. Сила трения при его движении по горизонтальной поверхности равна 80 Н. Чему равна общая масса мальчика с санками? Считать, что по склону горы санки скользили без трения.

Дано:

$$\begin{aligned} h &= 10 \text{ м} \\ s &= 50 \text{ м} \\ F_{\text{тр}} &= 80 \text{ Н} \\ g &\approx 10 \text{ м/с}^2 \\ m - ? \end{aligned}$$

Решение:

Скорость санок в конце ледяной горы найдём по закону сохранения энергии:

$$\frac{m \cdot v^2}{2} = m \cdot g \cdot h, \text{ откуда } v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}.$$

При движении по горизонтальной поверхности сила трения по второму закону Ньютона сообщает ускорение: $F_{\text{тр}} = m \cdot a$,

которое найдём из формулы перемещения:

$$s = \frac{v^2}{2 \cdot a}. \text{ То есть } a = \frac{v^2}{2 \cdot s} = \frac{2 \cdot g \cdot h}{2 \cdot s} = \frac{g \cdot h}{s}.$$

$$\text{Тогда } F_{\text{тр}} = \frac{m \cdot g \cdot h}{s}, \text{ откуда } m = \frac{F_{\text{тр}} \cdot s}{g \cdot h}.$$

$$m = \frac{80 \text{ Н} \cdot 50 \text{ м}}{10 \text{ м/с}^2 \cdot 10 \text{ м}} = 40 \text{ кг.}$$

Ответ: $m = 40 \text{ кг.}$

84

Тело массой 1 кг, брошенное с уровня земли вертикально вверх, упало обратно. Перед ударом о землю оно имело кинетическую энергию 200 Дж. С какой скоростью тело было брошено вверх? Сопротивлением воздуха пренебречь.

- 1) 10 м/с 2) 20 м/с 3) 30 м/с 4) 40 м/с

Дано:

$$\begin{aligned} m &= 1 \text{ кг} \\ g &= 10 \text{ м/с}^2 \\ E_k &= 200 \text{ Дж} \\ v_0 - ? \end{aligned}$$

Решение:

По закону сохранения энергии перед ударом о землю тело имеет такую же кинетическую энергию, как и в момент броска, значит:

$$E_k = \frac{m \cdot v_0^2}{2}, \text{ откуда } v_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot E_k}{m}}.$$

$$v_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot 200 \text{ Дж}}{1 \text{ кг}}} = 20 \text{ м/с.}$$

Ответ: 2.

85

Скорость брошенного мяча непосредственно перед ударом о стену была вдвое больше его скорости сразу после удара. Какое количество теплоты выделилось при ударе, если сразу после удара кинетическая энергия мяча равнялась 10 Дж?

Дано:

$$v_1 = 2 \cdot v_2$$

$$E_{k2} = 10 \text{ Дж}$$

$$g \approx 10 \text{ м/с}^2$$

$$Q - ?$$

Решение:

Кинетическая энергия мяча уменьшилась за счёт потери энергии на теплоту:

$$\begin{aligned} Q &= E_{k1} - E_{k2} = \frac{m \cdot v_1^2}{2} - \frac{m \cdot v_2^2}{2} = \frac{m \cdot (2 \cdot v_2)^2}{2} - \frac{m \cdot v_2^2}{2} = \\ &= 4 \cdot \frac{m \cdot v_2^2}{2} - \frac{m \cdot v_2^2}{2} = 3 \cdot \frac{m \cdot v_2^2}{2} = 3 \cdot E_{k2}. \end{aligned}$$

$$Q = 3 \cdot 10 \text{ Дж} = 30 \text{ Дж}.$$

Ответ: $Q = 30 \text{ Дж}$.**86**

Шарик массой 100 г падает с высоты 10 м с нулевой начальной скоростью. К моменту падения на землю потеря полной механической энергии за счёт сопротивления воздуха составила 10 %. Какова кинетическая энергия шарика в этот момент?

Дано:

$$v_0 = 0$$

$$m = 0,1 \text{ кг}$$

$$h = 10 \text{ м}$$

$$E_2 = 0,9 \cdot E_1$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$$E_{k2} - ?$$

Решение:

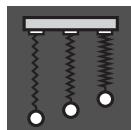
Полная энергия шарика равна максимальной потенциальной энергии на высоте $h = 10 \text{ м}$: $E = m \cdot g \cdot h$.

Она уменьшилась за счёт потери энергии на теплоту и стала равна: $E = E_2 = 0,9 \cdot E_1 = 0,9 \cdot m \cdot g \cdot h$.

В момент падения кинетическая энергия равна полной энергии: $E_k = 0,9 \cdot m \cdot g \cdot h$.

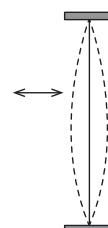
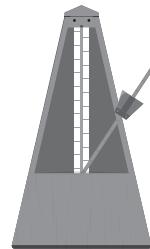
$$E_k = 0,9 \cdot 0,1 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2 \cdot 10 \text{ м} = 9 \text{ Дж}.$$

Ответ: $E_k = 9 \text{ Дж}$.



МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Колебательное движение является периодическим (см. раздел «Механическое движение», с. 6). Примеры колебательного движения: взмахи крыльев комара, пчелы, птицы; качание веток деревьев; движения качелей и мяча при ударах о пол; ход поршня в моторе автомобиля и т. д. Во всех приведённых случаях колебания вызываются внешними силами — мышцами, ветром, силой человека, электрическим током и расширяющимся газом.



Примеры колебательного движения:
а) шарика на нити; б) груза на пружине; в) задетой струны

ВАЖНЫЕ ПОНЯТИЯ

Механическими колебаниями называются движения тел, точно повторяющиеся через одинаковые промежутки времени.

Закон движения тела, совершающего колебания, задаётся с помощью некоторой периодической функции времени: $x = f(t)$.

ПЕРИОД И ЧАСТОТА КОЛЕБАНИЙ

Период колебаний T — минимальный интервал времени, через который движение повторяется:

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

где t — время одного оборота по окружности, N — число колебаний за время t .

Единица измерения — секунда (**с**).

Частота колебаний v — число колебаний в единицу времени:

$$v = \frac{N}{t} = \frac{1}{T}.$$

Единица измерения — герц (**Гц**).

Циклическая частота ω — физическая величина, равная

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot v.$$

Единица циклической частоты — радиан в секунду (**рад/с или с⁻¹**).

Смещение x — отклонение тела от положения равновесия. Единица измерения — метр (**м**).

Амплитуда колебаний A , r , X_{\max} — максимальное отклонение колеблющейся величины от положения равновесия. Единица измерения — метр (**м**).

■ Виды колебаний

Незатухающие колебания — колебания, амплитуда которых не изменяется с течением времени.

В реальности любые колебания со временем прекращаются, поэтому незатухающими они являются только приблизенно — за короткий интервал времени, например если однократно толкнуть качели.



График незатухающих колебаний (зависимость координаты x от времени t): X_0 — амплитуда (начальная координата) колебаний

Затухающие колебания — колебания, амплитуда которых уменьшается с течением времени до нуля.

Если качели прекратить раскачивать, то они постепенно останавливаются.

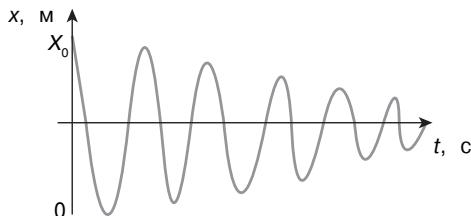
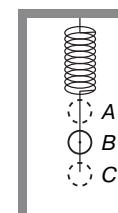


График затухающих колебаний (зависимость координаты x от времени t): X_0 — амплитуда (начальная координата) колебаний

Свободные колебания — колебания, происходящие под действием внутренних сил.

Условия возникновения свободных колебаний:

- наличие энергии, избыточной по сравнению с энергией системы в положении устойчивого равновесия;
- наличие инертности;
- работа силы трения в системе должна быть значительно меньше избыточной энергии.



Груз, подвешенный на пружине, совершает свободные колебания между точками A и C относительно положения равновесия B (если пренебречь силой трения)

Главной особенностью систем, в которых происходят свободные колебания, является **наличие** у них положения **устойчивого равновесия**.

Вынужденные колебания — колебания, происходящие под действием внешней периодически изменяющейся силы.

Вынужденные колебания являются незатухающими.



Спортсмен, подтягивающийся на перекладине, совершает вынужденные колебания. Для колебаний мышечная сила спортсмена является внешней силой.



Период маятника на колокольной башне Биг-Бен в Лондоне $T = 4$ с, период астрономического маятника $T = 1$ с.

■ Механические колебательные системы (модели)

Маятник на нити (математический маятник)	Маятник на пружине (физический маятник)
<p>Точка 1 — положение равновесия, точки 2 и 3 — точки максимального смещения от положения равновесия.</p> <p>Период колебаний: $T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}$, где l — длина нити, g — ускорение свободного падения.</p> <p>Частота колебаний:</p> $\nu = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{l}}$ <p>Циклическая частота:</p> $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$	<p>Точка 1 — положение равновесия, точки 2 и 3 — точки максимального смещения от положения равновесия.</p> <p>Период колебаний: $T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}}$, где m — масса груза, k — жёсткость пружины.</p> <p>Частота колебаний:</p> $\nu = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}$ <p>Циклическая частота:</p> $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$

>>>

Маятник на нити (математический маятник)	Маятник на пружине (физический маятник)
Период свободных колебаний маятника не зависит от начальных условий (амплитуда, скорость), а полностью определяется собственными характеристиками колебательной системы (длиной нити l)	Период свободных колебаний маятника не зависит от начальных условий (амплитуда, скорость), а полностью определяется собственными характеристиками колебательной системы (жёсткостью k и массой m для физического маятника)



Обратите внимание: если изменить амплитуду колебаний, то период и частота маятника останутся прежними, но значительно изменится запас полной энергии в системе.



Практические задания

87 Какое утверждение верно?

- 1) Свободным является колебание груза, подвешенного к пружине, после однократного его отклонения от положения равновесия.
- 2) Свободным является колебание мембранны громкоговорителя во время работы приёмника.

Ответ: 1.

Пояснение:

Мембрана громкоговорителя во время работы приёмника колеблется под действием внешних сил, поэтому свободным является только колебание груза, подвешенного к пружине, после однократного его отклонения от положения равновесия.

88 К пружине жёсткостью 40 Н/м подведен груз массой 0,1 кг. Найдите период свободных колебаний этого пружинного маятника. Ответ округлите до десятых.

Дано:

$$k = 40 \text{ Н/м}$$

$$m = 0,1 \text{ кг}$$

$$T = ?$$

Решение:

По формуле периода колебаний груза

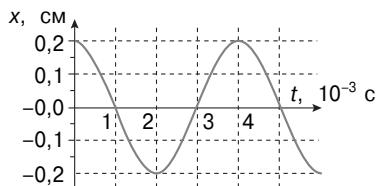
$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{0,1 \text{ кг}}{40 \text{ Н/м}}} \approx 0,3 \text{ с},$$

где m — масса груза, k — жёсткость пружины.

Ответ: $T \approx 0,3$ с.

89

На рисунке представлен график зависимости смещения определённой точки колеблющейся струны от времени. Найдите по графику, чему равна амплитуда колебаний данной точки.

**Решение:**

Из графика видно, что максимальное смещение координаты равно 0,2.

Ответ: 0,2 см.

90

Груз, подвешенный на пружине жёсткостью 400 Н/м, совершает свободные гармонические колебания. Какой должна быть жёсткость пружины, чтобы частота колебаний этого груза увеличилась в 2 раза?

Дано:

$$k_1 = 400 \text{ Н/м}$$

$$\frac{v_2}{v_1} = 2$$

$$\underline{k_2 - ?}$$

Решение:

Частота колебаний обратно пропорциональна периоду и равна:

$$\begin{cases} v_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{k_1}{m}} \\ v_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{k_2}{m}} \end{cases}$$

Разделив второе уравнение на первое, получим:

$$\frac{v_2}{v_1} = \sqrt{\frac{k_2}{k_1}}, \text{ откуда } k_2 = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \cdot k_1.$$

$$k_2 = (2)^2 \cdot 400 \text{ Н/м} = 1600 \text{ Н/м}.$$

Ответ: $k_2 = 1600 \text{ Н/м}$.

ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ. КИНЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Гармоническими колебаниями называются такие периодические колебательные движения, при которых

смещение тела от положения равновесия совершается **по закону синуса или косинуса**:

$$x = A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0),$$

где x — координата, A — амплитуда колебаний, ω — циклическая частота, t — время, φ_0 — начальная фаза колебаний.

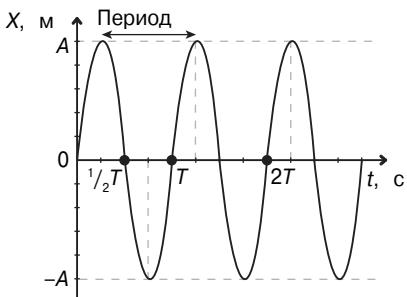


График гармонических колебаний: X — координата, t — время, T — период колебаний, A — амплитуда колебаний

■ Связь амплитуды колебаний исходной величины с амплитудами колебаний её скорости и ускорения

Скорость тела при колебательном движении также меняется по синусоидальному (косинусоидальному)

закону с теми же периодом и частотой:

$$v = v_{\max} \cdot \sin \omega t, \quad v_{\max} = A \cdot \omega,$$

где v — скорость тела в заданный момент времени t , v_{\max} — амплитуда скорости, A — амплитуда колебаний, ω — циклическая частота.

Полезно вспомнить из математики, что скорость является производной пути (координаты) по времени. Это позволяет быстро находить скорость из уравнения координаты.

■ Ускорение при колебательном движении

Ускорение тела при колебательном движении меняется по синусоидальному (косинусоидальному) закону с теми же периодом и частотой:

$$a = a_{\max} \cdot \cos(\omega \cdot t), \quad a_{\max} = A \cdot \omega^2,$$

где a — ускорение тела в заданный момент времени t , a_{\max} — амплитудное значение ускорения, A — амплитуда колебаний, ω — циклическая частота.

Полезно знать, что ускорение является производной скорости по времени.



Практические задания

91

Груз массой 2 кг, закреплённый на пружине жёсткостью 200 Н/м, совершает гармонические колебания. Максимальное ускорение груза при этом равно 10 м/с². Какова максимальная скорость груза?

Дано:

$$\begin{aligned}m &= 2 \text{ кг} \\k &= 200 \text{ Н/м} \\a_{\max} &= 10 \text{ м/с}^2 \\v_{\max} &=?\end{aligned}$$

Решение:

Уравнение движения груза: $x = x_{\max} \cdot \cos(\omega \cdot t)$,
где $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ — угловая (циклическая) частота, равная:

$$\omega = \sqrt{\frac{200 \text{ Н/м}}{2 \text{ кг}}} = 10 \text{ с}^{-1}.$$

Подставляя в уравнение движения, получим:
 $x = x_{\max} \cdot \cos(10 \cdot t)$.

Скорость — производная координаты по времени,
поэтому

$$v = x'(t) = -10 \cdot x_{\max} \cdot \sin(10 \cdot t), \text{ откуда } v_{\max} = -10 \cdot x_{\max}.$$

Ускорение — производная скорости по времени:
 $a = v'(t) = -10 \cdot 10 \cdot x_{\max} \cdot \cos(10 \cdot t) = -100 \cdot x_{\max} \cdot \cos(10 \cdot t)$.

Учитывая условие: $a_{\max} = -100 \cdot x_{\max} = 10 \text{ м/с}^2$,

$$\text{то есть } |x_{\max}| = \frac{10 \text{ м/с}^2}{100} = 0,1 \text{ м}.$$

$$\text{Тогда } |v_{\max}| = 10 \cdot 0,1 \text{ м} = 1 \text{ м/с}.$$

Ответ: $v_{\max} = 1 \text{ м/с}$.

92

Скорость тела, совершающего гармонические колебания, меняется с течением времени в соответствии с уравнением $v = 3 \cdot 10^{-2} \sin 2t$, где все величины выражены в СИ. Какова амплитуда колебаний скорости?

Решение:

Амплитуда колебаний A — величина, стоящая перед знаком косинуса или синуса. Из уравнения: $A = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$.

Ответ: $A = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$.

93

С какой скоростью проходит положение равновесия груз пружинного маятника, имеющий массу 0,1 кг, если жёсткость пружины 10 Н/м, а амплитуда колебаний 5 см?

Дано:

$$m = 0,1 \text{ кг}$$

$$k = 10 \text{ Н/м}$$

$$A = 5 \text{ см} = 0,05 \text{ м}$$

$$v_{\max} - ?$$

Решение:

Составим уравнение гармонических колебаний груза:
 $x = A \cdot \cos(\omega \cdot t)$,

где x — координата, A — амплитуда колебаний,

$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{10 \text{ Н/м}}{0,1 \text{ кг}}} = 10 \text{ с}^{-1}$ — циклическая частота,
 t — время.

Подставляя числовые данные, получаем:
 $x = 0,05 \cdot \cos(10 \cdot t)$.

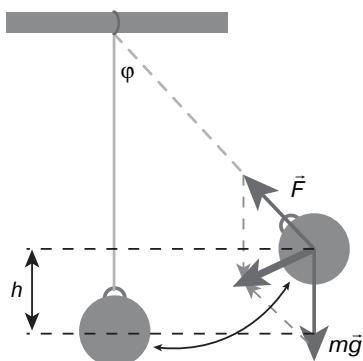
Для нахождения скорости возьмём производную:
 $v = x'(t) = -0,05 \cdot 10 \cdot \sin 10t = -0,5 \cdot \sin 10t$.

Положение равновесия груз проходит с максимальной скоростью, значит, $v_{\max} = 0,5 \text{ м/с}$.

Ответ: $v_{\max} = 0,5 \text{ м/с}$.

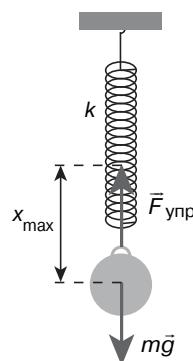
■ Динамическое и энергетическое описание

**Маятник на нити
(математический маятник)**



h — высота подъёма шарика, φ — угол поворота нити в данный момент времени (фаза колебаний), \vec{F} — сила натяжения нити, $m\vec{g}$ — сила тяжести

**Маятник на пружине
(физический маятник)**



x_{\max} — максимальное смещение от положения равновесия, k — жёсткость пружины, $\vec{F}_{\text{упр}}$ — сила упругости, $m\vec{g}$ — сила тяжести

>>>

Маятник на нити (математический маятник)	Маятник на пружине (физический маятник)
В точке равновесия	

Динамическое описание

Равнодействующая сил равна нулю, поэтому ускорение также равно нулю.

Тело пробегает положение равновесия с максимальной по модулю скоростью

$R_x = mg_x + F_x = 0,$ где R — равнодействующая сила	$\vec{R} = m\vec{g} + \vec{F}_{\text{упр}} = 0,$ где \vec{R} — равнодействующая сила
$a_x = 0$	$\vec{a} = 0$

$v_{\max} = x_{\max} \cdot \omega,$
где x_{\max} — амплитуда колебаний, ω — циклическая частота

Энергетическое описание

Равнодействующая сил равна нулю, поэтому потенциальная энергия E_p также равна нулю: $E_p = 0$.

Тело пробегает положение равновесия с максимальной по модулю скоростью, поэтому кинетическая энергия E_k имеет максимальное значение:

$$E_k = \frac{m \cdot v_{\max}^2}{2} = \text{max},$$

где m — масса маятника, v_{\max} — максимальная скорость маятника.

В точке максимального смещения**Динамическое описание**

Равнодействующая сил имеет максимальное значение, поэтому ускорение также имеет максимальное значение, скорость тела равна нулю.

$R_x = mg_x + F_x = ma_x = \text{max}$	$\vec{R} = m\vec{g} + \vec{F}_{\text{упр}} = m \cdot \vec{a} = \text{max}$
$a = x_{\max} \cdot \omega^2,$ $v = 0,$	

где \vec{R} — равнодействующая сила, x_{\max} — амплитуда колебаний, ω — циклическая частота

>>>

**Маятник на нити
(математический маятник)**

**Маятник на пружине
(физический маятник)**

Энергетическое описание

Равнодействующая сил имеет максимальное значение, поэтому потенциальная энергия принимает максимальное значение:

$$E_p = \frac{k \cdot x_{\max}^2}{2} = \frac{m \cdot v_{\max}^2}{2} = \text{max.}$$

Скорость равна нулю, поэтому кинетическая энергия равна нулю:

$$E_k = 0$$

Период свободных колебаний маятника не зависит от начальных условий (амплитуда, скорость), а полностью определяется собственными характеристиками колебательной системы (длиной нити l)

Жёсткость пружины характеризует силу взаимодействия (силу упругости): чем больше жёсткость, тем сильнее воздействие пружины на груз, тем быстрее он раскачивается и тем меньше его период колебания.

Масса характеризует инертные свойства маятника: чем больше масса, тем медленнее раскачивается маятник, тем больше его период колебаний

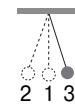
■ Закон сохранения механической энергии

Полная механическая энергия гармонических колебаний E пропорциональна квадрату их амплитуды:

$$E = E_{p\max} = E_{k\max} = \frac{k \cdot x_{\max}^2}{2} = \frac{m \cdot v_{\max}^2}{2},$$

где $E_{p\max}$ — максимальная потенциальная энергия, $E_{k\max}$ — максимальная кинетическая энергия, k — жёсткость пружины, x_{\max} — максимальное смещение от положения равновесия, m — масса маятника, v_{\max} — максимальная скорость маятника.

✓ Математический маятник с периодом колебаний T отклонили на небольшой угол от положения равновесия и отпустили без начальной скорости (см. рисунок). Через какое время после этого потенциальная энергия маятника в первый раз достигнет минимума? Сопротивлением воздуха пренебречь.



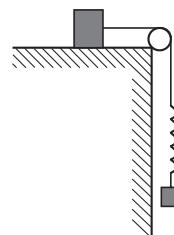
Ответ: в точке 1 (положение равновесия) потенциальная энергия маятника в первый раз достигнет минимума, то есть через $t = \frac{1}{4}T$.



Практические задания

94

Брускок, покоящийся на горизонтальном столе, и пружинный маятник, состоящий из грузика и лёгкой пружины, связаны лёгкой нерастяжимой нитью через идеальный блок (см. рисунок). Коэффициент трения между основанием бруска и поверхностью стола равен 0,2. Отношение массы бруска к массе грузика равно 8. Грузик маятника совершает колебания с периодом 0,5 с вдоль вертикали, совпадающей с вертикальным отрезком нити. Какова максимально возможная амплитуда колебаний, при которой они остаются гармоническими?

**Дано:**

$$\mu = 0,2$$

$$\frac{M}{m} = 8$$

$$T = 0,5 \text{ с}$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

 $x_{\max} - ?$
Решение:

Уравнение гармонических колебаний имеет вид:

$$x = x_{\max} \cdot \cos(\omega \cdot t),$$

где $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{2 \cdot \pi}{T}$ — циклическая частота колебаний, причём $T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}}$.

$$\text{Тогда } x = x_{\max} \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t\right).$$

В положении равновесия выполняется равенство сил: $m \cdot g = k \cdot \Delta x = \mu \cdot M \cdot g$.

При смещении грузика от положения равновесия возникает возвращающая сила: $m \cdot g - k \cdot \Delta x = m \cdot a$.

В точке максимального смещения грузик движется с максимальным ускорением, поэтому, чтобы колебания оставались гармоническими, необходимо выполнение неравенства: $m \cdot (g + a) \leq \mu \cdot M \cdot g$.

Ускорение есть вторая производная координаты по времени:

$$v = x'(t) = -\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot x_{\max} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot t\right);$$

$$a = v'(t) = -\left(\frac{2 \cdot \pi}{T}\right)^2 \cdot x_{\max} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot t\right), \text{ то есть } |a_{\max}| = \left(\frac{2 \cdot \pi}{T}\right)^2 \cdot x_{\max}.$$

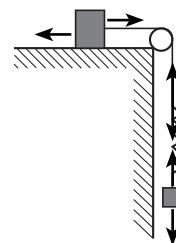
Учитывая силы, действующие на грузик и на брускок (см. рисунок), получим:

$$m \cdot \left[g + \left(\frac{2 \cdot \pi}{T}\right)^2 \cdot x_{\max} \right] = \mu \cdot M \cdot g,$$

$$\text{откуда } x_{\max} = \frac{g \cdot T^2}{4 \cdot \pi^2} \cdot \left(\mu \cdot \frac{M}{m} - 1 \right).$$

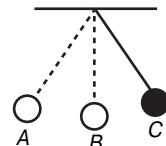
$$x_{\max} = \frac{10 \text{ м/с}^2 \cdot (0,5 \text{ с})^2}{4 \cdot \pi^2} \cdot (0,2 \cdot 8 - 1) = 0,038 \text{ м} = 3,8 \text{ см.}$$

Ответ: $x_{\max} = 3,8 \text{ см.}$



95

Математический маятник с периодом колебаний T отклонили на небольшой угол от положения равновесия и отпустили без начальной скорости (см. рисунок). Через какое время после этого кинетическая энергия маятника в первый раз достигнет минимума? Сопротивлением воздуха пренебречь.



Решение:

Точка B соответствует положению равновесия, точки A и C — точки максимального смещения груза. Следовательно, кинетическая энергия груза имеет минимальное значение в точках A и C :

$$E_k = 0.$$

В первый раз маятник будет проходить это положение через

$$t = \frac{1}{2} \cdot T = 0,5T.$$

Ответ: $t = 0,5T.$

96

Полная механическая энергия пружинного маятника увеличилась в 2 раза. Как при этом изменилась амплитуда колебаний?

- | | |
|---------------------------|----------------------------------|
| 1) увеличилась в 1,4 раза | 3) уменьшилась в 2 раза |
| 2) увеличилась в 2 раза | 4) уменьшилась в $\sqrt{2}$ раза |

Решение:

По закону сохранения энергии максимальные значения потенциальной и кинетической энергии равны полной механической энергии маятника: $W_p = W_k = W$,

где $W_k = \frac{m \cdot v_{\max}^2}{2}$ — максимальное значение кинетической энергии,

$W_p = \frac{k \cdot A^2}{2}$ — максимальное значение потенциальной энергии.

Тогда $W = \frac{k \cdot A^2}{2}$, откуда $A = \sqrt{\frac{2 \cdot W}{k}}$.

Следовательно, амплитуда колебаний пропорциональна квадратному корню из полной механической энергии, а значит, при увеличении энергии в 2 раза амплитуда увеличится в $\sqrt{2} = 1,4$ раза.

Ответ: 1.

ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Вынужденные колебания — колебания, происходящие под действием периодической внешней силы.

Вынужденные колебания — это незатухающие колебания. Неизбежные потери энергии на трение компенсируются подводом энергии от внешнего источника периодически действующей силы.

Эти колебания могут возникать как в колебательных системах, то есть системах, имеющих положение устойчивого равновесия, так и в системах, не обладающих данным свойством. Примером может служить пор-

шень в цилиндре двигателя внутреннего сгорания или паровой машины.

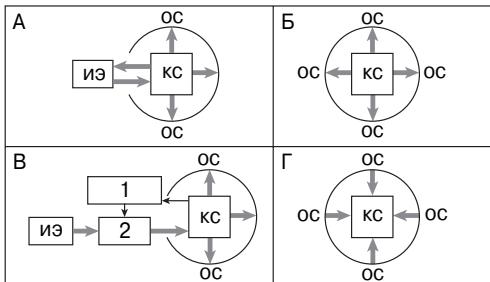
✓ Большинство птиц во время дальних перелётов выстраиваются цепочкой или косяком. Это явление имеет физическое объяснение.

Взмахи крыльев — вынужденные колебания, частоту которых птицы устанавливают интуитивно. Впереди летит самая сильная птица, создавая движением крыльев воздушную волну, которая распространяется под острым углом. Птицы инстинктивно угадывают минимум сопротивления, подстраивая частоту взмахов крыльев. Воздух обтекает их тела в пределах косяка. Таким образом, птицы связаны между собой воздушной волной и работа их крыльев совершается в резонанс.



В жизни мы часто выступаем в качестве вынуждающей силы, например при раскачивании качелей или игре в мяч, многократно ударяя его о землю.

На рисунке приведены схемы, стрелки на которых обозначают направление обмена энергией между колебательной системой (КС), источником энергии (ИЭ) и окружающей средой (ОС). Какая из схем относится к вынужденным колебаниям?



1 — обратная связь, 2 — клапан

Ответ: только на рисунке А показан взаимообмен энергией между колебательной системой (КС) и источником энергии (ИЭ), что является необходимым условием вынужденных колебаний.

Периодическая внешняя сила может изменяться во времени по различным законам, например по закону:

$$F_x = F_0 \cdot \cos(\omega \cdot t),$$

где F_x — проекция силы на Ox , F_0 — амплитуда силы, ω — циклическая частота, t — время.

Установившиеся вынужденные колебания всегда происходят на частоте ω внешней силы.

Для гармонических колебаний их амплитуда A связана с амплитудой ускорения a_{\max} :

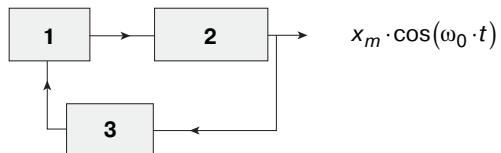
$$A = \frac{a_{\max}}{\omega^2} = \frac{F_0}{m \cdot \omega^2},$$

где A — амплитуда колебаний, a_{\max} — амплитуда ускорения, ω — циклическая частота, m — масса тела, F_0 — амплитуда силы.

■ Автоколебательная система

Существуют системы, в которых незатухающие колебания возникают в результате способности самостоятельно регулировать поступление энергии от постоянного источника. Такие системы называются **автоколебательными**, а процесс незатухающих колебаний в подобных системах — **автоколебаниями**.

В автоколебательной системе можно выделить три характерных элемента — колебательная система, источник энергии и устройство обратной связи между колебательной системой и источником (например, маятник настенных часов, колебания воздуха в органной трубе).



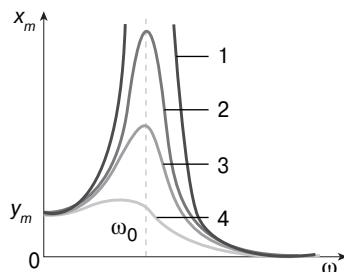
Функциональная схема автоколебательной системы:

$x_m \cdot \cos(\omega_0 \cdot t)$ — уравнение колебательной системы;
1 — источник энергии, 2 — колебательная система, 3 — устройство обратной связи

■ Резонанс. Резонансная кривая

Резонанс — это явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты ω внешней силы с собственной частотой колебаний ω_0 .

Зависимость амплитуды X_{\max} вынужденных колебаний от частоты ω вынуждающей силы называется **резонансной характеристикой**, или **резонансной кривой**.



Резонансные кривые при различных уровнях затухания:

1 — колебательная система без трения; при резонансе амплитуда x_m вынужденных колебаний неограниченно возрастает, 2, 3, 4 — реальные резонансные кривые для колебательных систем с различной степенью затухания, ω — циклическая частота колебательной системы, ω_0 — резонансная частота

Примеры резонанса

В технике	В природе и быту
Мосты в Анжере (1750 г.) и Петербурге (1906 г.) были разрушены в результате резонанса частоты строевого шага марширующих военных с частотой собственных колебаний моста	При землетрясении разрушаются здания равной высоты, так как их собственная частота колебаний определяется высотой и совпадает с частотой колебаний почвы
Полезные проявления резонанса: явление резонанса позволяет с помощью сравнительно малой силы получить значительное увеличение амплитуды колебаний и поэтому используется в вибромашинах в горнодобывающей промышленности, а также при разработке мёрзлого грунта	



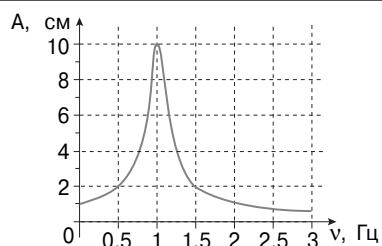
Практические задания

97

На рисунке изображена зависимость амплитуды установившихся колебаний маятника от частоты вынуждающей силы (резонансная кривая). Резонансная частота колебаний этого маятника равна

- 1) 0,5 Гц 2) 1 Гц 3) 1,5 Гц 4) 10 Гц

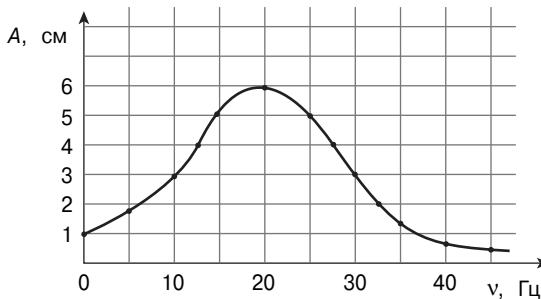
Ответ: 2.



Пояснение:

По определению резонанса происходит резкое возрастание амплитуды, что соответствует резонансной частоте $v = 1$ Гц.

- 98** На рисунке представлен график зависимости амплитуды A вынужденных колебаний от частоты вынуждающей силы. Определите резонансные амплитуду и частоту.



Ответ: резонансная амплитуда $A = 6$ см, частота $v = 20$ Гц.

ПОПЕРЕЧНЫЕ И ПРОДОЛЬНЫЕ ВОЛНЫ

Волновой процесс — процесс переноса энергии без переноса вещества.

Механическая волна — возмущение, распространяющееся в упругой среде.

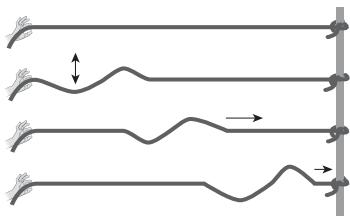
Наличие упругой среды — необходимое условие распространения механических волн.

Рассмотрим виды и основные свойства механических волн.

■ Виды механических волн

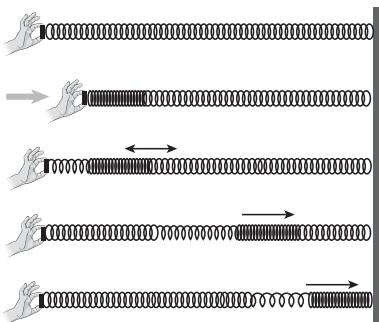
Поперечными называются волны, в которых колебания частиц происходят перпендикулярно (поперёк) направлению распространения волны.

Поперечные волны могут существовать только в твёрдых телах, так как газы и жидкости не обладают упругостью формы.



Возникновение и распространение поперечной волны

Продольными называются волны, в которых колебания частиц происходят вдоль направления распространения волны.



Возникновение и распространение продольной волны

Продольные волны — это периодические сгущения и разрежения среды. Поэтому такие волны могут существовать в любых телах — твёрдых, жидких, газообразных.

Механические волны, распространяющиеся в Земле, называются **сейсмическими**. Продольные сейсмические волны быстрее поперечных: на глубине 500 км скорость поперечных волн примерно 5 км/с, а скорость продольных волн — 10 км/с.

■ Длина волны, скорость её распространения

Расстояние между двумя ближайшими частицами среды, находящимися в одинаковом состоянии (колеблющимися в одинаковой фазе), называется **длиной волны**.

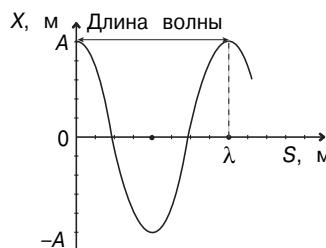
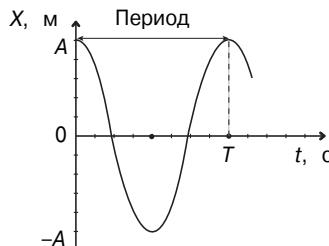


График волны: зависимость координаты x частицы от перемещения s , A — амплитуда колебаний частицы

Период колебаний частиц равен периоду колебаний возбудителя волны. Физическая величина, равная отношению длины волны λ к периоду колебаний её частиц T , называется **скоростью волны**:

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



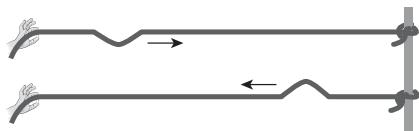
Уравнение волны: зависимость координаты x частицы от времени t , A — амплитуда колебаний частицы

Скорость распространения волн в разных средах различна: в твёрдых телах — самая высокая, в газах — самая низкая.

■ Свойства механических волн. Интерференция и дифракция волн

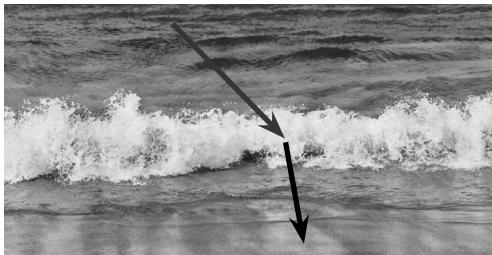
Отражение волн — способность механических волн любого происхождения отражаться от границы раздела двух сред.

На явлении отражения волн основана **эхолокация** — обнаружение и точное определение местонахождения объектов с помощью ультразвуковых волн.



Отражение волны, бегущей по шнуре: вверху изгиб бежит вверх, внизу изгиб после отражения возвращается

Преломление волн — явление, которое наблюдается при распространении механических волн.



Преломление морской волны при переходе на песчаную поверхность

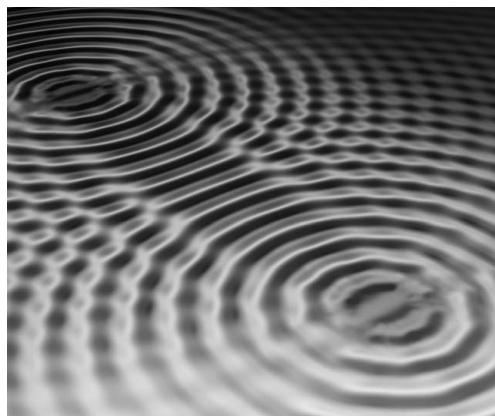
Дифракция (от лат. *diffractus* — преломлённый) волн — отклонение волн от прямолинейного распространения, то есть огибание ими препятствий.

Дифракция наиболее отчётливо проявляется, если длина набегающей волны больше размеров препятствия. Позади него волна распространяется так, как будто препятствия не было вовсе.



Дифракция волны на воде от листочка

Интерференция (от лат. *inter* — взаимно, *ferio* — ударяю) волн — взаимовлияние двух волн.



Интерференция морских волн

**Практические задания**

99 Мимо рыбака, сидящего на пристани, прошло 5 гребней волн за 10 с. Определите период колебаний поплавка на волнах.

- 1) 5 с 2) 50 с 3) 2 с 4) 0,5 с

Дано:

$$N = 5$$

$$t = 10 \text{ с}$$

$$\underline{T - ?}$$

Решение:

Поскольку период колебаний частиц равен периоду колебаний возбудителя волны, то

$$T = \frac{t}{N} = \frac{10 \text{ с}}{5} = 2 \text{ с.}$$

Ответ: 3.

100 Волна частотой 3 Гц распространяется в среде со скоростью 6 м/с. Определите длину волны.

Дано:

$$v = 3 \text{ Гц}$$

$$\underline{V = 6 \text{ м/с}}$$

$$\lambda - ?$$

Решение:

Из формулы скорости волны

$$V = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot v, \text{ где } v \text{ — частота волны, следовательно, что } \lambda = \frac{V}{v}.$$

$$\lambda = \frac{6 \text{ м/с}}{3 \text{ Гц}} = 2 \text{ м.}$$

Ответ: $\lambda = 2 \text{ м.}$

101 Звуковой сигнал, отразившись от препятствия, вернулся обратно к источнику через 5 с после его испускания. Каково расстояние от источника до препятствия, если скорость звука в воздухе равна 340 м/с?

Дано:

$$t = 5 \text{ с}$$

$$\underline{V = 340 \text{ м/с}}$$

$$\underline{s - ?}$$

Решение:

Поскольку сигнал должен дважды пройти одно и то же расстояние (волна отражается), то формула эхолокации имеет вид: $2 \cdot s = V \cdot t$,

$$\text{откуда } s = \frac{1}{2} \cdot V \cdot t; s = \frac{1}{2} \cdot 340 \text{ м/с} \cdot 5 \text{ с} = 850 \text{ м.}$$

Ответ: $s = 850 \text{ м.}$

ЗВУК. СКОРОСТЬ ЗВУКА

Звуковыми волнами, или просто звуком, принято называть волны, воспринимаемые человеческим ухом:

$$20 \text{ Гц} \leq v \leq 20\,000 \text{ Гц}.$$

Волны с частотой **менее 20 Гц** называются **инфразвуком**, а с частотой **более 20 кГц — ультразвуком**.

Скорость V распространения звуковых волн в разных средах неодинакова.

$$V = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot v,$$

где λ — длина волны, T — период волны, v — частота волны.

Скорость звука в воздухе: $V_{\text{в}} \approx 330$ м/с.

По рельсам распространяется звуковая волна. Как изменяются скорость звуковой волны и частота звуковых колебаний при переходе звука из воздушного промежутка между рельсами в рельс?

Ответ: частота волны — величина постоянная, она служит основной характеристикой волны, поэтому частота звуковых колебаний при переходе звука из воздушного промежутка между рельсами в рельс не изменится. Скорость звуковой волны в твёрдых телах (рельс) больше, чем в газах (воздух), то есть скорость увеличится.

Медленнее всего звук распространяется **в газах**: при распростране-

нии звука в газе атомы и молекулы колеблются вдоль направления распространения волны. В жидкостях звук распространяется быстрее. В твёрдых телах — ещё быстрее. Так, в стальном рельсе звук распространяется со скоростью $V_{\text{ст}} \approx \approx 5000$ м/с.

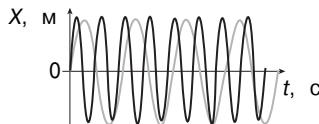
■ Некоторые характеристики звуковых волн

Высота звука определяется частотой источника звуковых колебаний. Чем больше частота колебаний, тем выше звук. Колебаниям малых частот соответствуют низкие звуки.

Писк комара соответствует 500—600 взмахам его крыльев в секунду, жужжание шмеля — 220 взмахам.

Колебания голосовых связок певцов могут создавать звуки в диапазоне от 80 до 1400 Гц (хотя экспериментально зафиксированы рекордно низкая (44 Гц) и высокая (2350 Гц) частоты).

В телефоне для воспроизведения человеческой речи используется область частот от 300 до 2000 Гц.

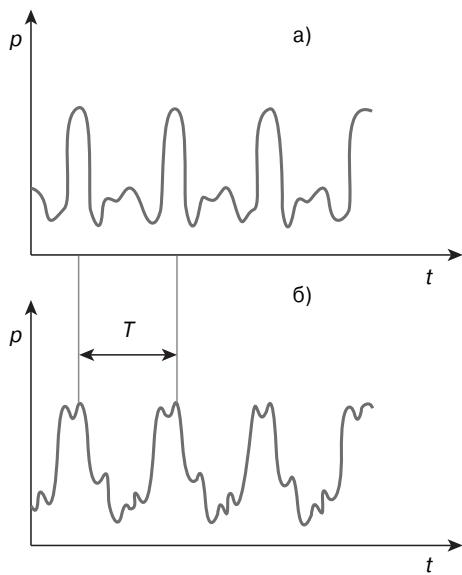


Примеры звуковых волн разной частоты: светлая — малая частота (низкий звук), тёмная — большая частота (высокий звук)

Тембр звука — характеристика, отличающая звучание одной и той же ноты в исполнении различных музыкальных инструментов или голоса.

Тембр звука определяется формой звуковых колебаний. Различие формы колебаний, имеющих одинаковый период, связано с разной относительной амплитудой основной моды и обертонов.

Это объясняется тем, что любое реальное колебание складывается из гармонических колебаний основной моды и обертонов.



Нота «ля» малой октавы (220 Гц) в исполнении трубы (а) и скрипки (б)

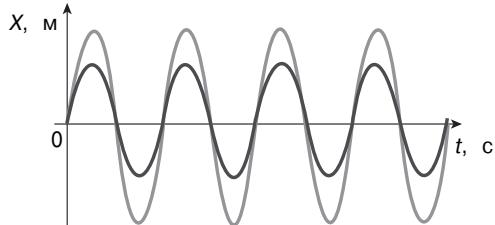
Громкость звука зависит от амплитуды колебаний давления в звуковой волне.

Минимальное изменение давления, которое может фиксироваться человеческим ухом, определяет порог слышимости.

При частоте 1 кГц порог слышимости составляет 10^{-5} Па, или 10^{-10} атм. Подобное изменение давления означает, что человеческое ухо фиксирует амплитуду колебаний молекул порядка 1 нм.

В зависимости от амплитуды колебаний воздушного давления изменяется воздействие на барабанную перепонку и, соответственно, воспринимаемая громкость звука.

Чувствительность уха к разным частотам различна: например, порог слышимости тона 50 Гц выше порога слышимости тона 1000 Гц.



Примеры волн разной громкости:
светлая — большая амплитуда (громкий звук),
тёмная — меньшая амплитуда (тихий звук)



Знаете ли вы, что музыкальные звуки, соответствующие разным октавам, например, звук «до» первой и малой октавы, отличаются по частоте ровно в 2 раза? То есть если выстроить одинаковые звуки октав по частоте, это будет выглядеть так: v , $2v$, $4v$, $8v$ и т. д.



Практические задания

- 102** Саксофон (бас) издаёт звуки в диапазоне от $v_1 = 80 \text{ Гц}$ до $v_2 = 8000 \text{ Гц}$. Каково отношение граничных длин звуковых волн $\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ этого диапазона?

Дано:

$$\begin{aligned}v_1 &= 80 \text{ Гц} \\v_2 &= 8000 \text{ Гц}\end{aligned}$$

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} - ?$$

Решение:

Из формулы скорости волны $V = \lambda \cdot v$ выразим длины волн для каждой частоты:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_1 = \frac{V}{v_1} \\ \lambda_2 = \frac{V}{v_2} \end{array} \right.$$

Разделив первое уравнение на второе, получим:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{8000 \text{ Гц}}{80 \text{ Гц}} = 100.$$

Ответ: $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 100$.

- 103** Расстояние до препятствия, от которой отражается звук после выстрела охотника, составляет 850 м. Через какое время эхо от звука придёт к охотнику? Скорость звука в воздухе считать равной 340 м/с.

Дано:

$$v = 340 \text{ м/с}$$

$$I = 850 \text{ м}$$

$$t - ?$$

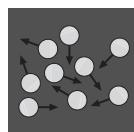
Решение:

Следует учесть, что звук проходит указанное расстояние дважды, тогда $t = \frac{2 \cdot I}{v}$.

$$t = \frac{2 \cdot 850 \text{ м}}{340 \text{ м/с}} = 5 \text{ с.}$$

Ответ: $t = 5 \text{ с.}$

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА



МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

Молекулярно-кинетической теорией (МКТ) называют учение о строении и свойствах вещества на основе представления о существовании атомов и молекул как наименьших частиц химического вещества.



ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В основе МКТ лежат **три основных положения**:

- Все вещества (жидкие, твёрдые и газообразные) образованы из мельчайших частиц — молекул, которые сами состоят из атомов (элементарных молекул).
- Атомы и молекулы находятся в непрерывном хаотическом движении.
- Частицы взаимодействуют друг с другом силами, имеющими элек-

трическую природу. Гравитационное взаимодействие между частицами пренебрежимо мало.

Опытным подтверждением первого и второго положений является диффузия (подробнее см. раздел «Диффузия», с. 134). Опытным подтверждением третьего положения теории являются склеивание, смачивание, несжимаемость жидкостей и твёрдых тел.



Практические задания

1

Толчёный мел размешали в воде. Каплю полученной взвеси поместили под микроскоп и увидели, что частички мела размером в несколько микрометров беспорядочно движутся в воде. Какое утверждение объясняет это явление?

- 1) Сила тяжести, действующая на мелкие частицы мела, меньше архимедовой силы.
- 2) Силы взаимодействия между молекулами мела и молекулами воды существенно больше сил взаимодействия между молекулами воды.
- 3) Мел плохо смачивается водой, и частицы удерживаются поверхностным натяжением воды.
- 4) Молекулы воды движутся хаотически и толкают частички мела.

Решение:

- 1) Если бы сила тяжести, действующая на мелкие частицы мела, была меньше архимедовой силы, то частицы мела должны были бы всплыть и находиться на поверхности воды. Значит, утверждение неверно.
- 2) Если бы силы взаимодействия между молекулами мела и молекулами воды были существенно больше сил взаимодействия между молекулами воды, то частицы мела растянули бы молекулы воды по каплям, то есть частицы мела стали бы представлять центры, окружающие каплями воды. Следовательно, утверждение неверно.
- 3) Если мел плохо смачивается водой, то частицы не могут удерживаться поверхностным натяжением воды, это противоречивые утверждения, то есть утверждение неверно.
- 4) Мы не видим движения частиц воды (молекулы воды слишком малы), которые в соответствии с основными положениями МКТ движутся непрерывно и беспорядочно, сталкиваясь друг с другом, а также с частицами мела, благодаря чему можно увидеть, что частицы мела движутся в капле хаотично.

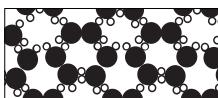
Ответ: 4.

МОДЕЛИ СТРОЕНИЯ ТВЁРДЫХ ТЕЛ, ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Твёрдые тела

В твёрдых телах молекулы совершают беспорядочные колебания около фиксированных центров (положений равновесия).

Твёрдые тела сохраняют и объём, и форму. Если мысленно соединить центры положений равновесия атомов или ионов твёрдого тела, получится **кристаллическая решётка**.



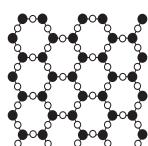
Модель строения воды в твёрдом состоянии (лёд)

Аморфные тела не имеют кристаллической структуры и в отличие от кристаллов не расщепляются с образованием кристаллических граней, как правило, изотропны, то есть не обнаруживают различных свойств в разных направлениях, не имеют определённой точки плавления.

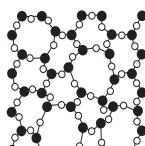
Кинетическая энергия E_k движения молекул твёрдых тел намного меньше потенциальной энергии E_p их взаимодействия (притяжения):

$$E_k \ll E_p.$$

Кристаллическое тело



Аморфное тело



Сравнение внутреннего строения кристаллического и аморфного тел

Жидкости

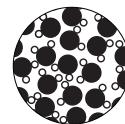
В жидкостях молекулы имеют значительно большую свободу для теплового движения. Они не привязаны к определённым центрам и могут перемещаться по всему объёму жидкости.

Молекулы совершают колебательное движение около положения равновесия, но могут совершать перескоки (этим объясняется текучесть жидкости).

Жидкости несжимаемы, не сохраняют своей формы и принимают форму сосуда, в который налиты.

Кинетическая энергия E_k движения молекул жидкостей меньше потенциальной энергии E_p их взаимодействия (притяжения):

$$E_k < E_p.$$



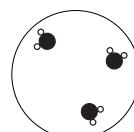
Модель строения воды в жидком состоянии

Газы

В газах расстояния между молекулами обычно значительно больше их размеров (при нормальных условиях среднее расстояние между молекулами примерно в 10 раз больше диаметра молекулы), каждая молекула движется вдоль прямой линии до очередного столкновения с другой молекулой или со стенкой сосуда. Газы занимают весь предоставленный объём, не сохраняют ни формы, ни объёма.

Кинетическая энергия E_k движения молекул газов намного больше потенциальной энергии E_p их взаимодействия (притяжения):

$$E_k \gg E_p.$$



Модель строения воды в газообразном состоянии (пар)

ТЕПЛОВОЕ ДВИЖЕНИЕ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ ВЕЩЕСТВА

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

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 \bar{V} — среднеквадратичная скорость (статистическая величина)

движения молекул, k — постоянная Больцмана, T — температура тела (см. раздел «Абсолютная температура», с. 137), m_0 — масса одной молекулы, R — универсальная газовая постоянная, M — молярная масса вещества.

Термодинамическим свойством вещества можно объяснить **гидростатическое давление жидкости**.



Практические задания

2 Какое из перечисленных свойств обусловлено хаотичностью теплового движения молекул?

- 1) Плотность газа одинакова во всех местах занимаемого им сосуда.
- 2) Плотность вещества в газообразном состоянии меньше плотности этого вещества в жидким состоянии.
- 3) Газ гораздо легче сжать, чем жидкость.
- 4) При одновременном охлаждении и сжатии газ превращается в жидкость.

Ответ: 1.

Пояснение:

Хаотичность теплового движения молекул газа приводит к тому, что плотность газа одинакова во всех местах занимаемого им сосуда.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦ ВЕЩЕСТВА

Между молекулами действуют как силы притяжения, так и силы оттал-

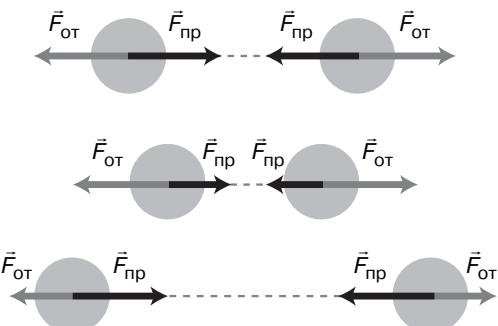
кивания, то есть частицы вещества взаимодействуют друг с другом. Без

этого взаимодействия невозможно существование твёрдых и жидкых тел. Силы взаимодействия в твёрдых телах больше, чем в жидких, а в газообразных силы взаимодействия пренебрежимо малы.

На очень малых расстояниях между молекулами обязательно действуют силы отталкивания; на расстояниях, превышающих 2—3 диаметра молекул, действуют силы притяжения.

Силами притяжения объясняется сохранение формы твёрдыми телами, сохранение объёма твёрдыми телами и жидкостями.

Силами отталкивания объясняется несжимаемость твёрдых тел и жидкостей.

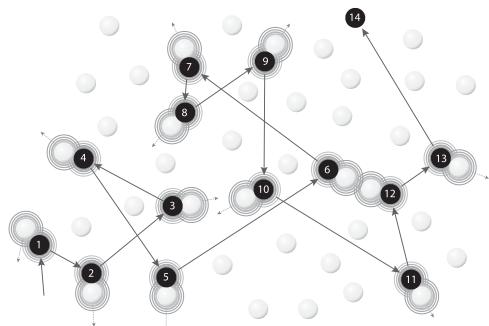


Силы взаимодействия между молекулами:
 $\vec{F}_{\text{пр}}$ — сила притяжения, $\vec{F}_{\text{от}}$ — сила отталкивания

БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

Броуновское движение — тепловое движение мельчайших частиц,звешенных в жидкости или газе.

служащих доказательством молекулярного движения и зависимости этого движения от температуры.



Траектория движения броуновской частицы

Броуновское движение является одним из важнейших опытных фактов,

✓ Ниже приведено описание одного из явлений: «Быстро пролетают в поле зрения микроскопа мельчайшие частицы, почти мгновенно меняя направление движения. Медленнее продвигаются более крупные частицы, но и они постоянно меняют направление движения. Большие частицы практически толкуются на месте». Какое явление описано в этом тексте?

Ответ: в тексте описано броуновское движение.

Если растолочь мел в пудру, размешать в стакане с водой и рассмотреть каплю смеси под микроскопом, то обнаружится, что частицы пудры движутся в капле хаотично. Чем можно объяснить такое движение?

Ответ: такое движение частиц пудры объясняется хаотичными ударами со стороны молекул воды.

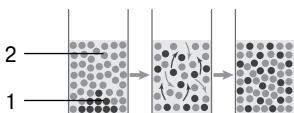
Дым представляет собой частицы сажи, взвешенные в воздухе. Почему твёрдые частицы сажи долго не падают вниз, оставаясь висеть в воздухе?

Ответ: твёрдые частицы сажи долго не падают вниз потому, что они совершают броуновское движение в воздухе.

ДИФФУЗИЯ

Диффузия — явление проникновения двух или нескольких соприкасающихся веществ друг в друга.

Например, если распылить на поверхности жидкости мельчайшие крупинки какого-либо вещества, то они будут непрерывно двигаться.



Растворение краски в воде: 1 — молекулы красителя, 2 — молекулы растворителя

Диффузия приближает систему к состоянию термодинамического равновесия (см. раздел «Абсолютная температура», с. 137).

В каких телах — твёрдых, жидких или газообразных — происходит диффузия?

Ответ: диффузия может происходить в твёрдых, жидких и газообразных телах.

Почему диффузия в жидкости происходит быстрее при повышении температуры?

Ответ: диффузия в жидкости происходит быстрее при повышении температуры, потому что с повышением температуры увеличивается скорость теплового движения молекул.

У какой из пар веществ, перечисленных ниже, скорость взаимной диффузии наибольшая? Наименьшая? Температуры веществ одинаковы.

- 1) раствор медного купороса и вода
- 2) пары эфира и воздух
- 3) свинцовая и медная пластины
- 4) вода и спирт

Ответ: наибольшая скорость взаимной диффузии у пары газов — пары эфира и воздух; наименьшая — у пары металлов — свинцовая и медная пластины.

МОДЕЛЬ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА В МКТ

В кинетической модели идеального газа молекулы рассматриваются как **идеально упругие шарики**, взаимодействующие между собой и со стенками только во время упругих столкновений: частицы газа **движутся хаотически и не взаимодействуют** друг с другом. Суммарный объём всех молекул предполагается малым по сравнению с объёмом сосуда, в котором находится газ.

Характеристики идеального газа

Микроскопические параметры

Масса молекул, скорость молекул, кинетическая энергия молекул.

Макроскопические параметры

Давление газа, объём газа, температура газа.

Моль — это количество вещества, содержащее столько же частиц (молекул), сколько содержится атомов в 0,012 кг углерода ^{12}C .

В одном моле любого вещества содержится одно и то же число частиц (молекул). Это число называется **постоянной Авогадро** N_A :

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

Массу **одного** моля вещества принято называть **молярной массой** M :

$$M = N_A \cdot m_0,$$

где m_0 — масса одной молекулы.

Молярная масса измеряется в килограммах на моль ($\frac{\text{кг}}{\text{моль}}$).

Отношение массы атома или молекулы данного вещества к $\frac{1}{12}$ массы атома углерода ^{12}C называется **относительной молекулярной массой** (указана в периодической таблице Менделеева).

О	8
15,9994	
кислород	

Определение относительной молекулярной массы по таблице Менделеева:
относительная молекулярная масса для кислорода $M_r = 15,9994$ а. е. м. (а. е. м. — атомная единица массы)

Связь между относительной молекулярной массой и молярной массой

При решении задач используется молярная, а не молекулярная масса:

$$M = M_r \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}.$$

Например, для кислорода молярная масса равна: $M \approx 16 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$.

Следует помнить, что **все газы**, кроме инертных (последний столбец таблицы Менделеева), — **двухатомные**, поэтому молярная масса молекулярного кислорода равна: $M \approx 32 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$.

Количество вещества v — это величина, равная отношению массы вещества к его молярной массе:

$$v = \frac{m}{M} = \frac{N}{N_A},$$

где m — масса вещества, M — молярная масса, N — число молекул в данной массе вещества, N_A — постоянная Авогадро.

ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МКТ

Связь между давлением и средней кинетической энергией поступательного теплового движения молекул идеального газа отражается в **основном уравнении МКТ**.

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

$$p = \frac{2}{3} \cdot n \cdot E_k,$$

где $n = \frac{N}{V}$ — концентрация молекул

(то есть число молекул N в единице объёма V сосуда), E_k — средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газа.

Основное уравнение МКТ может быть записано в нескольких формах:

$$p = \frac{2}{3} n E_k = \frac{1}{3} \rho v^2 = n k T,$$

где ρ — плотность вещества, v — среднеквадратичная скорость молекул, k — постоянная Больцмана.

■ Нормальные условия

Атмосферное давление $p = 1,01 \cdot 10^5$ Па.

Температура $t = 0^\circ\text{C}$, или $T = 273\text{ K}$ (см. раздел «Абсолютная температура», с. 137).

Концентрация молекул идеального газа при нормальных условиях — **постоянная Лошмидта**:

$$n \approx 2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}.$$

Среднее расстояние между молекулами идеального газа при нормальных условиях более чем на порядок превышает размер молекулы.

При понижении температуры газа в запаянном сосуде давление газа уменьшается. Это уменьшение давления объясняется тем, что уменьшается энергия теплового движения молекул газа.



Практические задания

3 Найти число молекул в алюминиевой ложке массой 270 г.

Дано:

$$m = 0,27 \text{ кг}$$

$$M = 27 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$$

$$N - ?$$

Решение:

Из формулы количества вещества

$$v = \frac{m}{M} = \frac{N}{N_A} \quad \text{выразим число молекул } N = \frac{m}{M} \cdot N_A.$$

$$N = \frac{0,27 \text{ кг}}{27 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 6,02 \cdot 10^{24}.$$

Ответ: $6,02 \cdot 10^{24}$ молекул.

4 Концентрацию молекул одноатомного идеального газа уменьшили в 5 раз. Одновременно в 2 раза увеличили среднюю энергию хаотического движения молекул газа. Как в результате этого изменилось давление газа в сосуде?

Дано:

$$\frac{n_1}{n_2} = 5$$

$$\frac{E_{k2}}{E_{k1}} = 2$$

$$\frac{p_1}{p_2} - ?$$

Решение:

По формуле давления газа

$$\begin{cases} p_1 = \frac{2}{3} \cdot n_1 \cdot E_{k1} \\ p_2 = \frac{2}{3} \cdot n_2 \cdot E_{k2} \end{cases}$$

Разделив первое уравнение на второе, получим:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{E_{k1}}{E_{k2}}, \quad \frac{p_1}{p_2} = 5 \cdot \frac{1}{2} = 2,5.$$

Ответ: увеличилось в 2,5 раза.

АБСОЛЮТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА

Температура — величина, которая характеризует тепловое состояние тела, или, иначе, мера «нагретости»

тела. Чем выше температура тела, тем большую в среднем энергию имеют его атомы и молекулы.

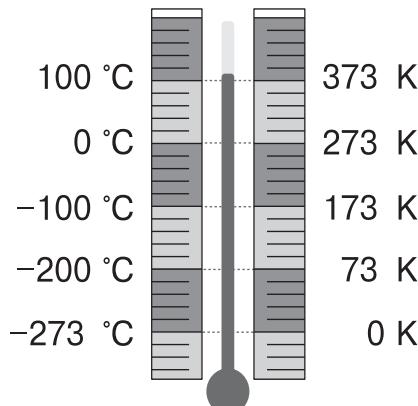
Для измерения температуры используются физические приборы — термометры.

В системе СИ единица измерения температуры — кельвин (**K**).

$$T_K = t_C + 273,15,$$

где t_C — температура газа по шкале Цельсия, T_K — температура газа по шкале Кельвина.

Температурная шкала Кельвина называется **абсолютной шкалой температур**.



Сравнение температурной шкалы Цельсия t (слева) со шкалой Кельвина T (справа)

ТЕМПЕРАТУРА — МЕРА СРЕДНЕЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ МОЛЕКУЛ

Средняя кинетическая энергия хаотического движения молекул газа прямо пропорциональна абсолютной температуре:

$$E_k = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T,$$

где k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура газа.

В комнате в одном сосуде находится водород, а в другом — азот. Какие параметры у этих газов одинаковы, если средние значения кинетической энергии поступательного теплового движения молекулы водорода и молекулы азота одинаковы?

Ответ: в данном случае у этих газов одинаковы значения температуры.

УРАВНЕНИЕ $p = n \cdot k \cdot T$

Поскольку давление газа связано со средней кинетической энергией теплового движения молекул газа

$$p = \frac{2}{3} \cdot n \cdot E_k,$$

а средняя кинетическая энергия теплового движения молекул газа прямо пропорциональна температуре

$$E_k = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T,$$

то давление газа связано с температурой:

$$p = n \cdot k \cdot T,$$

где n — концентрация молекул (то есть число молекул N в единице

объёма V любого сосуда),

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \quad — \text{ постоянная}$$

Больцмана, T — абсолютная температура газа.



Практические задания

- 5** При нагревании идеального газа его абсолютная температура увеличилась в 2 раза. Как изменилась при этом средняя кинетическая энергия теплового движения молекул газа?

Решение:

Средняя кинетическая энергия теплового движения молекул газа прямо пропорциональна температуре: $E_k = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T$.

Значит, если абсолютная температура увеличилась в 2 раза, то и средняя кинетическая энергия теплового движения молекул газа увеличилась в 2 раза.

Ответ: увеличилась в 2 раза.

- 6** Как изменится давление разреженного одноатомного газа, если при увеличении концентрации молекул газа в 3 раза его абсолютная температура увеличится в 2 раза?

Дано:

$$\frac{n_2}{n_1} = 3$$

$$\frac{T_2}{T_1} = 2$$

$$\frac{p_2}{p_1} = ?$$

Решение:

По формуле давления газа

$$\begin{cases} p_1 = n_1 \cdot k \cdot T_1 \\ p_2 = n_2 \cdot k \cdot T_2 \end{cases} \text{ Разделив второе уравнение на первое, полу-}$$

$$\text{чим: } \frac{p_2}{p_1} = \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{T_2}{T_1}, \quad \frac{p_2}{p_1} = 3 \cdot 2 = 6.$$

Ответ: увеличится в 6 раз.

7

Температура в холодных облаках межзвёздного газа составляет около 10 К, а давление газа достигает $1,38 \cdot 10^{-12}$ Па. Оцените концентрацию молекул межзвёздного газа.

Дано:

$$T \approx 10 \text{ К}$$

$$p \approx 1,38 \cdot 10^{-12} \text{ Па}$$

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$n - ?$$

Решение:

По формуле давления газа $p = n \cdot k \cdot T$, откуда

$$n = \frac{p}{k \cdot T}.$$

$$n = \frac{1,38 \cdot 10^{-12} \text{ Па}}{1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot 10 \text{ К}} = 10^{10} \text{ м}^{-3}.$$

Ответ: $n = 10^{10} \text{ м}^{-3}$.

8

Цилиндрический сосуд разделён неподвижной теплоизолирующей перегородкой. В одной части сосуда находится кислород, в другой — водород, концентрации газов одинаковы. Давление кислорода в 2 раза больше давления водорода. Чему равно отношение средней кинетической энергии молекул кислорода к средней кинетической энергии молекул водорода?

Дано:

$$M_{\text{O}_2} = 32 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$$M_{\text{H}_2} = 2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$$n_{\text{O}_2} = n_{\text{H}_2} = n$$

$$\frac{p_{\text{O}_2}}{p_{\text{H}_2}} = 2$$

$$\frac{E_{\text{O}_2}}{E_{\text{H}_2}} - ?$$

Решение:

Основное уравнение МКТ: $p = n \cdot k \cdot T$.

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газа: $E_k = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T$.

Разделив первое уравнение на второе, получим:

$$\frac{p}{E_k} = \frac{2}{3} \cdot n, \text{ откуда } p = \frac{2}{3} \cdot n \cdot E_k.$$

Тогда для каждого газа

$$\begin{cases} p_{\text{O}_2} = \frac{2}{3} \cdot n \cdot E_{\text{O}_2}, \\ p_{\text{H}_2} = \frac{2}{3} \cdot n \cdot E_{\text{H}_2} \end{cases}, \text{ откуда получим: } \frac{p_{\text{O}_2}}{p_{\text{H}_2}} = \frac{E_{\text{O}_2}}{E_{\text{H}_2}} = 2.$$

Ответ: $\frac{E_{\text{O}_2}}{E_{\text{H}_2}} = 2$.

МОДЕЛЬ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА В ТЕРМОДИНАМИКЕ

Кинетическая энергия E_k движения молекул намного больше потенциальной энергии E_p их взаимодействия (притяжения):

$$E_k = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T \gg E_p.$$

Для образования жидкости из газа средняя потенциальная энергия притяжения молекул должна превышать их среднюю кинетическую энергию:

$$E_p \geq \frac{3}{2} \cdot k \cdot T.$$

Физический смысл этого неравенства состоит в том, что переход из газообразного состояния в жидкое возможен лишь при температуре, меньшей некоторой критической температуры:

$$T \leq T_{kp} = \frac{2}{3} \cdot \frac{E_p}{k}.$$

Газ, находящийся при $T > T_{kp}$, нельзя перевести в жидкое состояние.

■ Уравнение Менделеева — Клапейрона

Уравнение **состояния идеального газа**:

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \text{ или } p \cdot V = v \cdot R \cdot T,$$

где p — давление газа, V — его объём, m — масса газа, M — его молярная масса,

$R = N_A \cdot k = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ — универсальная газовая постоянная, T — абсолютная температура газа, N_A — постоянная Авогадро, k — постоянная Больцмана, v — количество вещества.

■ Закон Авогадро

Один моль любого газа при нормальных условиях занимает один и тот же объём V_0 :

$$V_0 = 0,0224 \frac{\text{м}^3}{\text{моль}} = 22,4 \frac{\text{дм}^3}{\text{моль}}.$$

Для смеси невзаимодействующих газов уравнение состояния принимает вид:

$$p \cdot V = (v_1 + v_2 + v_3 + \dots) \cdot R \cdot T,$$

где $v_1, v_2, v_3 \dots$ — количество вещества каждого из газов в смеси.

✓ Если в сосуде находится смесь газов: водород, кислород, азот, по 1 моль каждый, то согласно уравнению Менделеева — Клапейрона давление каждого газа будет равно

$\frac{1}{3}$ давления газа в сосуде:

$$p_H = p_O = p_N = \frac{1}{3} p.$$

ЗАКОН ДАЛЬТОНА ДЛЯ ДАВЛЕНИЯ СМЕСИ РАЗРЕЖЕННЫХ ГАЗОВ

Закон Дальтона. Давление в смеси химически невзаимодействующих газов равно сумме их парциальных давлений:

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots = \\ = (n_1 + n_2 + n_3 + \dots) \cdot k \cdot T,$$

где $p_1, p_2, p_3 \dots$ — парциальные давления каждого газа, $n_1, n_2, n_3 \dots$ — концентрации молекул различных газов в смеси.

Согласно закону Дальтона, если атмосфера Земли содержит 78 % азота и 21 % кислорода, то атмосферное давление создаётся пре-

имущественно этими газами в таких же пропорциях.

✓ В сосуде находилась при комнатной температуре смесь двух идеальных газов, по 1 моль каждого. Половину содержимого выпустили, затем добавили в сосуд 2 моль второго газа. Как изменились парциальные давления газов и их суммарное давление, если температура газов поддерживалась неизменной?

Ответ: парциальное давление первого газа уменьшилось, второго газа — увеличилось, давление смеси газов в сосуде увеличилось.



Практические задания

9

В баллоне объёмом 1,662 м³ находится 2 кг азота при давлении 10⁵ Па. Какова температура этого газа?

Дано:

$$V = 1,662 \text{ м}^3$$

$$m = 2 \text{ кг}$$

$$p = 10^5 \text{ Па}$$

$$M = 28 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$$

$$T = ?$$

Решение:

Из уравнения Менделеева — Клапейрона

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \text{ получим: } T = \frac{p \cdot V \cdot M}{m \cdot R}.$$

$$T = \frac{10^5 \text{ Па} \cdot 1,662 \text{ м}^3 \cdot 28 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}}{2 \text{ кг} \cdot 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}} = 280 \text{ К} = 7^\circ\text{C}.$$

Ответ: $T = 7^\circ\text{C}$.

10

Теплоизолированный цилиндр разделён подвижным теплопроводящим поршнем на две части. В одной части цилиндра находится гелий, а в другой — аргон. В начальный момент температура гелия равна 300 К, аргона — 900 К, объёмы, занимаемые газами, одинаковы, а поршень находится в равновесии. Во сколько раз изменится объём, занимаемый гелием, после установления теплового равновесия, если поршень перемещается без трения? Теплоёмкостью цилиндра и поршня пренебречь.

Дано:

$$M_{\text{He}} = 4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$$M_{\text{Ar}} = 40 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$$T_{\text{He}1} = 300 \text{ К}$$

$$T_{\text{Ar}1} = 900 \text{ К}$$

$$V_{\text{He}1} = V_{\text{Ar}1} = V$$

$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$$

$$\frac{V_{\text{He}2}}{V_{\text{He}1}} = ?$$

Решение:

Уравнение Менделеева — Клапейрона для начального состояния газов:

$$\begin{cases} p \cdot V = v_{\text{He}} \cdot R \cdot T_{\text{He}1}, \\ p \cdot V = v_{\text{Ar}} \cdot R \cdot T_{\text{Ar}1}, \end{cases}$$

где v_{He} и v_{Ar} — количество вещества гелия и аргона соответственно.

$$\text{Тогда } \frac{v_{\text{He}}}{v_{\text{Ar}}} = \frac{T_{\text{Ar}1}}{T_{\text{He}1}} = \frac{900 \text{ К}}{300 \text{ К}} = 3, \text{ или } v_{\text{He}} = 3 \cdot v_{\text{Ar}}.$$

После установления теплового равновесия температура газов равна T , а объёмы гелия и аргона изменились и стали равны:

$$V_{\text{He}2} \text{ и } V_{\text{Ar}2} = 2 \cdot V - V_{\text{He}2} = 2 \cdot V_{\text{He}1} - V_{\text{He}2}.$$

Уравнение Менделеева — Клапейрона для конечного состояния:

$$\begin{cases} p \cdot V_{\text{He}2} = 3 \cdot v_{\text{Ar}} \cdot R \cdot T \\ p \cdot (2 \cdot V_{\text{He}1} - V_{\text{He}2}) = v_{\text{Ar}} \cdot R \cdot T \end{cases}$$

$$\text{откуда } \frac{2 \cdot V_{\text{He}1} - V_{\text{He}2}}{V_{\text{He}2}} = \frac{1}{3}.$$

$$\text{Тогда } \frac{V_{\text{He}1}}{V_{\text{He}2}} = \frac{2}{3}; \text{ выражим искомую величину: } \frac{V_{\text{He}2}}{V_{\text{He}1}} = 1,5.$$

Ответ: $\frac{V_{\text{He}2}}{V_{\text{He}1}} = 1,5.$

11

В сосуде неизменного объёма находилась при комнатной температуре смесь двух идеальных газов в количестве по 1 моль каждого. Половину содержимого сосуда выпустили, а затем добавили в сосуд 3 моль первого газа. Как изменились в результате парциальное давление первого газа и суммарное давление газов, если температура в сосуде поддерживалась неизменной?

Для данных величин определите соответствующий характер изменения и подберите к каждой букве соответствующую цифру.

- | | |
|--------------------------------------|------------------|
| A) парциальное давление первого газа | 1) увеличилось |
| Б) давление смеси газов в сосуде | 2) уменьшилось |
| | 3) не изменилось |

Цифры в ответе могут повторяться.

Решение:

По закону Дальтона давление смеси газов в сосуде: $p = p_1 + p_2$, где p_1 и p_2 — парциальные давления газов. Из уравнения Менделеева — Клапейрона

$$\begin{cases} p = \frac{v \cdot R \cdot T}{V} \\ p_1 = \frac{v_1 \cdot R \cdot T}{V}, \text{ то есть } p = p_1 + p_2 = (v_1 + v_2) \cdot \frac{R \cdot T}{V}. \\ p_2 = \frac{v_2 \cdot R \cdot T}{V} \end{cases}$$

Поскольку изначально $v_1 = v_2 = 1$, парциальные давления газов были одинаковы: $p_{11} = p_{21} = \frac{2 \cdot R \cdot T}{V}$.

После того как половину содержимого сосуда выпустили, а затем добавили в сосуд 3 моль первого газа:

$$\begin{cases} p_1 = \frac{(0,5+3) \cdot R \cdot T}{V} = \frac{3,5 \cdot R \cdot T}{V} \\ p_2 = \frac{0,5 \cdot R \cdot T}{V} \\ p = \frac{4 \cdot R \cdot T}{V} \end{cases} .$$

Значит, увеличилось парциальное давление первого газа и смеси газов.

Ответ: А — 1; Б — 1.

ИЗОПРОЦЕССЫ В РАЗРЕЖЕННОМ ГАЗЕ

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

Изотермический процесс — процесс изменения состояния газа определённой массы при постоянной температуре.

$$T = \text{const}, m = \text{const}.$$

Закон Бойля — Мариотта. Для газа данной массы при постоянной температуре произведение давления газа на его объём постоянно:

$$p \cdot V = \text{const} \text{ или } p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2.$$

Стоит обратить внимание на идентичность уравнения процесса математическому уравнению обратной пропорциональности:

$$\begin{cases} p = \frac{\text{const}}{V} \\ y = \frac{k}{x} \end{cases}$$

Изотерма — график изменения макроскопических параметров газа при изотермическом процессе (гипербола).

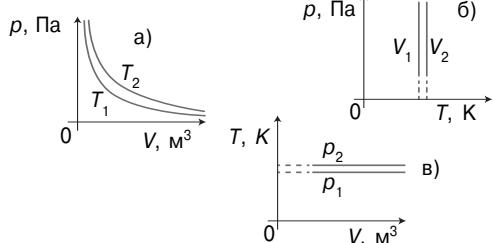


График изотермического процесса для одной массы газа в координатах:

- а) p — V ($T_1 < T_2$); б) p — T ($V_1 < V_2$);
в) T — V ($p_1 < p_2$)

Изобарный процесс — процесс изменения состояния газа определённой массы при постоянном давлении.

$$p = \text{const}, m = \text{const}.$$

Закон Гей-Люссака. Для газа данной массы при постоянном давлении отношение объёма газа к его термодинамической температуре постоянно:

$$\frac{V}{T} = \text{const} \text{ или } \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}.$$

Стоит обратить внимание на идентичность уравнения процесса математическому уравнению прямой пропорциональности:

$$\begin{cases} V = \text{const} \cdot T \\ y = k \cdot x \end{cases}.$$

Изобара — график изменения макроскопических параметров газа при изобарном процессе (прямая).

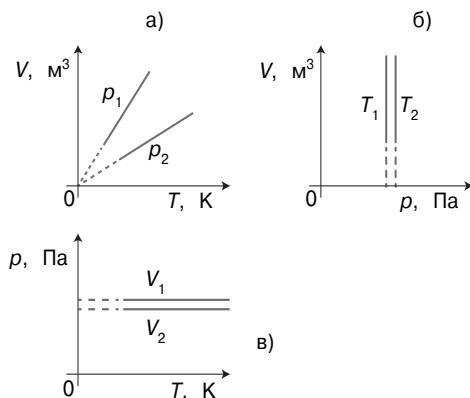


График изобарного процесса для одной массы газа в координатах:

- а) V — T ($p_1 < p_2$); б) V — p ($T_1 < T_2$);
в) p — T ($V_1 < V_2$)

Изохорный процесс — процесс изменения состояния газа определённой массы при постоянном объёме.

$$V = \text{const}, \quad m = \text{const}.$$

Закон Шарля. Для газа данной массы при постоянном объёме отношение давления газа к его термодинамической температуре постоянно:

$$\frac{p}{T} = \text{const} \quad \text{или} \quad \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}.$$

Стоит обратить внимание на идентичность уравнения процесса математическому уравнению прямой пропорциональности:

$$\begin{cases} p = \text{const} \cdot T \\ y = k \cdot x \end{cases}.$$

Изохора — график изменения макроскопических параметров газа при изохорном процессе.

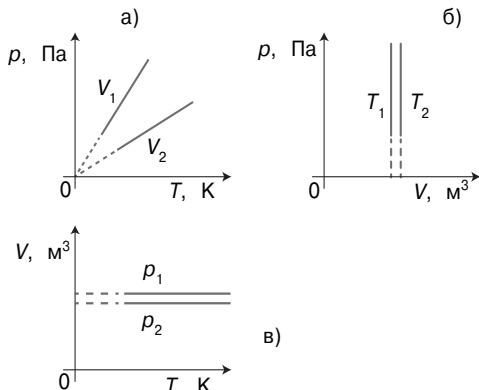


График изохорного процесса для одной массы газа в координатах:

- а) $p — T$ ($V_1 < V_2$); б) $p — V$ ($T_1 < T_2$);
в) $V — T$ ($p_1 < p_2$)



Практические задания

12 На рисунке показано изменение состояния неона в количестве 3 моль. Какая температура соответствует состоянию 2?

Дано:

$$v = 3 \text{ моль}$$

$$T_1 = 273 \text{ К}$$

$$p_1 = 0,1 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$p_2 = 0,2 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$T_2 = ?$$

Решение:

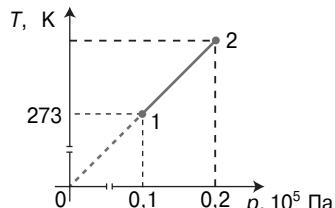
На рисунке изображён график изохорного процесса.

По закону Шарля

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}, \quad \text{откуда} \quad T_2 = \frac{p_2}{p_1} \cdot T_1.$$

$$T_2 = \frac{0,2 \cdot 10^5 \text{ Па}}{0,1 \cdot 10^5 \text{ Па}} \cdot 273 \text{ К} = 546 \text{ К.}$$

Ответ: $T_2 = 546 \text{ К.}$



13 В закрытом сосуде абсолютная температура идеального газа уменьшилась в 3 раза. Как изменится при этом давление газа на стекки сосуда?

Решение:

В закрытом сосуде объём остаётся неизменным — процесс изохорный.

По закону Шарля $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$, откуда $\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}$.

Изменение давления прямо пропорционально изменению температуры, значит, при уменьшении температуры в 3 раза давление уменьшится в 3 раза.

Ответ: уменьшится в 3 раза.

НАСЫЩЕННЫЕ И НЕНАСЫЩЕННЫЕ ПАРЫ

Пар — газообразное состояние вещества при температуре ниже критической (см. раздел «Модель идеального газа в термодинамике», с. 141).

Критическая температура $T_{\text{кр}}$ — максимальная температура, при которой пар превращается в жидкость.

Критическая температура зависит от потенциальной энергии взаимодействия молекул и поэтому различна для разных газов:

$$T_{\text{кр}} = \frac{2 \cdot E_p}{3 \cdot k},$$

где E_p — потенциальная энергия взаимодействия молекул, k — постоянная Больцмана.

Конденсация — переход пара из газообразного состояния в жидкое.

Испарение — парообразование со свободной поверхности жидкости.

✓ Из-за сильного взаимодействия молекул воды водяной пар можно превратить в воду даже при температуре 647 К (374,2 °C).

В то же время сжижение азота происходит лишь при температуре, меньшей $T_{\text{кр}} = 126 \text{ K} = -147 \text{ }^{\circ}\text{C}$, так как молекулы азота слабо взаимодействуют между собой.

В закрытом сосуде жидкость и её пар могут находиться в состоянии **термодинамического равновесия**, когда число молекул, вылетающих из жидкости, равно числу молекул, возвращающихся в жидкость из пара, то есть когда скорости процессов испарения и конденсации одинаковы. Такую систему называют **двуухфазной**.

Насыщенный пар — пар, находящийся в термодинамическом равновесии со своей жидкостью.

Масса образовавшейся жидкости оказывается постоянной (при данном объёме) благодаря равновесию двух встречных процессов: конденсации молекул пара и испарению молекул жидкости.

■ Качественная зависимость плотности и давления насыщенного пара от температуры, их независимость от объёма насыщенного пара

Давление влияет на переход пар — жидкость.

Давление насыщенного пара при данной температуре — максимальное давление, которое может иметь пар над жидкостью при этой температуре.

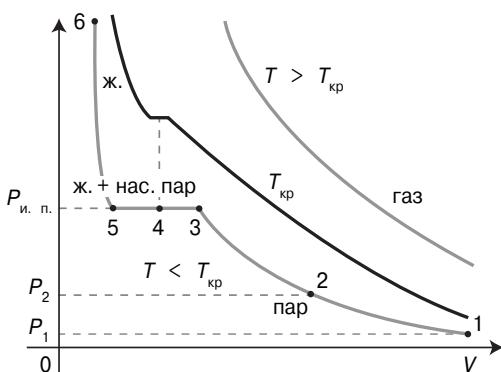
Давление насыщенного пара возрастает при увеличении температуры жидкости.

Давление насыщенного пара p_0 данного вещества зависит только от его температуры и не зависит от объёма.

При неизменной температуре у насыщенного пара остаются постоянными концентрация, плотность и давление.

При повышении температуры давление насыщенного пара и его плотность возрастают, а плотность жидкости уменьшается из-за теплового расширения.

С ростом внешнего давления при сжатии газа уменьшается среднее расстояние между частицами, возрастает сила притяжения между ними и, соответственно, средняя потенциальная энергия их взаимодействия.



Изотерма сжижения пара (зависимость давления p от объёма V):

1—3 — пар, 3—5 — насыщенный пар + жидкость, 5—6 — жидкость;

P_1 , P_2 , $P_{\text{и.п.}}$ — давления, соответствующие точкам 1, 2, 3—4—5, T — температура, $T_{\text{кр}}$ — критическая температура

В сковородке (толстостенной кастрюле с герметично закрываемой крышкой и предохранительным клапаном) температура кипения воды выше, чем в открытой кастрюле. Чем объясняется этот факт?

Ответ: давление воздуха и пара над водой выше атмосферного, следовательно, давление насыщенного пара в пузырьках должно быть выше, чем при кипении в открытой ёмкости.



Практические задания

- 14** В опыте, иллюстрирующем зависимость температуры кипения от давления воздуха (рис. а), кипение воды под колоколом воздушного насоса происходит уже при комнатной температуре, если давление достаточно мало.

Используя график зависимости давления насыщенного пара от температуры (рис. б), вычислите, какое давление воздуха нужно создать под колоколом насоса, чтобы вода закипела при 40 °С. Ответ поясните, указав, какие явления и закономерности были использованы для объяснения.

Решение:

1. Кипением называется парообразование, которое происходит не только с поверхности жидкости, граничащей с воздухом, но и с поверхности пузырьков насыщенного пара, образующихся в толще жидкости, что резко увеличивает количество испарившейся жидкости. Всплывающие пузырьки вызывают интенсивное перемешивание жидкости.

2. Образование пузырьков пара в жидкости возможно только в том случае, когда давление этого пара p равно давлению снаружи пузырька на глубине h :

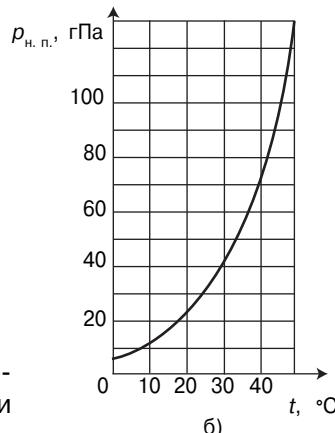
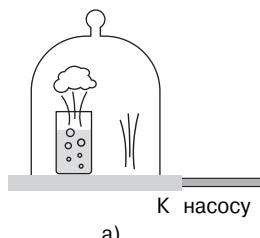
$$p = p_{\text{атм}} + \rho \cdot g \cdot h.$$

В сосуде $\rho \cdot g \cdot h < p_{\text{атм}}$, поэтому условие возникновения кипения:

$$p = p_{\text{атм}}.$$

Следовательно, чтобы вода закипела при 40 °С, в соответствии с графиком, давление воздуха под колоколом необходимо снизить до 70 гПа.

Ответ: 70 гПа.



- 15** В сосуде, содержащем только пар и воду, поршень двигают так, что давление остаётся постоянным. При этом температура
- 1) увеличивается
 - 2) уменьшается
 - 3) не изменяется

Решение:

В закрытом сосуде, содержащем воду, пар будет насыщенным. При движении поршня вниз (скатие) пар будет конденсироваться, а при движении вверх (расширение) вода будет испаряться, так что количество пара будет увеличиваться. То есть при постоянном давлении насыщенного пара его температура остаётся постоянной.

Ответ: 3.

ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА

Влажность воздуха — содержание водяного пара в воздухе.

■ Относительная влажность

■ Абсолютная влажность

Абсолютная влажность воздуха ρ , ρ — масса водяных паров, содержащихся в 1 м³ воздуха при заданных условиях. Часто абсолютную влажность воздуха выражают парциальным давлением водяных паров.

Абсолютную влажность воздуха измеряют в паскалях (**Па**) или в килограммах на кубический метр (**кг/м³**).

Для нахождения абсолютной влажности воздуха необходимо определить точку росы и по готовой таблице найти соответствующее ей давление насыщенных водяных паров (плотность этих паров).

Относительная влажность воздуха φ — процентное отношение концентрации водяного пара в воздухе к концентрации насыщенного пара при той же температуре:

$$\varphi = \frac{n}{n_{\text{н.п}}} \cdot 100\%, \text{ или } \varphi = \frac{\rho}{\rho_{\text{н.п}}} \cdot 100\%,$$

где n — концентрация водяного пара в воздухе, $n_{\text{н.п}}$ — концентрация насыщенного пара, ρ — давление водяного пара в воздухе, $\rho_{\text{н.п}}$ — давление насыщенного пара (чаще обозначается ρ_0).

Относительная влажность измеряется в процентах (%).

Концентрация насыщенного пара является максимальной концентрацией, которую может иметь пар над жидкостью.

В атмосферном воздухе всегда присутствуют пары воды при некотором парциальном давлении p , которое, как правило, меньше давления насыщенного пара p_0 .

Для каждой температуры T давление p_0 насыщенного пара определяется по кривой равновесия $p_0(T)$ для данного вещества.



Практические задания

- 16** Относительная влажность воздуха в помещении при температуре 20 °С равна 70 %. Пользуясь таблицей давления насыщенных паров воды, определите давление водяных паров в помещении.

$t, ^\circ\text{C}$	16	17	18	19	20	21	22
$p, \text{ мм рт. ст.}$	13,6	14,5	15,5	16,5	17,5	18,7	19,8

Дано:

$$t = 20^\circ\text{C}$$

$$\varphi = 70\%$$

$p - ?$

Решение:

Из формулы влажности $\varphi = \frac{p}{p_{\text{н.п}}} \cdot 100\%$

выразим давление водяных паров: $p = \frac{\varphi \cdot p_{\text{н.п}}}{100\%}$.

Давление p_0 насыщенного пара при температуре 20 °С определим из приведённой таблицы: $p_0 = 17,5 \text{ мм рт. ст.}$

Тогда

$$p = \frac{70\% \cdot 17,5 \text{ мм рт. ст.}}{100\%} = 12,25 \text{ мм рт. ст.}$$

Ответ: $p = 12,25 \text{ мм рт. ст.}$

ИЗМЕНЕНИЕ АГРЕГАТНЫХ СОСТОЯНИЙ ВЕЩЕСТВА

Любое вещество при определённых условиях может находиться в различных **агрегатных состояниях** — твёрдом, жидким и газообразном.

Переход из одного состояния (фазы) в другое называется **фазовым переходом** или фазовым превращением.

■ Парообразование

Парообразование — явление превращения жидкости в газ (пар).

Единица измерения удельной теплоты парообразования — джоуль на килограмм (**Дж/кг**).

Виды парообразования

Испарение — это парообразование с поверхности жидкости.

Испарение происходит при любой температуре, поскольку при любой температуре в жидкости находятся такие молекулы, которые обладают достаточной кинетической энергией, чтобы преодолеть силы сцепления между молекулами и совершить работу выхода из жидкости. При испарении жидкость покидают молекулы, обладающие большей скоростью.

Скорость испарения зависит от следующих факторов:

► температуры (чем выше температура жидкости, тем больше скорость движения молекул, у которых кинетическая энергия достаточна, чтобы преодолеть притяжение соседних молекул и вылететь с поверхности жидкости);

► площади поверхности жидкости (чем больше площадь испаряемой поверхности, тем большее число молекул одновременно вылетает из жидкости);

► движения воздуха (если дует ветер, который уносит эти молекулы, испарение происходит быстрее);

► рода жидкости (быстрее испаряется та жидкость, молекулы которой

притягиваются друг к другу с меньшей силой).

При испарении температура жидкости понижается, так как внутренняя энергия жидкости уменьшается из-за потери быстрых молекул. Но если подводить к жидкости тепло, то её температура может не изменяться.

Кипение — интенсивный переход жидкости в пар, происходящий с образованием пузырьков пара по всему объёму жидкости при определённой температуре.

Кипение возможно лишь при определённой температуре — температуре кипения.

Кипение начинается лишь после того, как давление внутри пузырьков сравнивается с давлением в окружающей жидкости.

Во время кипения температура жидкости и пара над ней не меняется.

Температура, при которой жидкость кипит, называется **температурой кипения**.

Температура кипения некоторых веществ при нормальном атмосферном давлении:

гелий — 4,15 К;
воздух — 81,78 К;
азот — 77,15 К;
кислород — 90,15 К;
аммиак — 239,8 К;
ацетон — 329,7 К;
спирт — 351,15 К;
вода — 373,15 К;
ртуть — 630,15 К;
графит — 4473 К.

Кипение происходит с поглощением теплоты. Большая часть подводимой теплоты расходуется на разрыв связей между частицами вещества, остальная часть — на работу, совершающую при расширении пара.

В результате энергия взаимодействия между частицами пара становится больше, чем между частицами жидкости, поэтому внутренняя энергия пара больше, чем внутренняя энергия жидкости при той же температуре.

Конденсация

Процесс превращения пара в жидкость называется **конденсацией**.

Примеры конденсации: пары воды в верхних (холодных) слоях атмосферы превращаются в облака; летним вечером или под утро, когда становится холоднее, выпадает роса.

Конденсация пара сопровождается выделением энергии. Конденсируясь, пар отдаёт то количество энергии, которое пошло на его образование. При повышении атмосферного давления температура кипения повышается.

На стол поставили две одинаковые бутылки, наполненные равным количеством воды комнатной температуры. Одна из них завёрнута в мокре полотенце, другая — в сухое. Как изменится температура воды в обеих бутылках, если измерить её через некоторое время?

Ответ: температура воды в бутылке, обёрнутой мокрым полотенцем, окажется ниже комнатной.

■ Плавление и кристаллизация

Плавление — переход вещества из твёрдого состояния в жидкое:

- сопровождается поглощением энергии, то есть к веществу необходимо подводить теплоту;
- внутренняя энергия вещества увеличивается.

Единица измерения удельной теплоты плавления — джоуль на килограмм (**Дж/кг**).

Кристаллизация (затвердевание) вещества — переход вещества из жидкого состояния в твёрдое (процесс, обратный плавлению):

- сопровождается выделением энергии, то есть от вещества необходимо отводить теплоту;
- внутренняя энергия вещества уменьшается.

Плавление и кристаллизация происходят только при определённой температуре, называемой **температурой плавления**. Каждое вещество имеет свою температуру плавления. Например, у льда $t_{\text{пл}} = 0^{\circ}\text{C}$.

Во время плавления и кристаллизации температура вещества не изменяется.

Как изменяется внутренняя энергия вещества при его переходе из газообразного состояния в жидкое при постоянной температуре и постоянном давлении?

Ответ: внутренняя энергия вещества уменьшается.



Практические задания

17

Горячее вещество, первоначально находившееся в жидким состоянии, медленно охлаждали. Мощность теплоотвода постоянна. В таблице приведены результаты измерений температуры вещества с течением времени.

Время, мин	0	5	10	15	20	25	30	35
Температура, °C	250	242	234	232	232	232	230	216

Выберите из предложенного перечня два утверждения, которые соответствуют результатам проведённых измерений.

- 1) Процесс кристаллизации вещества занял более 25 мин.
- 2) Удельная теплоёмкость вещества в жидком и твёрдом состояниях одинакова.
- 3) Температура плавления вещества в данных условиях равна 232 °C.
- 4) Через 30 мин после начала измерений вещество находилось только в твёрдом состоянии.
- 5) Через 20 мин после начала измерений вещество находилось только в твёрдом состоянии.

Решение:

- 1) Процесс кристаллизации происходит при неизменной температуре, в таблице это соответствует участкам от 15 до 25 мин. Но поскольку мы не знаем точного времени начала и конца процесса (например, кристаллизация могла начаться в 11 мин), то утверждать наверняка о длительности этого процесса не можем. Максимальный период времени: 30 – 10 = 20 мин. Утверждение неверно.
- 2) В жидким состоянии вещество за 5 мин охлаждается на $(250 - 242)^\circ\text{C} = 8^\circ\text{C}$, а в твёрдом — на $(230 - 216)^\circ\text{C} = 14^\circ\text{C}$. Утверждение неверно.
- 3) Температура плавления вещества равна температуре кристаллизации. Процесс кристаллизации происходит при неизменной температуре, в таблице это соответствует участкам от 15 до 25 мин. Утверждение верно.
- 4) Через 30 мин после начала измерений очевидно, что процесс кристаллизации закончился, так как температура ниже температуры плавления, а значит, вещество полностью кристаллизовалось. Утверждение верно.

5) Процесс кристаллизации закончился только после 25 мин, а в промежутке от 15 до 25 мин температура не изменяется, значит, вещество находится и в жидком, и в твёрдом состояниях. Утверждение неверно.

Ответ: 3, 4.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ В ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ

Фазовый переход — переход вещества из одной фазы в другую (например, переход из твёрдого состояния в жидкость, жидкости в газ и обратные им процессы). Схема преобразования энергии при нагревании и охлаждении тела представлена на рисунке.

При любом фазовом переходе температура, а следовательно и ки-

нетическая энергия молекул тела остаётся постоянной. Внутренняя энергия может как увеличиваться, так и уменьшаться:

$$U = \sum E_k + \sum E_p,$$

где U — внутренняя энергия тела, $\sum E_k$ — суммарная кинетическая энергия, $\sum E_p$ — суммарная потенциальная энергия его молекул.



С поглощением энергии происходят плавление и кипение (испарение). Во время плавления и кипения (испарения) кинетическая энергия молекул ΣE_k не изменяется, а потенциальная энергия их взаимодействия ΣE_p увеличивается.

С выделением энергии происходят кристаллизация и конденсация. Во время кристаллизации и конденсации кинетическая энергия молекул ΣE_k не изменяется, а потенциальная энергия их взаимодействия ΣE_p уменьшается.

- Что обжигает кожу сильнее: вода или водяной пар одинаковой массы при одной и той же температуре?

Ответ: водяной пар обжигает кожу сильнее, так как при попадании

на кожу он резко конденсируется (температура тела значительно меньше температуры кипения и самого пара), выделяя много энергии ($2,3 \cdot 10^6$ Дж/кг) и оставляя большой ожог.



Практические задания

18 При кристаллизации вода переходит из жидкого состояния в кристаллическое. При этом переходе

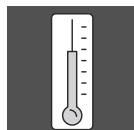
- 1) уменьшается температура, не изменяется внутренняя энергия
- 2) уменьшаются и температура, и внутренняя энергия
- 3) уменьшается внутренняя энергия, не изменяется температура
- 4) уменьшается температура, возрастает внутренняя энергия

Ответ: 3.

19 Лёд при температуре 0 °С внесли в тёплое помещение. Температура льда до того, как он растает,

- 1) не изменится, так как вся энергия, получаемая льдом в это время, расходуется на разрушение кристаллической решётки
- 2) не изменится, так как при плавлении лёд получает тепло от окружающей среды, а затем отдаёт его обратно
- 3) повысится, так как лёд получает тепло от окружающей среды, значит, его внутренняя энергия растёт, и температура льда повышается
- 4) понизится, так как при плавлении лёд отдаёт окружающей среде некоторое количество теплоты

Ответ: 1.



ТЕРМОДИНАМИКА

Техническая термодинамика — раздел физики, изучающий возможности использования внутренней энергии тел для совершения механической работы.

Термодинамический процесс — переход из одногого равновесного состояния в другое.

Процессы, состоящие из последовательности равновесных состояний, называются **квазистатическими**.



ТЕПЛОВОЕ РАВНОВЕСИЕ И ТЕМПЕРАТУРА

Тепловое равновесие — это такое состояние системы тел, находящихся в тепловом контакте, при котором не происходит теплопередачи от одного тела к другому и все макроскопические параметры тел остаются неизменными.

Закон теплового равновесия. У любой группы изолированных тел через какое-то время температуры становятся одинаковыми, то есть наступает состояние теплового равновесия.

Температура — это физический параметр, одинаковый для всех тел,

находящихся в тепловом равновесии.

При тепловом контакте две системы приходят в состояние теплового равновесия, причём энергия всегда передаётся от более нагретого тела к менее нагретому.

✓ В одном сосуде в термодинамическом равновесии друг с другом находятся кислород и азот. Можно ли утверждать, что их температуры равны?

Ответ: да, температуры газов равны.

ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ

Внутренняя энергия тела U — сумма кинетической энергии хаоти-

ческого теплового движения частиц (атомов или молекул) тела и потен-

циальной энергии их взаимодействия:

$$U = \sum E_k + \sum E_p,$$

где U — внутренняя энергия тела, $\sum E_k$ — суммарная кинетическая, $\sum E_p$ — суммарная потенциальная энергия его молекул.

Число степеней свободы i — число возможных независимых направлений движения молекулы: $i=3$ для одноатомного газа, $i=5$ для двухатомного газа, $i=6$ для многоатомного газа.

Внутренняя энергия U данной массы идеального газа зависит:

- от агрегатного состояния вещества (внутренняя энергия тела в газообразном состоянии всегда больше его внутренней энергии в жидким и твёрдом состоянии);
- температуры тела;
- массы тела.

$$U = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{M} \cdot R \cdot T = \frac{i}{2} \cdot v \cdot R \cdot T = \frac{i}{2} \cdot p \cdot V,$$

где i — степень свободы, m — масса газа, M — молярная масса, R — универсальная газовая постоянная, T — температура, v — количество вещества, p — давление, V — объём газа.

Внутренняя энергия U данной массы 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

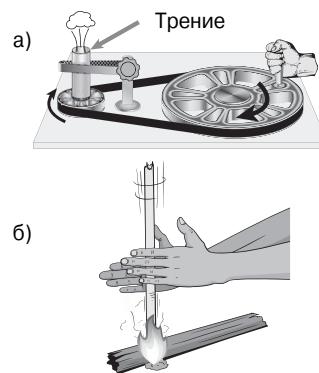
и конечное значения, T — температура.

✓ Как изменяется внутренняя энергия одноатомного идеального газа при изохорном увеличении его давления?

Ответ: при изохорном увеличении давления по закону Шарля температура газа увеличивается, а значит, внутренняя энергия увеличивается.

■ Способы изменения внутренней энергии

Совершение работы над телом (положительной или отрицательной).

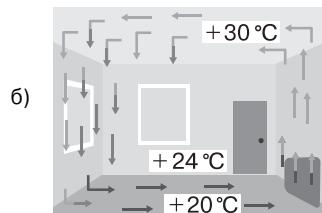
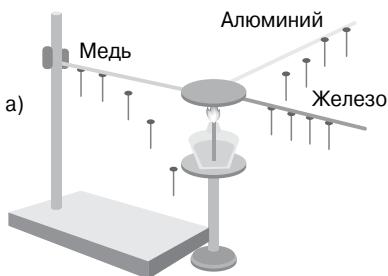


Примеры увеличения внутренней энергии тела за счёт совершения над ним работы:

- нагревание трением до температуры испарения;
- нагревание трением до температуры воспламенения

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.



Примеры увеличения внутренней энергии тела за счёт теплопередачи:
а) способом теплопроводности; б) конвекцией (тёплая стрелка — холодный воздух, светлая стрелка — тёплый воздух); в) излучением



Практические задания

20

Сосуд разделён на две равные по объёму части пористой неподвижной перегородкой. В левой части сосуда содержится 8 г гелия, в правой — 1 моль аргона. Перегородка может пропускать молекулы гелия и является непроницаемой для молекул аргона. Температура газов одинакова и остаётся постоянной. Выберите два верных утверждения, описывающие состояние газов после установления равновесия в системе.

- 1) Давление в обеих частях сосуда одинаково.
- 2) Концентрация гелия и аргона в правой части сосуда одинакова.
- 3) Внутренняя энергия гелия в сосуде больше, чем внутренняя энергия аргона.
- 4) Внутренняя энергия гелия в сосуде в конечном состоянии больше, чем в начальном.
- 5) В правой части сосуда общее число молекул газов в 2 раза меньше, чем в левой части.

Решение:

Поскольку только гелий может проходить через перегородку, то при равенстве температур газов в правой части сосуда установится газо-

вое равновесие, то есть 1 моль гелия переместится в правую часть и концентрации газов аргона и гелия будут равны.

Поскольку сосуд теплоизолирован и перегородка может пропускать молекулы гелия, но является непроницаемой для молекул аргона, то гелий равномерно распределится по всему сосуду. В каждой части сосуда окажется по 4 г гелия:

$$v_{\text{He}} = \frac{m}{M} = \frac{\frac{8 \cdot 10^{-3} \text{ кг}}{4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}}}{= 2 \text{ моль.}}$$

В результате в левой части сосуда окажется 1 моль гелия, а в правой части будет 2 моль смеси:

$$v_{\text{пр}} = v_{\text{He}} + v_{\text{Ar}} = 1 \text{ моль} + 1 \text{ моль} = 2 \text{ моль.}$$

Концентрация газа прямо пропорциональна количеству вещества:

$$n = \frac{N}{V} = \frac{v \cdot N_A}{V} = v \cdot \frac{N_A}{V}.$$

Поскольку $v_{\text{He}} = v_{\text{Ar}} = 1 \text{ моль}$ и объёмы частей сосуда одинаковы, то утверждение 2 верно.

Поскольку в правой части объёма помимо гелия, число частиц которого одинаково в обеих частях, находится ещё и аргон, то утверждение 5 неверно.

Внутренняя энергия одноатомного идеального газа пропорциональна температуре и количеству вещества:

а) в начальном состоянии:

$$\begin{cases} U_{\text{He}} = \frac{3}{2} \cdot v_{\text{He}} \cdot R \cdot T = \frac{3}{2} \cdot 2 \cdot R \cdot T = 3 \cdot R \cdot T \\ U_{\text{Ar}} = \frac{3}{2} \cdot v_{\text{Ar}} \cdot R \cdot T = \frac{3}{2} \cdot 1 \cdot R \cdot T = \frac{3}{2} \cdot R \cdot T \end{cases};$$

б) в конечном состоянии:

$$\begin{cases} U_{\text{He}} = \frac{3}{2} \cdot 2 \cdot R \cdot T = 3 \cdot R \cdot T \\ U_{\text{Ar}} = \frac{3}{2} \cdot 1 \cdot R \cdot T = \frac{3}{2} \cdot R \cdot T \end{cases}.$$

То есть $U_{\text{He}} > U_{\text{Ar}}$, что соответствует утверждению 3, но противоречит утверждению 4.

Из уравнения Менделеева — Клапейрона $p \cdot V = v \cdot R \cdot T$ выразим давление газов: $p = v \cdot \frac{R \cdot T}{V}$.

Поскольку объёмы и температуры в обеих частях сосуда равны, то давление прямо пропорционально количеству вещества в сосуде:

$$\begin{cases} p_{\text{л}} = 2 \cdot \frac{R \cdot T}{V} \\ p_{\text{пп}} = 3 \cdot \frac{R \cdot T}{V} \end{cases}$$

Значит, утверждение 1 неверно.

Ответ: 2, 3.

- 21** Один моль аргона, находящийся в цилиндре при температуре $T_1 = 600$ К и давлении $p_1 = 4 \cdot 10^5$ Па, расширяется и одновременно охлаждается так, что его температура при расширении обратно пропорциональна объёму. Конечное давление газа $p_2 = 10^5$ Па. На какую величину изменилась внутренняя энергия аргона в результате расширения?

Дано:

$$v = 1 \text{ моль}$$

$$T_1 = 600 \text{ К}$$

$$p_1 = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$T = \frac{\alpha}{V}$$

$$p_2 = 10^5 \text{ Па}$$

$$M = 40 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$$i = 3$$

$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$$

$$\Delta U — ?$$

Решение:

Из уравнения Менделеева — Клапейрона

$$\begin{cases} p_1 \cdot V_1 = v \cdot R \cdot T_1 \\ p_2 \cdot V_2 = v \cdot R \cdot T_2 \end{cases}, \text{ откуда } \frac{p_1}{p_2} \cdot \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Учитывая условие $T = \frac{\alpha}{V}$, имеем: $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_2}{T_1}$.

Тогда $\frac{p_1}{p_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_1}{T_2}$, или $\frac{T_1}{T_2} = \sqrt{\frac{p_1}{p_2}}$.

$$\frac{T_1}{T_2} = \sqrt{\frac{4 \cdot 10^5 \text{ Па}}{10^5 \text{ Па}}} = 2, \text{ откуда } T_2 = \frac{1}{2} T_1 = \frac{1}{2} \cdot 600 \text{ К} = 300 \text{ К.}$$

Тогда изменение внутренней энергии

$$\Delta U = \frac{i}{2} \cdot v \cdot R \cdot (T_2 - T_1).$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} \cdot 1 \text{ моль} \cdot 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot (300 \text{ К} - 600 \text{ К}) =$$

$$= -3740 \text{ Дж.}$$

Ответ: $\Delta U = -3740 \text{ Дж.}$

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Рассмотрим теплопередачу как способ изменения внутренней энергии без совершения работы.

■ Теплопроводность

Теплопроводность — 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.



Теплопроводность не сопровождается переносом вещества.

Этот вид передачи внутренней энергии характерен как для твёрдых веществ, так и для жидкостей и газов. Теплопроводность различных веществ разная. Металлы обладают самой высокой теплопроводностью, причём у разных металлов теплопроводность отличается. Жидкости обладают меньшей теплопроводностью, чем твёрдые тела, а газы — меньшей, чем жидкости.

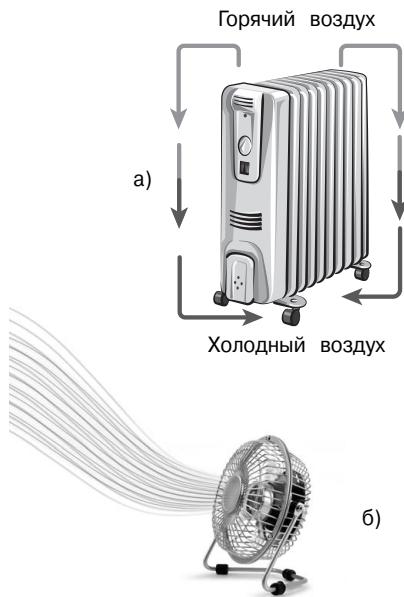
Вещества, имеющие низкую теплопроводность, называются **теплоизоляторами**. Лучший изолятор — воздух. Теплоизоляционные материалы замедляют движение молекул (молекулы медленнее всего движутся в сухом воздухе). Поэтому при производстве строительных материалов используют основной принцип

теплоизоляции — удержание воздуха в порах или ячейках материала.

■ Конвекция

Конвекция — вид теплопередачи, при котором энергия передаётся потоками (струями) вещества. Характерна для жидкостей и газов.

Различают естественную и вынужденную конвекцию.



Примеры конвекции:

а) естественная: нагревание воздуха радиатором отопления (тёмная стрелка — движение холодного воздуха, светлая стрелка — тёплого воздуха); б) искусственная: движение воздуха под действием вентилятора

■ Излучение

Излучение — вид теплопередачи, при котором энергия передаётся с помощью электромагнитных волн (преимущественно инфракрасного диапазона). Может происходить в вакууме.

Светлые и тёмные поверхности тел поглощают излучение по-разному:

■ тела с тёмной поверхностью не только лучше поглощают, но и лучше излучают энергию;

■ тела со светлой или зеркальной поверхностью не только меньше поглощают, но и меньше излучают энергию.

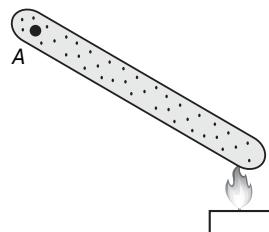
В теплопередаче одновременно могут участвовать все три вида изменения внутренней энергии: теплопроводность, конвекция, излучение.



Практические задания

22

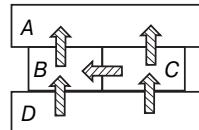
Запаянную металлическую трубку с газом нагревают (см. рисунок). Через некоторое время температура газа в точке А повышается. Какой вид теплопередачи в основном переносит энергию от места нагревания в точку А?



Ответ: перенос энергии в этом случае происходит всеми тремя способами, но в основном путём теплопроводности, так как металлы — хорошие проводники.

23

Четыре металлических бруска расположены вплотную друг к другу, как показано на рисунке. Стрелки указывают направление теплопередачи от одного бруска к другому. Температуры брусков в данный момент: 100 °C, 80 °C, 60 °C, 40 °C. Какой бруск имеет температуру 60 °C?



Решение:

Внутренняя энергия передаётся от более нагретого тела к менее нагретому. Расположим тела в порядке убывания внутренней энергии, что соответствует направлению стрелок: $D \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$.

Сопоставим с температурами брусков: $100\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 80\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 60\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Температуру 60 °C имеет бруск B.

Ответ: B.

КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ. УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЁМКОСТЬ ВЕЩЕСТВА

Энергия, переносимая от одной системы к другой только за счёт разницы в температурах этих систем, называется **количеством теплоты** Q .

Единица измерения количества теплоты (как и любой энергии) — джоуль (**Дж**).

Удельная теплоёмкость C — это количество теплоты, которое получает или отдаёт тело массой 1 кг при изменении его температуры на 1 К.

Единица измерения — джоуль на килограмм-градус Цельсия ($\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot {}^\circ\text{C}}$).

■ Формулы вычисления количества теплоты для различных процессов

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 (см. раздел «Удельная теплота плавления», с. 166), m — масса тела.

Количество теплоты, **необходимое для парообразования** (выделившееся при конденсации) тела:

$$Q = r \cdot m,$$

где r — удельная теплота парообразования вещества (см. раздел «Удельная теплота парообразования», с. 166), m — масса тела.

Количество теплоты, **выделившееся при сгорании** топлива:

$$Q = q \cdot m,$$

где q — удельная теплота сгорания топлива (см. раздел «Удельная теплота сгорания топлива», с. 166), m — масса тела.

В одинаковые калориметры налили равное количество воды и эфира, первоначальная температура которых составляет 25 °С. Будут ли отличаться (и если будут, то как) показания термометров в воде и эфире через некоторое время? Ответ поясните.

Ответ: показания термометра в калориметре с эфиром будут ниже, так как он испаряется быстрее, а испаряясь, жидкость теряет свою внутреннюю энергию.

Имеются деревянный и металлический шарики одинакового объёма. Какой из шариков в 40-градусную жару на ощупь кажется холоднее?

Ответ: деревянный шарик в 40-градусную жару на ощупь кажется хо-

лоднее. Теплопроводность металлического шарика больше, чем деревянного. Теплоотвод от металлического шарика к более холодному пальцу происходит интенсивнее. Это создаёт ощущение более горячего тела.



Практические задания

24 Какое количество теплоты необходимо для нагревания 100 г свинца от 300 до 320 К?

Дано:

$$m_1 = 100 \text{ г} = 0,1 \text{ кг}$$

$$T_1 = 300 \text{ К}$$

$$T_2 = 320 \text{ К}$$

$$C = 130 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Q — ?

Решение:

Количество теплоты, необходимое для нагревания:

$$Q = C \cdot m \cdot \Delta T = 130 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,1 \text{ кг} \cdot (320 \text{ К} - 300 \text{ К}) =$$

$$= 260 \text{ Дж.}$$

Ответ: $Q = 260 \text{ Дж.}$

25 Для нагревания кирпича массой 2 кг от 20 °С до 85 °С затрачено такое же количество теплоты, как для нагревания той же массы воды на 13 °С. Чему равна теплоёмкость кирпича?

Дано:

$$m_1 = m_2 = 2 \text{ кг}$$

$$T_1 = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_2 = 85 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Q_1 = Q_2$$

$$\Delta T = 13 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$C_2 = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{ }^{\circ}\text{C}}$$

C₁ — ?

Решение:

Количество теплоты, необходимое для нагревания:

$$Q = C_1 \cdot m \cdot (T_2 - T_1) = C_2 \cdot m \cdot \Delta T,$$

$$\text{откуда } C_1 = C_2 \cdot \frac{\Delta T}{T_2 - T_1}.$$

$$C_1 = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{ }^{\circ}\text{C}} \cdot \frac{13 \text{ }^{\circ}\text{C}}{85 \text{ }^{\circ}\text{C} - 20 \text{ }^{\circ}\text{C}} = 840 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{ }^{\circ}\text{C}}.$$

Ответ: $C_1 = 840 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{ }^{\circ}\text{C}}.$

■ Удельная теплота парообразования

Удельная теплота парообразования r — физическая величина, показывающая, какое количество теплоты необходимо, чтобы обратить жидкость массой 1 кг в пар без изменения температуры.

Единица измерения удельной теплоты парообразования в системе СИ — джоуль на килограмм (**Дж/кг**).

С ростом давления удельная теплота парообразования уменьшается, при понижении давления — увеличивается.

■ Удельная теплота плавления

Удельная теплота плавления λ — физическая величина, показывающая, какое количество теплоты

необходимо, чтобы обратить твёрдое тело массой 1 кг в жидкость без изменения температуры.

Единица измерения удельной теплоты плавления в системе СИ — джоуль на килограмм (**Дж/кг**).

■ Удельная теплота сгорания топлива

Удельная теплота сгорания топлива q — физическая величина, показывающая, какое количество теплоты выделяется при полном сгорании 1 кг топлива.

Единица измерения удельной теплоты сгорания в системе СИ — джоуль на килограмм (**Дж/кг**).

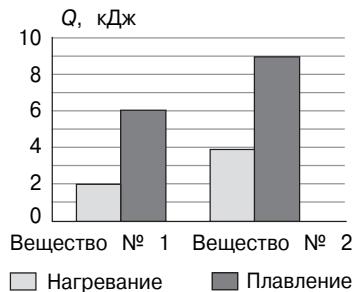
Удельная теплота парообразования, удельная теплота плавления, удельная теплота сгорания топлива — величины, характеризующие собственные свойства вещества, являются справочными данными.



Практические задания

- 26** На диаграмме для двух веществ приведены значения количества теплоты, необходимого для нагревания 1 кг вещества на 10°C и для плавления 100 г вещества, нагретого до температуры плавления. Сравните удельную теплоту плавления (λ_1 и λ_2) двух веществ.

Ответ: удельная теплота плавления второго вещества больше в 1,5 раза, то есть $\lambda_1 = 1,5\lambda_2$.



27

Автомобиль массой 2,3 т равномерно движется по горизонтальной дороге. Определите путь, пройденный автомобилем, если при средней силе сопротивления движению, равной 0,03 веса автомобиля, двигатель израсходовал 15 л бензина. КПД двигателя равен 20 %.

Дано:

$$m = 2300 \text{ кг}$$

$$F_{\text{сопр}} = 0,03 mg$$

$$V = 15 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$\rho = 710 \text{ кг/м}^3$$

$$\eta = 20\%$$

$$q = 4,6 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$$s - ?$$

Решение:

КПД двигателя:

$$\eta = \frac{A_{\text{п}}}{A_3} \cdot 100\%,$$

$$\text{где полезная работа: } A_{\text{п}} = F_c \cdot s = 0,03 mgs.$$

За счёт сгорания бензина совершается затраченная работа: $Q = q \cdot m_b$, где масса бензина $m_b = \rho \cdot V$.

$$\text{Тогда } \eta = \frac{0,03mgs}{q \cdot \rho \cdot V} \cdot 100\%,$$

$$\text{откуда } s = \frac{q \cdot \rho \cdot V \cdot \eta}{0,03mg \cdot 100\%}.$$

$$s = \frac{4,6 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг} \cdot 710 \text{ кг/м}^3 \cdot 15 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot 20\%}{0,03 \cdot 2300 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2 \cdot 100\%} = \\ = 1,42 \cdot 10^5 \text{ м} = 142 \text{ км.}$$

Ответ: $s = 142 \text{ км.}$

ЭЛЕМЕНТАРНАЯ РАБОТА В ТЕРМОДИНАМИКЕ

Если объём газа изменился на малую величину ΔV , то газом или над газом совершается работа:

$$A = p \cdot S \cdot \Delta h = p \cdot \Delta V,$$

$$\text{или } A = \frac{m}{M} \cdot R \cdot \Delta T = v \cdot R \cdot \Delta T,$$

где p — давление газа, S — площадь поршня, Δh — его перемещение, ΔV — изменение объёма, m — масса газа, M — молярная масса, R — универсальная газовая постоянная, ΔT — изменение тем-

пературы, v — количество вещества.

Если газ совершает работу расширяясь, то работа считается положительной: $A > 0$ при $\Delta V > 0$.

Если внешние силы совершают над газом работу, сжимая его, то она считается отрицательной:

$$A < 0 \text{ при } \Delta V < 0.$$

При изохорном процессе ($\Delta V = 0$) работа не совершается.

■ Вычисление работы по графику процесса на pV -диаграмме

Работа численно равна **площади фигуры** под графиком процесса на pV -диаграмме.

Величина работы зависит от того, каким путём совершился переход из начального состояния в конечное.



Практические задания

- 28** В цилиндре при 20°C находится 2 кг воздуха под давлением $9,8 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Какова работа воздуха при его изобарном нагревании на 100°C ? Ответ выразите в килоджоулях (кДж) и округлите до целых.

Дано:

$$\begin{aligned}T &= 293 \text{ К} \\m &= 2 \text{ кг} \\p &= 9,8 \cdot 10^5 \text{ Па} \\p &= \text{const} \\\Delta T &= 100 \text{ К} \\R &= 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \\M &= 29 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}\end{aligned}$$

$$A = ?$$

Решение:

По формуле работы газа $A = p \cdot \Delta V$.
Из уравнения Менделеева — Клапейрона

$$p \cdot \Delta V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot \Delta T. \text{ Тогда } A = \frac{m}{M} \cdot R \cdot \Delta T.$$

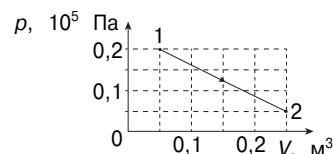
$$A = \frac{2 \text{ кг}}{29 \cdot 10^{-3} \text{ кг}} \cdot 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 100 \text{ К} =$$

$$= 5,7 \cdot 10^4 \text{ Дж} = 57 \text{ кДж.}$$

Ответ: $A = 57 \text{ кДж.}$

- 29** Какую работу совершил одноатомный газ в процессе, изображённом на pV -диаграмме (см. рисунок)?

- 1) $2,5 \text{ кДж}$ 3) 3 кДж
2) $1,5 \text{ кДж}$ 4) 4 кДж



Решение:

Под графиком процесса образуется трапеция, площадь которой будет равна: $A = \frac{(0,05 + 0,2) \cdot 10^5 \text{ Па}}{2} \cdot 0,2 \text{ м}^3 = 2,5 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 2,5 \text{ кДж.}$

Ответ: 1.

ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Первый закон термодинамики.

Количество теплоты, полученное системой, идёт на изменение её внутренней энергии и совершение работы над внешними телами:

$$Q = \Delta U + A,$$

где Q — количество теплоты, полученное системой, $Q = \Delta U + A$ — изменение внутренней энергии, A — работа газа.

Первый закон термодинамики утверждает, что **нельзя построить вечный двигатель первого рода**, то есть такую периодически действующую машину, которая совершала

бы работу большую, чем энергия, что подводится к машине извне.

✓ $Q > 0$, если система получает тепло, и $Q < 0$, если отдаёт; $Q = 0$ в теплоизолированной системе (**адиабатический процесс** — процесс, протекающий в отсутствие теплообмена с окружающими телами).

$\Delta U > 0$, если температура газа повышается, и $\Delta U < 0$, если понижается; $\Delta U = 0$ в **изотермическом** процессе.

$A > 0$, если газ совершает работу, и $A < 0$, если работа совершается над газом; $A = 0$ в **изохорном** процессе.



Практические задания

30 Газ совершил работу 10 Дж и получил количество теплоты 6 Дж. Как изменилась при этом внутренняя энергия газа?

Дано:

$$A = 10 \text{ Дж}$$

$$Q = 6 \text{ Дж}$$

$$\Delta U = ?$$

Решение:

По первому закону термодинамики

$$Q = \Delta U + A, \text{ откуда } \Delta U = Q - A.$$

$$\Delta U = 6 \text{ Дж} - 10 \text{ Дж} = -4 \text{ Дж.}$$

Ответ: уменьшилась на 4 Дж.

31 Идеальный одноатомный газ переходит из начального состояния с давлением $p_1 = 5,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$ и объёмом $V_1 = 5,0 \text{ л}$ в состояние с давлением $p_2 = 4,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$ и объёмом $V_2 = 10 \text{ л}$, совершая работу $A = 1,75 \text{ кДж}$. Масса газа в процессе остаётся постоянной. Какое количество теплоты получил газ при этом переходе?

Дано:

$$\begin{aligned} i &= 3 \\ p_1 &= 5,0 \cdot 10^5 \text{ Па} \\ V_1 &= 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \\ p_2 &= 4,0 \cdot 10^5 \text{ Па} \\ V_2 &= 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \\ A &= 1750 \text{ Дж} \\ m &= \text{const} \\ R &= 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \\ \hline Q &=? \end{aligned}$$

Решение:

По первому закону термодинамики $Q = \Delta U + A$, где ΔU — изменение внутренней энергии.

Используя уравнение Менделеева — Клапейрона, получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_1 = \frac{3}{2} \cdot \frac{m}{M} \cdot R \cdot T_1 = \frac{3}{2} \cdot p_1 \cdot V_1 \\ U_2 = \frac{3}{2} \cdot \frac{m}{M} \cdot R \cdot T_2 = \frac{3}{2} \cdot p_2 \cdot V_2 \end{array} \right. , \text{ откуда}$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} \cdot (p_2 \cdot V_2 - p_1 \cdot V_1).$$

$$\text{Тогда } Q = \Delta U + A = \frac{3}{2} \cdot (p_2 \cdot V_2 - p_1 \cdot V_1) + A.$$

$$Q = \frac{3}{2} \cdot (4,0 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 - 5,0 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3) +$$

$$+ 1750 \text{ Дж} = 4000 \text{ Дж} = 4 \text{ кДж.}$$

Ответ: $Q = 4 \text{ кДж.}$

ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ. НЕОБРАТИМОСТЬ

Многие тепловые процессы могут протекать только в одном направлении. Такие процессы называются **необратимыми**.

Примеры необратимых процессов: охлаждение вещества, расширение газа в пустоту, диффузия и т. д.

Обратимыми процессами называют процессы перехода системы из одного равновесного состояния в другое, которые можно провести в обратном направлении через ту

же последовательность промежуточных равновесных состояний.

Примеры обратимых процессов: нагревание вещества, сжатие газа внешними силами и т. д.

■ Формулировки второго закона термодинамики

Формулировка 1 (Клаузиус, 1850 г.): невозможен процесс, при котором

тепло самопроизвольно переходит от тел менее нагретых к телам более нагретым.

Формулировка 2 (Томсон, 1851 г.): невозможен круговой процесс, единственным результатом которого было бы производство работы за счёт уменьшения внутренней энергии теплового резервуара.

Формулировка 3 (Оствальд, 1901 г.): невозможен вечный двигатель второго рода, то есть двига-

тель, в котором рабочее тело, совершая круговой процесс, получало бы энергию в форме теплоты от одного внешнего тела и целиком передавало бы её в форме работы другому внешнему телу.

Второй закон термодинамики устанавливает направление самопроизвольных процессов в природе и условия осуществления процессов превращения теплоты в работу, с которыми приходится иметь дело на практике.

ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВЫХ МАШИН. КПД

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

Три основных элемента любого теплового двигателя:

- рабочее тело (газ или пар), совершающее работу;
- нагреватель, сообщающий энергию рабочему телу;
- холодильник, поглощающий часть энергии от рабочего тела.

Замкнутый процесс (цикл) — совокупность определённых термодинамических процессов, в результате которых система возвращается в исходное состояние.

К тепловым машинам относятся паровые двигатели, двигатели внутреннего сгорания, реактивные двигатели, холодильные машины (термокомпрессоры) и др.

■ КПД

Коэффициент полезного действия теплового двигателя (КПД) η — отношение работы, совершаемой двигателем за цикл, к количеству теплоты, полученному от нагревателя:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} \cdot 100\% = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100\%,$$

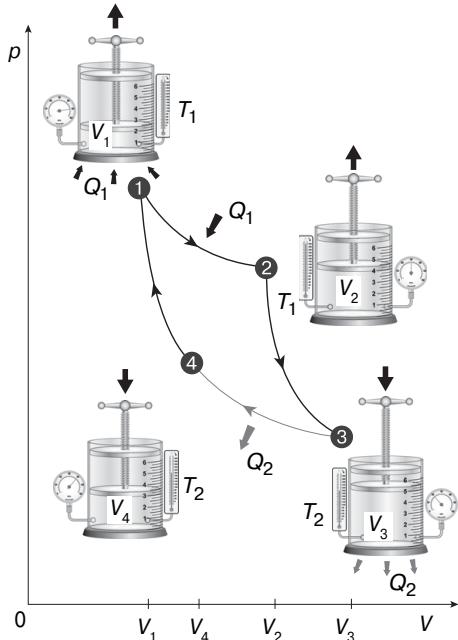
где $A = Q_1 - Q_2$ — полезная работа, Q_1 — количество теплоты, переданное системе, Q_2 — количество теплоты, отданное системой. Коэффициент полезного действия теплового двигателя всегда **меньше единицы**.

■ Максимальное значение КПД. Цикл Карно

Французский инженер С. Карно предложил использовать цикл, со-

стоящий из двух изотермических и двух адиабатных процессов.

Максимальное значение КПД тепловых двигателей, соответствующее циклу Карно:



$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\%,$$

где T_1 — температура нагревателя, T_2 — температура холодильника.

Цикл Карно — самый эффективный цикл, имеющий максимальный КПД.

Для повышения КПД теплового двигателя следует понижать температуру холодильника и увеличивать температуру нагревателя.

Диаграмма (pV -зависимость давления от объема) цикла Карно:

Q_1 — подводимое количество теплоты, Q_2 — отводимое количество теплоты;

1—2 и 3—4 — изотермы, 2—3 и 4—1 — адиабаты; V_1, V_2, V_3, V_4 — объемы газа в точках 1, 2, 3, 4.

Участок 1—2 — изотермическое расширение при температуре T_1 : $A_{12} = Q_{12}$.

Участок 2—3 — адиабатное расширение: $A_{23} = -\Delta U_{23}$.

Участок 3—4 — изотермическое сжатие: $A_{34} = Q_{23}$.

Участок 4—1 — адиабатное сжатие: $Q = 0$



Практические задания

32 Тепловая машина за цикл работы получает от нагревателя 100 Дж и отдаёт холодильнику 40 Дж. Чему равен КПД тепловой машины?

Дано:

$$Q_1 = 100 \text{ Дж}$$

$$Q_2 = 40 \text{ Дж}$$

$$\eta = ?$$

Решение:

По формуле КПД

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100\%.$$

$$\eta = \frac{100 \text{ Дж} - 40 \text{ Дж}}{100 \text{ Дж}} \cdot 100\% = 60\%.$$

Ответ: $\eta = 60\%$.

33

Тепловая машина работает по циклу Карно. Температуру нагревателя машины увеличили, оставив температуру холодильника прежней. Количество теплоты, отданное рабочим телом холодильнику за цикл, не изменилось. Как изменились при этом КПД тепловой машины и количество теплоты, полученное газом за цикл от нагревателя?

Для каждой величины определите соответствующий характер изменения и подберите к каждой букве соответствующую цифру.

- | | |
|---|------------------|
| A) КПД тепловой машины | 1) увеличилась |
| Б) количество теплоты, полученное газом от нагревателя за цикл работы | 2) уменьшилась |
| | 3) не изменилась |

Цифры в ответе могут повторяться.

Решение:

$$\text{Максимальное значение КПД цикла Карно: } \eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Если температуру нагревателя T_1 тепловой машины (знаменатель дроби $\frac{T_2}{T_1}$) увеличили, оставив температуру холодильника прежней, то значение дроби $\frac{T_2}{T_1}$ уменьшилось, при этом КПД $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ увеличился.

Поскольку КПД тепловой машины также можно определить по формуле: $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$, объединяя формулы КПД, получим:

$$1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}, \text{ или } \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}.$$

Если правая часть равенства уменьшилась, то левая также должна уменьшиться, значит, Q_1 увеличится.

Ответ: А — 1; Б — 1.

УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА

Суммарное количество теплоты $\sum Q_i$, которое выделяется в теплоизолированной системе, равно количеству

теплоты (суммарному) $\sum Q'_i$, которое в этой системе поглощается.

$$\sum Q_i = \sum Q'_i.$$

По своему смыслу **уравнение теплового баланса** — это закон сохранения энергии для процессов теплообмена в теплоизолированных системах.



Q считается положительным, если тело получает тепло, и отрицательным — если тело отдаёт тепло. Если в процессе теплообмена вещество изменяет агрегатное состояние, то необходимо учитывать теплоту соответствующего фазового перехода.

✓ Металлическая кружка с водой плавает в кастрюле с водой. Закипит ли вода в кружке, если кастрюлю поставить на огонь?

Ответ: нет, не закипит. Количество теплоты будет расходоваться на нагревание металлической кружки, а поскольку во время парообразования температура воды в кастрюле меняться не будет и останется равной 100 °C, то в результате на парообразование воды в кружке энергии будет недостаточно.



Практические задания

34

3 л воды, взятой при температуре 20 °C, смешали с водой при температуре 100 °C. Температура смеси оказалась равной 40 °C. Чему равна масса горячей воды? Теплообменом с окружающей средой пренебречь.

Дано:

$$V_2 = 3 \text{ л} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$T_2 = 20^\circ\text{C}$$

$$T_1 = 100^\circ\text{C}$$

$$\Theta = 40^\circ\text{C}$$

$$\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$C = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°C}}$$

$$m_1 = ?$$

Решение:

Количество теплоты Q_1 , отданное водой при температуре 100 °C при её охлаждении до 40 °C, будет равно по модулю количеству теплоты Q_2 , полученному водой, взятой при температуре 20 °C, нагреваясь до 40 °C:

$$Q_1 = Q_2.$$

Учтём, что $Q_1 = C \cdot m_1 \cdot (T_1 - \Theta)$, где m_1 — масса горячей воды.

$$Q_2 = C \cdot m_2 \cdot (\Theta - T_2),$$

где $m_2 = \rho \cdot V_2 = 10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 = 3 \text{ кг}$ — масса тёплой воды.

Тогда уравнение теплового баланса будет иметь вид: $C \cdot m_1 \cdot (T_1 - \Theta) = C \cdot m_2 \cdot (\Theta - T_2)$, откуда

$$m_1 = \frac{\Theta - T_2}{T_1 - \Theta} \cdot m_2 = \frac{40^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}}{100^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}} \cdot 3 \text{ кг} = 1 \text{ кг}.$$

Ответ: $m_1 = 1 \text{ кг}$.

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА



ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Электродинамика изучает электромагнитное поле, осуществляющее взаимодействие заряженных частиц.

Электростатика — раздел электродинамики, изучающий взаимодействие неподвижных (статических) электрических зарядов.



ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ТЕЛ И ЕЁ ПРОЯВЛЕНИЯ

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

Способы электризации

Электризация трением (соприкосновением) — процесс, в ходе которого часть электронов переходит с одного тела на другое.

Электризация индукцией (без соприкосновения) — процесс, в ходе которого происходит перераспределение электронов между телами (или частями тела).

✓ Когда мы снимаем одежду, изготовленную из синтетических материалов, слышен характерный треск. Какое явление объясняет этот треск?

Ответ: когда мы снимаем одежду, за счёт трения её о тело происходит электризация.

■ Электрический заряд

Электрический заряд q, Q — физическая величина, определяющая силу электромагнитного взаимодействия.

Единица электрического заряда — кулон (**Кл**).

Носителями зарядов могут быть элементарные частицы, атомы, молекулы, макроскопические тела.

■ Два вида заряда

Существуют два вида электрических зарядов — **положительные и отрицательные**.

Носителями отрицательных зарядов являются электроны, положительных — ионы, потерявшие электроны.

■ Элементарный электрический заряд

Существует минимальное значение электрического заряда, одинаковое по модулю для положительных и отрицательных зарядов:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Наименьший электрический заряд имеют элементарные частицы: протон обладает минимальным положительным зарядом $+e$, электрон — минимальным отрицательным зарядом $-e$.

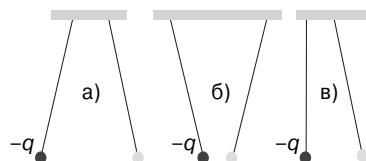
В нейтральном атоме число протонов в ядре равно числу электронов в оболочке (атомный номер).

Электрический заряд тела — дискретная величина:

$$q = n \cdot e,$$

где n — целое число, число элементарных зарядов.

✓ Пара лёгких одинаковых шариков, заряды которых равны по модулю, подвешена на шёлковых нитях. Заряд одного из шариков указан на рисунках. Какой из рисунков соответствует ситуации, когда заряд второго шарика отрицателен?



Ответ: рисунок а.

■ Закон сохранения электрического заряда

Алгебраическая сумма зарядов электрически изолированной системы постоянна:

$$\Sigma Q_i = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n = \text{const},$$

где $Q_1, Q_2, Q_3 \dots Q_n$ — заряды всех тел системы, n — число зарядов в системе.

Электрически изолированная система тел — система тел, через границу которой не проникают заряды.

В соответствии с законом сохранения заряда разноимённые заряды рождаются или исчезают попарно: сколько родилось (исчезло) положительных зарядов, столько же родилось (исчезло) отрицательных.



Практические задания

1 Цинковая пластина, имеющая отрицательный заряд $-10e$, при освещении потеряла 4 электрона. Каким стал заряд пластины?

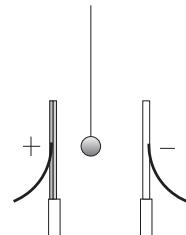
- 1) $+6e$ 2) $-6e$ 3) $+14e$ 4) $-14e$

Решение:

Цинковая пластина потеряла 4 электрона из 10, поэтому её заряд уменьшился на 4.

Ответ: 2.

2 Между двумя металлическими близко расположеными пластинами, укреплёнными на изолирующих подставках, подвесили на шёлковой нити лёгкий незаряженный шарик из фольги. Когда пластины подсоединили к разноимённым клеммам высоковольтного источника напряжения, шарик пришёл в движение. Опишите движение шарика и объясните его. В ходе решения укажите, какие физические явления и закономерности были использованы для объяснения.



Решение:

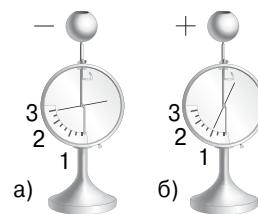
Сила взаимодействия заряженных тел конечных размеров уменьшается с ростом расстояния между ними. Поэтому притяжение к левой (ближайшей) пластине будет больше притяжения к правой пластине, и шарик будет двигаться к левой пластине, пока не коснётся её.

В момент касания пластины шарик приобретёт заряд того же знака, какой имеется у пластины, оттолкнётся от неё и будет двигаться к противоположной пластине. Коснувшись её, шарик поменяет знак заряда, вернётся к первой пластине, и такое движение будет периодически повторяться.

Ответ: под действием электрического поля пластин изменится распределение электронов на шарике, и его левая сторона будет иметь отрицательный заряд, а правая — положительный.

3

На рисунке изображены два одинаковых электрометра, шары которых имеют заряды противоположных знаков. Какими станут показания обоих электрометров, если их шары соединить проволокой?

**Решение:**

По закону сохранения заряда их алгебраическая сумма:

$$\Sigma Q_{12} = Q_1 + Q_2 = -3 + 1 = -2.$$

Поскольку заряд разделится поровну, то $Q_1 = Q_2 = -\frac{2}{2} = -1$. Значит, показания обоих электрометров станут равными 1.

Ответ: 1.**4**

К водянной капле, имевшей электрический заряд $+3e$, присоединилась капля с зарядом $-4e$. Определите электрический заряд объединённой капли.

- 1) $+e$ 2) $+7e$ 3) $-e$ 4) $-7e$

Решение:

У водянной капли не хватало 3 электрона. Если к ней присоединилась капля с зарядом $-4e$, то 1 электрон стал лишним.

Ответ: 3.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗАРЯДОВ

Взаимодействие неподвижных электрических зарядов называют электростатическим, или **кулоновским, взаимодействием**. Одноимённые заряды отталкиваются, разноимённые — притягиваются.

■ Закон Кулона

Силы взаимодействия неподвижных зарядов прямо пропорциональны произведению модулей зарядов и обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними:

$$F = k \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2},$$

где $k = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$ — коэффициент пропорциональности,

■ Точечные заряды

Точечным зарядом называют заряженное тело, размерами которого в условиях данной задачи можно пренебречь.

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$ — электрическая постоянная, q_1 и q_2 — модули зарядов, r — расстояние между зарядами.

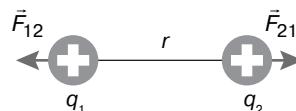
Закон Кулона выполняется для точечных зарядов. Силы взаимодействия подчиняются третьему закону Ньютона: $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$, то есть силы взаимодействия неподвижных зарядов равны по модулю и противоположны по направлению.

Силы кулоновского взаимодействия подчиняются **принципу суперпозиции**: если зарженное тело взаимодействует одновременно с несколькими заряженными телами, то результирующая сила, действующая

на данное тело, равна векторной сумме сил, действующих на это тело со стороны других заряженных тел:

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

где $\vec{R} = \sum \vec{F}_i$ — равнодействующая сила, $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3 \dots \vec{F}_n$ — силы, действующие на данное тело.



Силы отталкивания между двумя положительными зарядами:

q_1 и q_2 — модули зарядов, r — расстояние между зарядами, \vec{F}_{12} — сила Кулона, действующая со стороны второго заряда на первый, \vec{F}_{21} — сила Кулона, действующая со стороны первого заряда на второй



Практические задания

5

Сила взаимодействия между двумя точечными зарядами равна F . Какой она будет, если величину каждого из зарядов увеличить в 3 раза и расстояние между ними также увеличить в 3 раза?

Дано:

$$\begin{aligned} F_1 &= F \\ \frac{q_2}{q_1} &= 3 \\ \frac{r_2}{r_1} &= 3 \\ k &= 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \\ \hline F_2 &- ? \end{aligned}$$

Решение:

По закону Кулона

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1 = k \cdot \frac{q_1 \cdot q_1}{r_1^2} \\ F_2 = k \cdot \frac{q_2 \cdot q_2}{r_2^2} \end{array} \right.$$

Разделив второе уравнение на первое, получим:

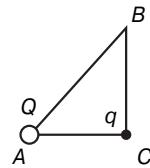
$$\frac{F_2}{F_1} = \left(\frac{q_2}{q_1} \right)^2 \cdot \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 = 3^2 \cdot \left(\frac{1}{3} \right)^2 = 1.$$

Ответ: сила взаимодействия не изменится, то есть останется F .

6

В треугольнике ABC угол C — прямой. В вершине A находится точечный заряд Q . Он действует с силой $2,5 \cdot 10^{-8}$ Н на точечный заряд q , помещённый в вершину C . Если заряд q перенести в вершину B , то заряды будут взаимодействовать с силой $9,0 \cdot 10^{-9}$ Н. Найдите отношение $AC : BC$.

- 1) 0,36 2) 0,60 3) 0,75 4) 1,67

**Дано:**

$$\begin{aligned} F_A &= 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ Н} \\ F_B &= 9,0 \cdot 10^{-9} \text{ Н} \end{aligned}$$

$$\frac{AC}{BC} - ?$$

Решение:

По закону Кулона

$$\begin{cases} F_A = k \cdot \frac{Q \cdot q}{AC^2} \\ F_B = k \cdot \frac{Q \cdot q}{AB^2} \end{cases}$$

$$\frac{F_B}{F_A} = \left(\frac{AC}{AB} \right)^2 = \frac{9,0 \cdot 10^{-9} \text{ Н}}{2,5 \cdot 10^{-8} \text{ Н}} = \frac{9}{25}.$$

Заметим, что $\frac{AC}{AB} = \cos A = \frac{3}{5}$,

$$\text{а } \frac{AC}{BC} = \operatorname{ctg} A = \frac{\cos A}{\sin A} = \frac{\cos A}{\sqrt{1 - \cos^2 A}} = \frac{\frac{3}{5}}{\sqrt{1 - \left(\frac{3}{5}\right)^2}} = \frac{3}{4} = 0,75.$$

Ответ: 3.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

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

Электрическое поле непосредственно невидимо, но может наблюдаться по его действию и с помощью приборов.

Основным действием электрического поля является ускорение тел или

частиц, обладающих электрическим зарядом.

■ Напряжённость электрического поля

Напряжённость электрического поля E — силовая характеристика электрического поля в заданной точке.

Напряжённость электростатического поля E — векторная физи-

ческая 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:

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

где $k = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$ — коэф-

фициент пропорциональности, q — модуль заряда, образующего электрическое поле, r — расстояние от источника поля до пробного заряда.

Напряжённость поля, созданного заряженной сферой (вне сферы):

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

где Q — заряд сферы.

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

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

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

Единица напряжённости — ньютон на кулон (**Н/Кл**) или вольт на метр (**В/м**).

Зная напряжённость поля в определённой точке пространства, можно найти силу, действующую на заряд q , помещённый в эту точку:

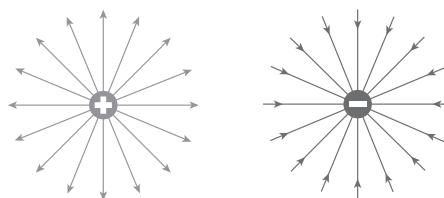
$$\vec{F}_q = \vec{E} \cdot q.$$

■ Поле точечного заряда. Картины линий полей

Для большей наглядности электростатическое поле представляют непрерывными линиями напряжённости.

Линии напряжённости — линии, касательные к которым в каждой точке поля совпадают с направлением вектора напряжённости электростатического поля в данной точке.

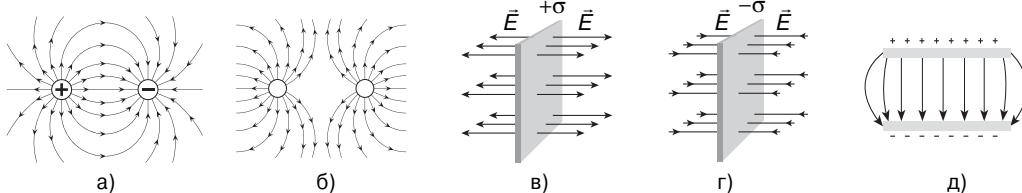
Положительный заряд является источником линий напряжённости. Отрицательный заряд является стоком линий напряжённости.



Электрическое поле точечных зарядов: положительного (слева) и отрицательного (справа)

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, а в области разрежения — меньше).



Электрическое поле: а) диполя (пары разноимённых зарядов); б) диполя (пары одноимённых зарядов); в) положительно заряженной плоскости; г) отрицательно заряженной плоскости; д) разноимённо заряженных пластин

Электрическое поле, векторы напряжённости которого одинаковы во всех точках пространства, называется **однородным** (однородное поле представлено на рисунках в и г).

Электрическое поле, векторы напряжённости которого в разных точках поля отличаются по величине и (или) направлению, называют **неоднородным** (неоднородное поле представлено на рисунках а, б и д).

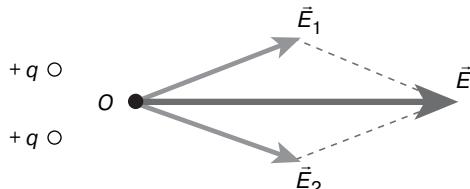
ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

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

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

где $\vec{E} = \sum \vec{E}_i$ — напряжённость поля, $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3 \dots \vec{E}_n$ — напряжённости электрических полей, создаваемые в точке зарядами в отдельности.

Какое направление в точке O имеет вектор напряжённости электрического поля, созданного двумя одноимёнными зарядами?



Ответ: найдём векторную сумму $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ (см. рисунок).



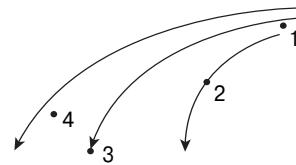
Практические задания

7

На рисунке изображены линии напряжённости электрического поля в некотором месте пространства. В какой из точек напряжённость максимальна по модулю?

Решение:

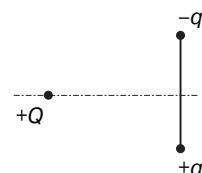
Поскольку число силовых линий, приходящихся на поверхность единичной площади, пропорционально модулю напряжённости, то напряжённость максимальна по модулю в точке 1.



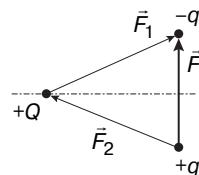
Ответ: в точке 1.

8

Точечный заряд $+Q > 0$ находится на равном расстоянии от двух неподвижных точечных зарядов $+q > 0$ и $-q$ (см. рисунок). Куда направлено относительно рисунка (вправо, влево, вверх, вниз, к наблюдателю, от наблюдателя) ускорение точечного заряда $+Q$ в этот момент времени, если на него действуют только заряды $+q$ и $-q$?

**Решение:**

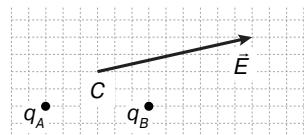
По второму закону Ньютона ускорение точечного заряда $+Q$ направлено так же, как и равнодействующая сил. Покажем силы, действующие на заряд (см. рисунок).



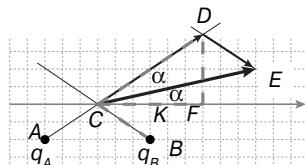
Ответ: вверх.

9

На рисунке изображён вектор напряжённости \vec{E} электрического поля в точке C , которое создано двумя точечными зарядами q_A и q_B . Чему примерно равен заряд q_B , если заряд q_A равен 2 мКл? Ответ выразите в микрокулонах.

**Решение:**

Вектор \vec{E} является суммой векторов CD и DE , которые создаются соответственно зарядами q_A и q_B (см. рисунок). При построении используем правило параллелограмма.



Обратим внимание, что треугольники CDF и CBK подобны с коэффициентом подобия $K=2$.

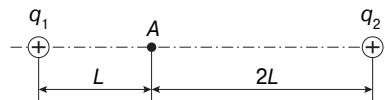
А значит, векторы напряжённости: $\frac{E_A}{E_B} = 2$.

Учитывая значение напряжённости в каждой точке $E_A = k \cdot \frac{q_A}{r^2}$,
 $E_B = k \cdot \frac{q_B}{r^2}$, получим отношение: $\frac{E_A}{E_B} = \frac{k \cdot \frac{q_A}{r^2}}{k \cdot \frac{q_B}{r^2}} = \frac{q_A}{q_B} = 2$, то есть
 $q_B = \frac{1}{2} \cdot q_A = \frac{1}{2} \cdot 2 \text{ мкКл} = 1 \text{ мкКл}$.

Поскольку вектор CD направлен к заряду q_B , следовательно, заряд отрицательный.

Ответ: -1 мкКл .

- 10** Два точечных положительных заряда $q_1 = 200 \text{ нКл}$ и $q_2 = 400 \text{ Кл}$ находятся в вакууме (см. рисунок). Определите величину напряжённости электрического поля этих зарядов в точке A , расположенной на прямой, соединяющей заряды, на расстоянии L от первого и $2L$ от второго заряда. $L = 1,5 \text{ м}$.



Дано:

$$q_1 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$$

$$q_2 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$$

$$L = 1,5 \text{ м}$$

$$r_1 = L$$

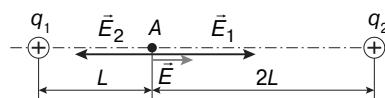
$$r_2 = 2L$$

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

$$E - ?$$

Решение:

Сделаем рисунок.



По принципу суперпозиции найдём результирующий вектор напряжённости в точке A : $E = E_1 - E_2$.

Поскольку

$$\begin{cases} E_1 = k \cdot \frac{q_1}{r_1^2} = k \cdot \frac{q_1}{L^2} \\ E_2 = k \cdot \frac{q_2}{r_2^2} = k \cdot \frac{q_2}{(2L)^2} = \frac{1}{4} \cdot k \cdot \frac{q_2}{L^2} \end{cases},$$

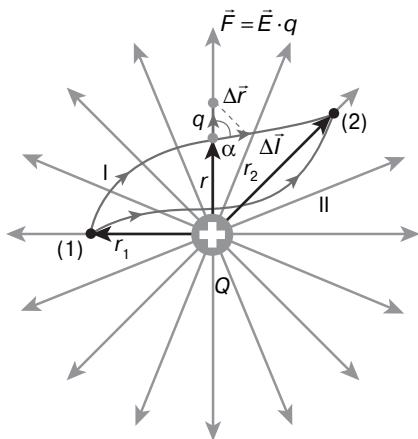
то $E = k \cdot \frac{q_1}{L^2} - \frac{1}{4} \cdot k \cdot \frac{q_2}{L^2} = \frac{k}{L^2} \left(q_1 - \frac{1}{4} \cdot q_2 \right)$.

$$E = \frac{9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}}{(1,5 \text{ м})^2} \cdot \left(2 \cdot 10^{-7} \text{ Кл} - \frac{1}{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \text{ Кл} \right) = 400 \text{ В/м.}$$

Ответ: 400 В/м.

ПОТЕНЦИАЛЬНОСТЬ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

При перемещении пробного заряда q в электрическом поле электрические силы совершают работу.



Работа электрических сил при малом перемещении заряда q из точки 1 в точку 2 по траекториям I и II:

$\vec{F} = \vec{E} \cdot q$ — сила, действующая на заряд q со стороны заряда Q в данной точке; r_1 и r_2 — радиус-векторы заряда в точках 1 и 2; $\Delta\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1 = \Delta\vec{l}$ — разность векторов, равная перемещению Δl .

Работа сил электростатического поля при перемещении заряженной частицы из одной точки в другую не зависит от формы траектории, а зависит лишь от начального и конечного положений частицы. Это означает, что электростатическое поле **потенциально**.

Чем ближе точка к источнику заряда (к положительному полюсу), тем больше её потенциал.

✓ Положительный заряд перемещается в однородном электростатическом поле из точки 1 в точку 2 по разным траекториям. При перемещении по какой траектории электрическое поле совершает меньшую работу?

Ответ: работа одинакова при движении по всем траекториям.

■ Потенциал электростатического поля

Потенциал электростатического поля — энергетическая характеристика точки поля. Обозначение — φ .

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:

$$\varphi = \frac{W_q}{q} = \frac{Q}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot r} = \frac{A}{q},$$

где Q — заряд (точечный или заряд сферы), создающий поле, r — расстояние между зарядами.

Потенциал в данной точке численно равен работе сил электростатического поля по перемещению единичного положительного заряда из

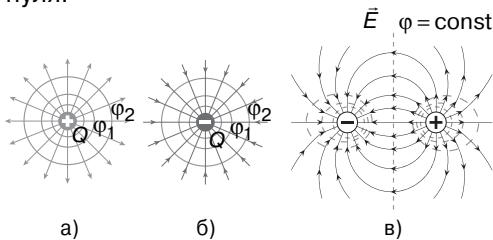
этой точки в точку, принятую за нуль потенциала.

Единицей измерения потенциала является вольт (**В**).

Эквипотенциальная поверхность

— это 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:

- положительного заряда $+Q$ ($\phi_1 > \phi_2$);
- отрицательного заряда $-Q$ ($\phi_1 < \phi_2$);
- разноимённого диполя

Линии напряжённости электростатического поля перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям и направлены от поверхности с большим потенциалом к поверхности с меньшим.

■ Разность потенциалов (электрическое напряжение)

Разность потенциалов U — отношение работы A , совершаемой электрическим полем при переме-

щении положительного заряда Q из одной точки поля в другую, к величине заряда: $U = \frac{A}{Q}$.

Единица измерения разности потенциалов — вольт (**В**).

Работа силы электростатического поля равна произведению модуля перемещаемого заряда q и разности потенциалов в начальной ϕ_1 и конечной ϕ_2 точках:

$$A = q \cdot (\phi_1 - \phi_2) = q \cdot \Delta\phi = q \cdot U,$$

где $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = U$ — разность потенциалов или напряжение U .

■ Потенциальная энергия заряда в электростатическом поле

Работа, совершаемая электрическим полем при перемещении точечного заряда q из точки 1 в точку 2, равна разности значений потенциальной энергии в этих точках и не зависит от пути перемещения заряда и от выбора точки 0:

$$A_{12} = A_{10} + A_{02} = A_{10} - A_{20} = W_{p1} - W_{p2}.$$

Потенциальная энергия заряда q , помещённого в любую точку 1 пространства, относительно фиксированной точки 0 равна работе A_{10} , которую совершил электрическое поле при перемещении заряда q из точки 1 в точку 0:

$$W_{p1} = A_{10}.$$

■ Напряжённость поля и разность потенциалов для однородного электростатического поля

Разность потенциалов U между двумя точками, находящимися на расстоянии d друг от друга в однородном электростатическом поле вдоль линии напряжённости:

$$U = E \cdot d,$$

где E — напряжённость электростатического поля.



Практические задания

- 11** Потенциал в точке A электрического поля равен 200 В, потенциал в точке B равен 100 В. Какую работу совершают силы электрического поля при перемещении положительного заряда 5 мКл из точки A в точку B ?

Дано:

$$\varphi_1 = 200 \text{ В}$$

$$\varphi_2 = 100 \text{ В}$$

$$q = 5 \text{ мКл} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Кл}$$

А — ?

Решение:

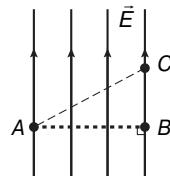
Подставим в формулу работы числовые данные:

$$A = q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Кл} \cdot (200 \text{ В} - 100 \text{ В}) = 0,5 \text{ Дж.}$$

Ответ: $A = 0,5 \text{ Дж.}$

- 12** Однородное электростатическое поле создано равномерно заряженной протяжённой горизонтальной пластиной. Линии напряжённости поля направлены вертикально вверх (см. рисунок).

Из приведённого ниже списка выберите два правильных утверждения и укажите их номера.



- 1) Если в точку A поместить пробный точечный отрицательный заряд, то на него со стороны пластины будет действовать сила, направленная вертикально вниз.
- 2) Пластина имеет отрицательный заряд.
- 3) Потенциал электростатического поля в точке B ниже, чем в точке C .
- 4) Напряжённость поля в точке A меньше, чем в точке C .
- 5) Работа электростатического поля по перемещению пробного точечного отрицательного заряда из точки A в точку B равна нулю.

Решение:

- 1) Поскольку линии напряжённости направлены от «+» к «-», то пластина заряжена положительно, следовательно, она будет притягивать отрицательные заряды. Утверждение верно.
- 2) Из рассуждений, изложенных в предыдущем пункте, следует, что пластина заряжена положительно. То есть утверждение 2 неверно.
- 3) Чем ближе точка к источнику заряда, тем больше её потенциал. Утверждение неверно.
- 4) Так как данное электрическое поле является однородным, значит, в каждой его точке напряжённость одинакова. Утверждение неверно.
- 5) Поскольку точки *A* и *B* находятся на одной эквипотенциальной поверхности (на одинаковом расстоянии от источника поля), то работа при перемещении заряда из точки *A* в точку *B* не совершается. Утверждение верно.

Ответ: 1, 5.

ПРОВОДНИКИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Все вещества по концентрации и уровню подвижности заряженных частиц делят на три группы: проводники, диэлектрики, полупроводники.

Проводник — вещество, способное хорошо проводить электрический ток. Примеры: металлы (типичные проводники), растворы солей, щёлочей, кислот, плазма, тело человека.

Основная особенность проводников — наличие свободных зарядов (электронов), которые участвуют в тепловом движении и могут перемещаться по всему объёму проводника.

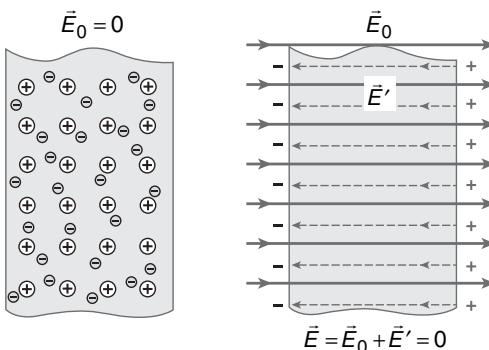
Полупроводник — вещество, в котором количество свободных за-

рядов зависит от внешних условий (температура, напряжённость электрического поля).

Диэлектрик — вещество, не проводящее электрический ток (см. раздел «Диэлектрики в электростатическом поле», с. 191).

■ Проводники в электрическом поле

Электростатическая индукция — перераспределение свободных зарядов в проводнике, внесённом в электрическое поле, в результате чего на поверхности проводника возникают нескомпенсированные положительные и отрицательные заряды.



Электростатическая индукция:

\vec{E}_0 — внешнее электростатическое поле,
 \vec{E}' — индуцированное поле внутри проводника,
 \vec{E} — полное (суммарное) электростатическое поле в проводнике.

Индукционные заряды создают своё собственное поле \vec{E}' , которое компенсирует внешнее поле \vec{E}_0 во всём объёме проводника (внутри проводника)

Полное электростатическое поле внутри проводника равно нулю, а потенциалы во всех точках одинаковы и равны потенциальному на поверхности проводника:

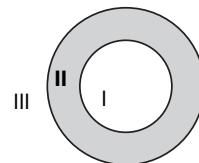
$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' = 0.$$

■ Электростатическая защита

Все внутренние области проводника, внесённого в электрическое поле, остаются **электронейтральными**.

На этом основана **электростатическая защита** — чувствительные к электрическому полю приборы для исключения влияния поля помещают в металлические ящики.

✓ На рисунке изображено сечение уединённого проводящего полого шара. I — область полости, II — область проводника, III — область вне проводника. Шару сообщили отрицательный заряд. В каких областях пространства напряжённость электрического поля, созданного шаром, отлична от нуля?



Ответ: области I и II находятся внутри проводника, следовательно, в них напряжённость поля равна нулю, область III — вне проводника, в ней напряжённость поля не равна нулю.

■ Условие равновесия зарядов

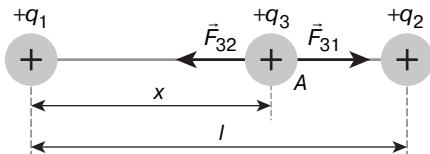
Статическое равновесие возникает тогда, когда геометрическая (векторная) сумма сил, действующих на тело, равна нулю:

$$k \cdot \frac{q_1 \cdot q_3}{x^2} = k \cdot \frac{q_2 \cdot q_3}{(l-x)^2} \text{ или } \frac{q_1}{x^2} = \frac{q_2}{(l-x)^2},$$

$$\text{где } k = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} — \text{ко-}$$

эфффициент пропорциональности, q_1, q_2, q_3 — модули зарядов, x — расстояние между зарядами $+q_1$ и $+q_3$, l — расстояние между зарядами $+q_1$ и $+q_2$.

Равновесие заряда q_3 не зависит ни от его модуля, ни от знака.



Система статических зарядов не может быть устойчивой.

Заряд $+q_3$ в равновесии:

\vec{F}_{31} — сила Кулона, действующая со стороны заряда $+q_1$ на заряд $+q_3$, \vec{F}_{32} — сила Кулона, действующая со стороны заряда $+q_2$ на заряд $+q_3$, x — расстояние между зарядами $+q_1$ и $+q_3$, l — расстояние между зарядами $+q_1$ и $+q_2$



Практические задания

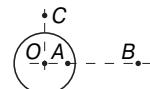
- 13 На неподвижном проводящем единственном шарике радиусом R находится заряд Q . Точка O — центр шарика, $OA = \frac{3R}{4}$, $OB = 3R$, $OC = \frac{3R}{2}$. Модуль напряженности электростатического поля заряда Q в точке C равен E_C .

Чему равен модуль напряженности электростатического поля заряда Q в точке A и точке B ?

Установите соответствие между физическими величинами и их значениями. Подберите к каждой букве соответствующую цифру.

- А) модуль напряженности электростатического поля шарика в точке A
Б) модуль напряженности электростатического поля шарика в точке B

- 1) 0 2) $4E_C$ 3) $\frac{E_C}{2}$ 4) $\frac{E_C}{4}$



Решение:

А) Модуль напряженности электростатического поля шарика в точке A равен нулю, так как напряженность поля внутри проводящего шарика равна нулю.

Б) Модуль напряженности электростатического поля шарика в точке B вычисляется как напряженность, созданная точечным зарядом Q :

$$\left\{ \begin{array}{l} E_C = k \cdot \frac{Q}{(OC)^2} = k \cdot \frac{Q}{\left(\frac{3}{2} \cdot R\right)^2} = \frac{4}{9} \cdot k \cdot \frac{Q}{R^2} \\ \\ E_B = k \cdot \frac{Q}{(OB)^2} = k \cdot \frac{Q}{(3 \cdot R)^2} = \frac{1}{9} \cdot k \cdot \frac{Q}{R^2} = \frac{1}{4} \cdot E_C \end{array} \right.$$

Ответ: А — 1; Б — 4.

ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Диэлектрик — вещество, содержащее только связанные заряды.

Диэлектрики в соответствии со структурой их молекул делят на два вида: полярные и неполярные. Полярный диэлектрик состоит из полярных молекул, а неполярный — из неполярных.

Поляризация диэлектрика — пространственное разделение разноимённых зарядов, входящих в состав атомов (молекул) вещества, под действием внешнего электрического поля.

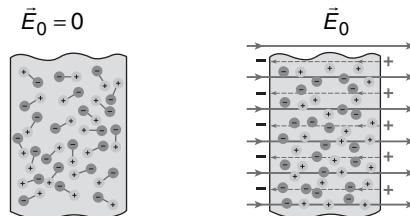
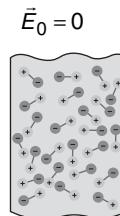
Индукционные заряды создают своё собственное поле \vec{E}' , которое не компенсирует внешнее поле \vec{E}_0 во всём объёме проводника (внутри проводника).

Полное электростатическое поле внутри диэлектрика не равно нулю и оказывается по модулю меньше внешнего поля:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' \neq 0.$$

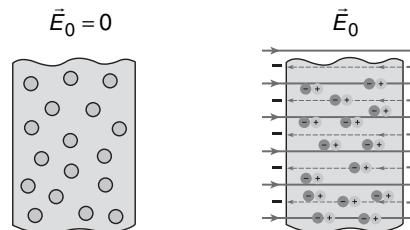
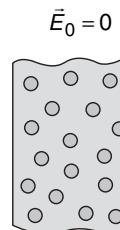
✓ Два стеклянных кубика 1 и 2 сблизили вплотную и поместили в электрическое поле, напряжённость которого направлена горизонтально вправо, как показано в верхней части рисунка. Затем кубики раздвинули, после чего убрали электрическое поле (нижняя часть рисунка). Какими станут заряды кубиков 1 и 2?

Напряжённость суммарного поля связанных зарядов направлена противоположно напряжённости внешнего поля.



$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' \neq 0$$

Ориентационный механизм поляризации полярного диэлектрика

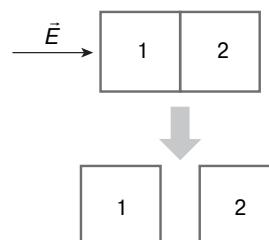


$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' \neq 0$$

Поляризация неполярного диэлектрика:

\vec{E}_0 — внешнее электростатическое поле,
 \vec{E}' — индуцированное поле внутри вещества,
 \vec{E} — полное (суммарное) электростатическое поле в диэлектрике

Ответ: заряды кубиков 1 и 2 будут равны нулю.



■ Диэлектрическая проницаемость вещества

Уменьшение напряжённости электростатического поля в среде по сравнению с вакуумом характеризуется относительной диэлектрической проницаемостью среды.

Относительная диэлектрическая проницаемость среды ϵ — число, показывающее, во сколько раз напряжённость электростатического поля в однородном диэлектрике E меньше, чем напряжённость в вакууме $E_{\text{вак}}$:

$$\epsilon = \frac{E_{\text{вак}}}{E}, \text{ где } E = \epsilon \cdot E_{\text{вак}} \text{ — напряжённость поля в диэлектрике.}$$

Если в однородном диэлектрике с диэлектрической проницаемостью ϵ находится точечный заряд Q , то сила кулоновского взаимодействия зарядов Q и q , напряжённость поля \vec{E} , создаваемого этим зарядом в некоторой точке, и потенциал ϕ в ϵ раз меньше, чем в вакууме:

$$F = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q \cdot Q}{\epsilon \cdot r^2}, \quad E = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{Q}{\epsilon \cdot r^2},$$

$$\phi = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{Q}{\epsilon \cdot r},$$

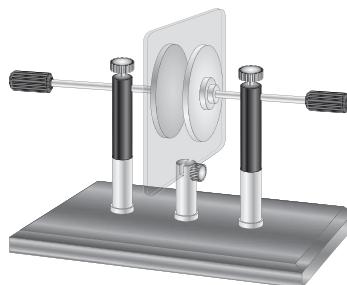
где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$ — электрическая постоянная, r — расстояние между зарядами Q и q , ϵ — диэлектрическая проницаемость вещества.

КОНДЕНСАТОР

Конденсатором является система двух проводников, разделённых слоем диэлектрика, а проводники, составляющие конденсатор, называются обкладками.

Способность конденсаторов заряжаться и разряжаться широко применяется в науке и технике: в электроизмерительных и радиолокационных приборах, телевизионных устройствах, радиоаппаратуре, автоматике, телеграфии, телефонии и других областях.

Способность конденсатора к накоплению заряда характеризуется его электрической ёмкостью.



Конденсатор

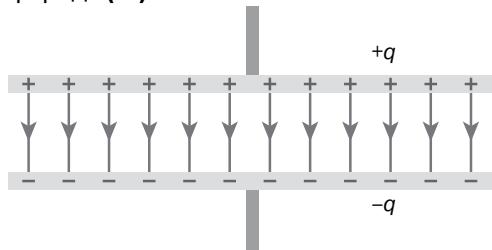
■ Электроёмкость конденсатора

Электрическая ёмкость (электроёмкость) уединённого проводника C — физическая величина, равная отно-

шению заряда Q проводника к потенциалу ϕ этого проводника:

$$C = \frac{Q}{\phi}.$$

Единицей электротомкости является фарад (Φ).



Идеализированное представление поля плоского конденсатора: $+q$ и $-q$ — заряды на обкладках конденсатора

Электрическая ёмкость конденсатора C — физическая величина, равная отношению заряда Q одного из проводников к разности потенциалов U между этим проводником и соседним:

$$C = \frac{Q}{U}.$$

Электротомкость плоского конденсатора:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S}{d},$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная, ϵ — диэлектрическая проницаемость диэлектрика, заполняющего конденсатор, S — площадь обкладок, d — расстояние между обкладками.

Электротомкость плоского воздушного конденсатора зависит от его геометрических характеристик: площади пластин и расстояния между

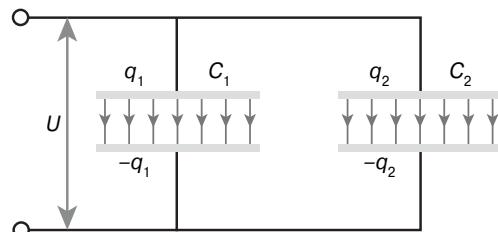
ними, а также от диэлектрика, заполняющего конденсатор.

Если из конденсатора удалить диэлектрик, то его ёмкость уменьшится. В технике в качестве диэлектрика часто используют металлы, полимеры, бумагу, воздух.

■ Соединения конденсаторов

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

Параллельное соединение конденсаторов



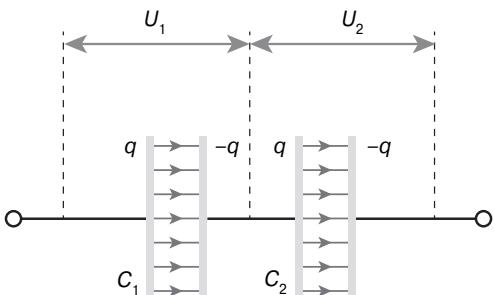
U_1 и U_2 — напряжение на обкладках, U — общее напряжение, q_1 и q_2 — модули зарядов на обкладках, q — общий заряд, C_1 и C_2 — ёмкости конденсаторов, C — общая ёмкость

При параллельном соединении конденсаторов:

$$\begin{aligned} U_1 &= U_2 = U, \\ q_1 &= C_1 \cdot U_1 \text{ и } q_2 = C_2 \cdot U_2, \\ q &= q_1 + q_2, \\ C &= C_1 + C_2. \end{aligned}$$

При параллельном соединении электротомкости складываются.

Последовательное соединение конденсаторов



U_1 и U_2 — напряжение на обкладках, U — общее напряжение, q_1 и q_2 — модули зарядов на обкладках, q — общий заряд, C_1 и C_2 — ёмкости конденсаторов, C — общая ёмкость

При последовательном соединении:

$$q_1 = q_2 = q, \quad U = U_1 + U_2,$$

$$U_1 = \frac{q_1}{C} \text{ и } U_2 = \frac{q_2}{C},$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}.$$

При последовательном соединении конденсаторов складываются обратные величины ёмкостей.

■ Энергия заряженного конденсатора

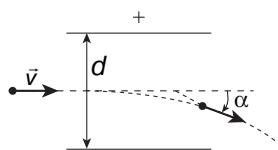
Энергия заряженного конденсатора W_e равна работе внешних сил,

которую необходимо затратить, чтобы зарядить конденсатор:

$$W_e = \frac{Q^2}{2C} = \frac{C \cdot U^2}{2} = \frac{Q \cdot U}{2},$$

где Q — заряд на обкладках конденсатора, C — его ёмкость, U — напряжение на обкладках.

Поскольку энергия пропорциональна квадрату напряжения или заряда, то при уменьшении (увеличении) напряжения или заряда, например, в 3 раза энергия уменьшается (увеличивается) в 9 раз.



Заряженная частица массой m , движущаяся со скоростью v , влетает в поле плоского конденсатора (см. рисунок). Расстояние между пластинами конденсатора равно d , а напряжённость электрического поля между пластинами равна E . Пролетев конденсатор, частица отклоняется от первоначального направления на угол α .

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



Практические задания

14

Как изменится ёмкость плоского воздушного конденсатора, если площадь обкладок уменьшить в 4 раза, а расстояние между ними увеличить в 2 раза?

Дано:

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{1}{4}$$

$$\frac{d_2}{d_1} = 2$$

$$\varepsilon = 1$$

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$$

$$\frac{C_2}{C_1} - ?$$

Решение:

Запишем выражение для ёмкости конденсатора

$$\text{в обоих случаях: } \begin{cases} C_1 = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S_1}{d_1} \\ C_2 = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S_2}{d_2} \end{cases}.$$

Разделив второе уравнение на первое, получим:

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{S_2}{S_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{8}.$$

Ответ: уменьшится в 8 раз.**15**

Пластины большого плоского конденсатора расположены горизонтально на расстоянии $d = 1$ см друг от друга. В пространстве между пластинами падает капля жидкости. Масса капли $4 \cdot 10^{-6}$ кг, её заряд $q = 8 \cdot 10^{-11}$ Кл. При каком напряжении на пластинах скорость капли будет постоянной? Влиянием воздуха на движение капли пренебречь.

Дано:

$$d = 10^{-2} \text{ м}$$

$$m = 4 \cdot 10^{-6} \text{ кг}$$

$$q = 8 \cdot 10^{-11} \text{ Кл}$$

$$v = \text{const}$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$$U - ?$$

Решение:

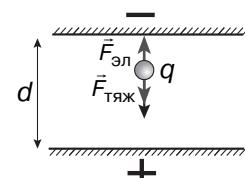
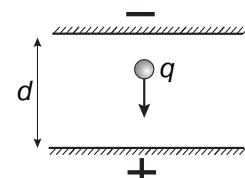
По первому закону Ньютона капля движется равномерно, если равнодействующая сила равна нулю (см. рисунок):

$$F_{\text{эл}} - m \cdot g = 0, \text{ откуда } F_{\text{эл}} = m \cdot g,$$

где $F_{\text{эл}} = q \cdot E$ — сила электростатического взаимодействия между пластинами и каплей, $E = \frac{U}{d}$ — напряженность поля между пластинами, $F_{\text{тяж}} = m \cdot g$ — сила тяжести.

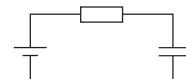
$$\text{Тогда } q \cdot E = m \cdot g, \text{ или } \frac{q \cdot U}{d} = m \cdot g, \text{ откуда } U = \frac{m \cdot g \cdot d}{q}.$$

$$U = \frac{4 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2 \cdot 10^{-2} \text{ м}}{8 \cdot 10^{-11} \text{ Кл}} = 5000 \text{ В.}$$

Ответ: $U = 5000$ В.

16

Источник постоянного напряжения с ЭДС 100 В подключён через резистор к конденсатору переменной ёмкости, расстояние между пластинами которого можно изменять (см. рисунок).



Пластины медленно раздвинули. Какая работа была совершена против сил притяжения пластин, если за время движения пластин на резисторе выделилось количество теплоты 10 мкДж и заряд конденсатора изменился на 1 мкКл?

Дано:

$$U = 100 \text{ В}$$

$$Q = 10 \text{ мкДж} = 10^{-5} \text{ Дж}$$

$$\Delta q = 1 \text{ мкКл} = 10^{-6} \text{ Кл}$$

 $A - ?$ **Решение:**

По закону сохранения энергии

$$W_H + A_{\text{бат}} + A = W_K + Q,$$

где W_H и W_K — показатели энергии электрического поля конденсатора соответственно в начале и в конце процесса, равные:

$$W_H = \frac{C_1 \cdot U^2}{2}, \quad W_K = \frac{C_2 \cdot U^2}{2};$$

$A_{\text{бат}}$ — работа источника тока, равная:

$$A_{\text{бат}} = U \cdot (q_2 - q_1) = U \cdot \Delta q.$$

Учитывая, что $q_1 = C_1 \cdot U$ и $q_2 = C_2 \cdot U$, получим:

$$A_{\text{бат}} = U \cdot (q_2 - q_1) = U \cdot (C_2 \cdot U - C_1 \cdot U) = \Delta C \cdot U^2,$$

где $\Delta C = \frac{\Delta q}{U}$ — изменение ёмкости конденсатора,

A — работа, совершённая против сил притяжения пластин, Q — количество теплоты, выделившееся на резисторе.

Из этих уравнений получим:

$$\frac{C_1 \cdot U^2}{2} + \Delta C \cdot U^2 + A = \frac{C_2 \cdot U^2}{2} + Q, \quad \text{или}$$

$$A = Q + \frac{1}{2} \cdot \Delta C \cdot U^2 = Q + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta q}{U} \cdot U^2 = Q + \frac{1}{2} \cdot \Delta q \cdot U.$$

Следовательно,

$$A = 10^{-5} \text{ Дж} + \frac{1}{2} \cdot 10^{-6} \text{ Кл} \cdot 100 \text{ В} = 6 \cdot 10^{-5} \text{ Дж} =$$

$$= 60 \text{ мкДж}.$$

Ответ: $A = 60 \text{ мкДж}.$



ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Непрерывное упорядоченное движение свободных носителей электрического заряда называется **электрическим током**.



СИЛА ТОКА

Сила тока в данный момент времени — скалярная физическая величина, равная пределу отношения величины электрического заряда Δq , прошедшего через поперечное сечение проводника, к промежутку времени Δt его прохождения:

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = q'(t) \text{ и } I = q_0 \cdot n \cdot S \cdot v \cdot \Delta t,$$

где n — концентрация заряженных частиц, S — площадь поперечного сечения проводника, v — скорость движения зарядов, q_0 — заряд одной частицы.

Сила тока — производная по времени от заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника за промежуток времени t .



Практические задания

17

По проводнику течёт постоянный электрический ток. Значение заряда, проходящего через поперечное сечение проводника, возрастает с течением времени согласно графику, представленному на рисунке. Чему равна сила тока в проводнике?

В СИ сила тока измеряется в амперах (**A**).

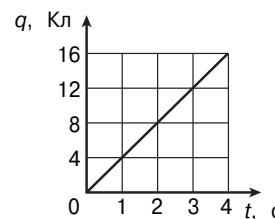
За направление тока принимают направление упорядоченного движения положительно заряженных частиц. Направление тока совпадает с направлением напряжённости электрического поля, вызывающего этот ток.

■ Постоянный ток

Постоянный электрический ток — ток, сила и направление которого не изменяются с течением времени:

$$I = \text{const.}$$

Постоянный ток широко используется в электрических схемах автомобилей, микроэлектронике и т. д.



Дано:

$$q = 16 \text{ Кл}$$

$$t = 4 \text{ с}$$

$$I = ?$$

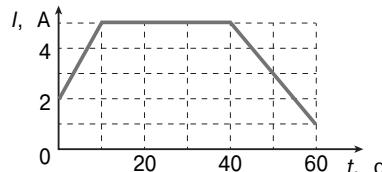
Решение:

Из графика возьмём соответствующие значения заряда и времени. По формуле силы тока

$$I = \frac{q}{t}; \quad I = \frac{16 \text{ Кл}}{4 \text{ с}} = 4 \text{ А.}$$

Ответ: $I = 4 \text{ А.}$

- 18** На графике показана зависимость силы тока в проводнике от времени. Определите заряд, прошедший через проводник за $\Delta t = 60 \text{ с}$ с момента начала отсчёта времени.

**Решение:**

Заряд, прошедший через проводник за $t = 8 \text{ с}$, численно равен площади фигуры под графиком силы тока.

Определим заряд на каждом отдельном промежутке.

На промежутке 0—10 с найдём площадь трапеции:

$$S_{0-10} = \Delta q = \frac{2\text{А} + 5\text{А}}{2} \cdot 10\text{с} = 35 \text{ Кл.}$$

На промежутке 10—40 с найдём площадь прямоугольника:

$$S_{10-40} = \Delta q = 5\text{А} \cdot 30\text{с} = 150 \text{ Кл.}$$

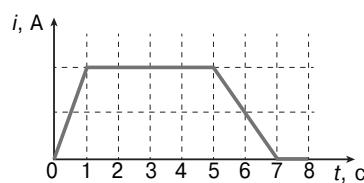
На промежутке 40—60 с найдём площадь трапеции:

$$S_{40-60} = \Delta q = \frac{1\text{А} + 5\text{А}}{2} \cdot 20\text{с} = 60 \text{ Кл.}$$

Суммарный заряд: $Q = 35 \text{ Кл} + 150 \text{ Кл} + 60 \text{ Кл} = 245 \text{ Кл.}$

Ответ: $Q = 245 \text{ Кл.}$

- 19** Сила тока в лампочке менялась с течением времени так, как показано на графике. В каких промежутках времени напряжение на контактах лампы не менялось? Считать сопротивление лампочки неизменным.



Ответ: напряжение на контактах лампы не менялось на промежутках времени 1—5 с и 7—8 с.

УСЛОВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Для существования электрического тока **необходимы свободные заряды** — носители заряда (например, заряженные частицы: положительные и отрицательные ионы, электроны).

Направленное движение свободных зарядов в проводнике возможно под действием внешнего электрического поля, которое генерирует и подводит к проводнику источник тока (см. раздел «Источники тока», с. 203).

■ Напряжение и ЭДС

Напряжение (разность потенциалов между концами однородного проводника) U — это отношение работы тока A на определённом участке электрической цепи к заряду q , протекающему по этому же участку цепи:

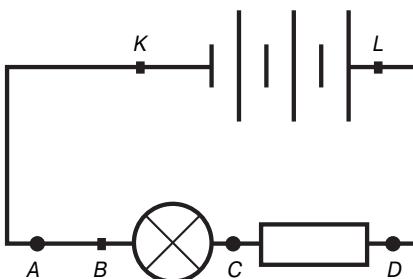
$$U = \frac{A}{q}$$

Единица измерения напряжения — вольт (**В**).

Напряжение измеряется вольтметром, который подключается в цепь параллельно.

Постоянное напряжение, равное разности нормальных потенциалов между электродами (катодом — отрицательным и анодом — положительным) в источнике тока, называется **электродвижущей силой** (ЭДС) ε .

✓ К каким точкам (см. рисунок) следует подключить вольтметр для измерения напряжения на лампе?

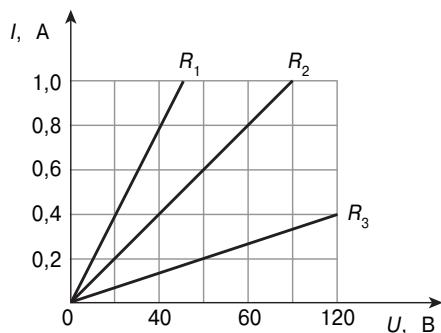


Ответ: вольтметр следует подключить к точкам **B** и **C**.

ЗАКОН ОМА ДЛЯ УЧАСТКА ЦЕПИ

Сила тока в однородном проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению проводника: $I = \frac{U}{R}$,

где I — сила тока, U — напряжение, $\frac{1}{R}$ — коэффициент пропорциональности (R — сопротивление проводника, см. раздел «Электрическое сопротивление», с. 200).



Зависимость силы тока в проводнике от приложенного к нему напряжения (вольт-амперная характеристика проводника):

I — сила тока;

U — напряжение;

R_1, R_2, R_3 — сопротивления трёх разных проводников: $R_1 < R_2 < R_3$

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Электрическое сопротивление R — скалярная физическая величина, характеризующая свойства проводника и равная отношению напряжения U на концах проводника к силе электрического тока I :

$$R = \frac{U}{I}.$$

Единицей измерения сопротивления является ом (**Ом**).

Сопротивление проводника зависит от материала, из которого изготовлен проводник, его длины и сечения:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S},$$

где ρ — удельное сопротивление вещества проводника, l — длина проводника, S — площадь сечения.



Следует помнить, что электрическое сопротивление зависит только от параметров самого проводника и не зависит от других параметров электрической цепи, хотя сопротивление можно вычислить, измерив силу тока и напряжение.

■ Удельное сопротивление вещества

Удельное сопротивление вещества — 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.

В СИ единица удельного сопротивления — ом на метр (**Ом · м**).

■ Зависимость сопротивления однородного проводника от его длины и сечения

У разных веществ удельные сопротивления различны. Некоторые из них приведены в таблице.

Таблица удельных сопротивлений проводников

Металл	ρ , $\Omega \cdot \text{мм}^2/\text{м}$
Серебро	0,015...0,0162
Медь	0,017 24...0,018
Золото	0,023
Алюминий	0,0262...0,0295
Вольфрам	0,053...0,055
Железо	0,098

Вольфрам благодаря тугоплавкости и хорошей проводимости нагревается до степени свечения, поэтому он используется в лампах как нить нагала. А никром и хромаль, обладая

большим сопротивлением, способны быстро нагреваться, поэтому используются в качестве нагревательных элементов в печах.

Качественное деление всех веществ по степени подвижности заряженных частиц на проводники, полупроводники и диэлектрики определяется значением удельного сопротивления вещества:

- $\rho < 10^{-5} \Omega \cdot \text{м}$ — у проводников;
- $10^{-5} \Omega \cdot \text{м} < \rho < 10^5 \Omega \cdot \text{м}$ — у полупроводников;
- $\rho > 10^5 \Omega \cdot \text{м}$ — у диэлектриков.

Проводник с определённым постоянным сопротивлением называют **резистором** (от лат. *resisto* — сопротивляюсь).



Практические задания

- 20 На рисунке изображён график зависимости силы тока от напряжения на одной из секций телевизора. Чему равно сопротивление этой секции?

Дано:

$$\begin{aligned} I &= 20 \text{ mA} = 0,02 \text{ A} \\ U &= 5 \text{ кВ} = 5000 \text{ В} \end{aligned}$$

$$R - ?$$

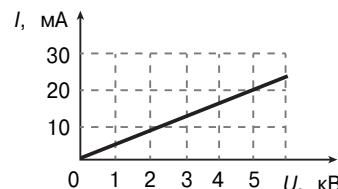
Решение:

Из графика возьмём соответствующие значения силы тока и напряжения. По закону Ома

$$I = \frac{U}{R}, \text{ откуда } R = \frac{U}{I}.$$

$$R = \frac{5000 \text{ В}}{0,02 \text{ А}} = 250\,000 \text{ Ом} = 250 \text{ кОм.}$$

Ответ: $R = 250 \text{ кОм.}$



- 21 Медная проволока имеет электрическое сопротивление 6 Ом. Какое электрическое сопротивление имеет медная проволока, у которой в 2 раза больше длина и в 3 раза больше площадь поперечного сечения?

Дано:

$$R_1 = 6 \text{ Ом}$$

$$\frac{I_2}{I_1} = 2$$

$$\frac{S_2}{S_1} = 3$$

$$R_2 - ?$$

Решение:

Сопротивления проводника для каждого случая:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1 = \rho \cdot \frac{I_1}{S_1} \\ R_2 = \rho \cdot \frac{I_2}{S_2} \end{array} \right.$$

Разделив второе уравнение на первое, получим:

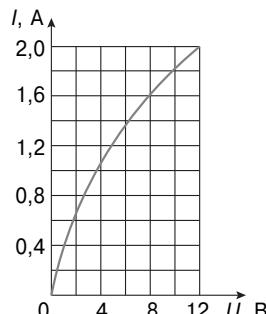
$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{I_2}{I_1} \cdot \frac{S_1}{S_2} = 2 \cdot \frac{1}{3} = \frac{2}{3}$$

Тогда сопротивление во втором случае:

$$R_2 = \frac{2}{3} \cdot R_1 = \frac{2}{3} \cdot 6 \text{ Ом} = 4 \text{ Ом.}$$

Ответ: $R_2 = 4 \text{ Ом.}$ **22**

Вольт-амперная характеристика лампы накаливания изображена на рисунке. При напряжении источника 12 В температура нити лампы равна 3100 К. Сопротивление нити прямо пропорционально её температуре. Какова температура нити накала при напряжении источника 6 В?

**Дано:**

$$U_1 = 12 \text{ В}$$

$$I_1 = 2 \text{ А}$$

$$T_1 = 3100 \text{ К}$$

$$U_2 = 6 \text{ В}$$

$$I_2 = 1,4 \text{ А}$$

$$T_2 - ?$$

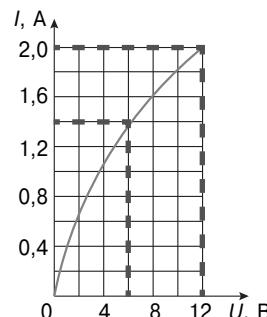
Решение:

Определим сопротивление лампы для обоих случаев из закона Ома: $I = \frac{U}{R}$;

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1 = \frac{U_1}{I_1}, R_1 = \frac{12 \text{ В}}{2 \text{ А}} = 6 \text{ Ом} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R_2 = \frac{U_2}{I_2}, R_2 = \frac{6 \text{ В}}{1,4 \text{ А}} = 4,3 \text{ Ом} \end{array} \right.$$

Поскольку сопротивление лампы накаливания прямо пропорционально её температуре, составим зависимость температуры лампы накаливания от сопротивления: $T = k \cdot R$.



Применив эту зависимость для двух случаев, получим:
откуда $\frac{T_2}{T_1} = \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow T_2 = \frac{R_2}{R_1} \cdot T_1$.

$$\begin{cases} T_1 = k \cdot R_1 \\ T_2 = k \cdot R_2 \end{cases}$$

$$T_2 = \frac{4,3 \text{ Ом}}{6 \text{ Ом}} \cdot 3100 \text{ К} = 2222 \text{ К.}$$

Ответ: $T_2 = 2222 \text{ К.}$

ИСТОЧНИКИ ТОКА

Источник тока — устройство, разделяющее положительные и отрицательные заряды.

Сторонние силы — силы неэлектрического происхождения, вызывающие разделение зарядов в источнике тока.

Резистор (лампа, реостат или другой прибор) вместе с подводящими проводами образует **внешнюю цепь**, при подключении которой к источнику тока электрическое поле распространяется со скоростью света вдоль проводников, и свободные заряды в них почти одновременно приходят в упорядоченное движение — в цепи появляется ток. При этом скорость направленного движения зарядов оказывается значительно меньше скорости света.

Полное сопротивление проводников, подключённых к источнику тока, называют **сопротивлением внешней цепи** или **внешним сопротивлением** R .

■ ЭДС и внутреннее сопротивление источника тока

ЭДС (электродвижущая сила) ε — скалярная физическая величина, равная отношению работы сторонних сил A_{ct} по перемещению положительного заряда от отрицательного полюса источника к положительному к величине этого заряда q :

$$\varepsilon = \frac{A_{ct}}{q}.$$

Следствие: разность потенциалов U между полюсами источника тока (напряжение), приложенная к подключённому к полюсам проводнику, меньше ЭДС:

$$U = \varepsilon - \frac{A_c}{q},$$

где ε — ЭДС, A_c — работа сил сопротивления, q — заряд.

Источник тока также обладает сопротивлением r , которое называют **внутренним сопротивлением**

цепи. Оно, как правило, достаточно мало по сравнению с сопротивлением внешней цепи. Внутреннее сопротивление определяет количество потерь энергии при прохождении тока через источник тока.

Внешнее R и внутреннее r сопротивления цепи соединены последовательно, поэтому **полное сопротивление цепи** равно их сумме:

$$R_{\text{полное}} = R + r.$$

ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОЛНОЙ (ЗАМКНУТОЙ) ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Сила тока I в замкнутой цепи прямо пропорциональна ЭДС источника и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи:

$$I = \frac{\epsilon}{R+r},$$

где ϵ — ЭДС источника тока, R — внешнее сопротивление, r — внутреннее сопротивление источника тока.

При коротком замыкании, когда

$R \rightarrow 0$, сила тока возрастает в $\frac{R}{r}$ раз: $I_K = \frac{\epsilon}{r}$.

Короткое замыкание — соединение концов участка цепи проводником, сопротивление которого очень мало по сравнению с сопротивлением участка цепи. Мгновенное возрастание силы тока приводит к сильному нагреву, расплавлению металлов, а иногда и к пожарам.



Практические задания

- 23 Резистор подключён к источнику тока с ЭДС 10 В и внутренним сопротивлением 1 Ом. Сила тока в электрической цепи равна 2 А. Каково сопротивление резистора?

Дано:

$$\epsilon = 10 \text{ В}$$

$$r = 1 \text{ м}$$

$$I = 2 \text{ А}$$

$$\underline{\hspace{1cm}}$$

$$R - ?$$

Решение:

По закону Ома для полной цепи

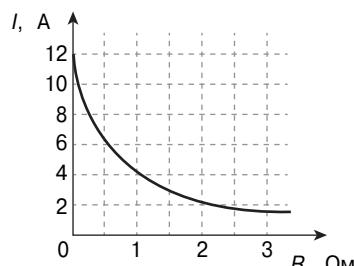
$$I = \frac{\epsilon}{R+r}, \text{ откуда: } R = \frac{\epsilon}{I} - r.$$

$$R = \frac{10 \text{ В}}{2 \text{ А}} - 1 \text{ Ом} = 4 \text{ Ом.}$$

Ответ: $R = 4 \text{ Ом.}$

24

К источнику тока с внутренним сопротивлением 0,5 Ом подключили реостат. На рисунке показан график зависимости силы тока в реостате от его сопротивления. Чему равна ЭДС источника тока?

Дано:

$$I_k = 12 \text{ А}$$

$$R = 1 \text{ Ом}$$

$$I = 4 \text{ А}$$

ε — ?Решение:

На графике при внешнем сопротивлении $R_k = 0$ найдём ток короткого замыкания $I_k = 12 \text{ А}$. В «Дано» также возьмём ещё одну пару точек.

По закону Ома для полной цепи составим уравнения для двух пар точек:

$$\begin{cases} I_k = \frac{\varepsilon}{r} \\ I = \frac{\varepsilon}{R+r} \end{cases}$$

Если из каждого уравнения выразим r (лишняя переменная) и приравняем их, то:

$$r = \frac{\varepsilon}{I_k} = \frac{\varepsilon}{I} - R, \text{ откуда } \varepsilon \cdot \left(\frac{1}{I} - \frac{1}{I_k} \right) = R \text{ или } \varepsilon = R \cdot \frac{I \cdot I_k}{I_k - I}.$$

$$\varepsilon = 1 \text{ Ом} \cdot \frac{4 \text{ А} \cdot 12 \text{ А}}{12 \text{ А} - 4 \text{ А}} = 6 \text{ В.}$$

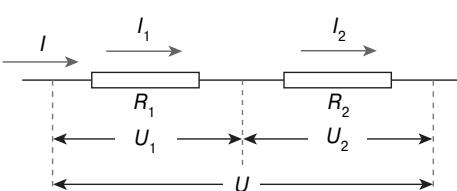
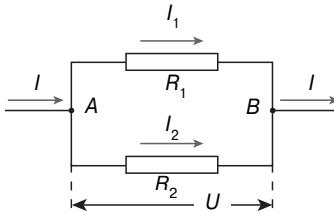
Ответ: $\varepsilon = 6 \text{ В.}$

СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ

Проводники в электрических цепях могут соединяться последовательно и параллельно.

Последовательное соединение	Параллельное соединение
Соединение проводников без разветвлений, когда конец одного проводника соединён с началом другого	Соединение, в котором начала и концы проводников соединены вместе

>>>

Последовательное соединение	Параллельное соединение
<p>R_1 и R_2 — сопротивления проводников, R — общее сопротивление, I_1 и I_2 — сила тока на каждом проводнике, I — общая сила тока, U_1 и U_2 — напряжение на каждом проводнике, U — общее напряжение цепи</p> 	
<p>Схема последовательного соединения проводников</p> $I_1 = I_2 = I$ <p>Сила тока, протекающего через каждое из сопротивлений, одна и та же ($I = \text{const}$)</p>	<p>Схема параллельного соединения проводников</p> $I = I_1 + I_2$ <p>Сила тока, протекающего в неразветвленной части цепи, равна сумме сил токов, протекающих по каждому из проводников</p>
$U_1 = I \cdot R_1, \quad U_2 = I \cdot R_2$ $U = U_1 + U_2$ <p>Общее напряжение равно сумме напряжений на отдельных участках цепи</p>	$U_1 = I_1 \cdot R_1, \quad U_2 = I_2 \cdot R_2$ $U = U_1 = U_2$ <p>Напряжение на каждом из проводников одинаково: $U = \text{const}$</p>
$R = R_1 + R_2$ <p>Общее сопротивление цепи равно сумме сопротивлений отдельных участков</p>	$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ <p>Проводимость равна сумме проводимостей каждого из проводников</p>
$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$ <p>Если все сопротивления одинаковы, то $R = nr$ и $U = nu$, где r и u — соответственно сопротивление одного элемента и напряжение на нём</p>	$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$ <p>Если все сопротивления одинаковы, то $R = r/n$ и $U = u$, где r и u — сопротивление одного элемента и напряжение на нём</p>

>>>

>>>

Последовательное соединение	Параллельное соединение
Общее сопротивление цепи больше самого большого сопротивления, входящего в эту цепь	Общее сопротивление цепи меньше самого меньшего сопротивления, входящего в эту цепь
Добавочное сопротивление — проводник, присоединяемый последовательно с вольтметром для увеличения предела его измерений. $R_d = R_V \cdot (n - 1)$, где R_d — добавочное сопротивление, R_V — сопротивление вольтметра, n — число, показывающее, во сколько раз увеличивается предел измерений прибора	Шунт — проводник, присоединяемый параллельно амперметру для увеличения предела его измерений. $R_w = \frac{R_A}{n - 1}$, где R_w — сопротивление шунта, R_A — сопротивление амперметра, n — число, показывающее, во сколько раз увеличивается предел измерений прибора



Электрический ток идёт по пути наименьшего сопротивления.



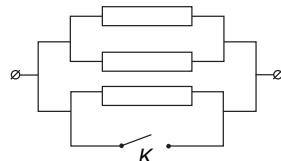
Задачи на последовательное и параллельное соединение проводников удобно решать, используя эквивалентные схемы.



Практические задания

25

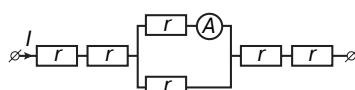
Каким будет сопротивление участка цепи (см. рисунок), если ключ K замкнуть? Каждый из резисторов имеет сопротивление R .



Ответ: если ключ K замкнуть, то сопротивление на ключе из 4 участков параллельного соединения будет минимальным, поэтому на другие 3 участка ток не пойдёт, то есть общее сопротивление станет равным нулю.

26

Через участок электрической цепи (см. рисунок) течёт постоянный ток $I = 6\text{ А}$. Что показывает амперметр, если сопротивление $r = 1\text{ Ом}$? Сопротивлением амперметра пренебречь.



Решение:

При параллельном соединении токи в ветвях обратно пропорциональны сопротивлениям. Поскольку сопротивления одинаковые, то и токи в ветвях равны: $I_1 = I_2 = \frac{6\text{ A}}{2} = 3\text{ A}$.

Ответ: показание амперметра — 3 А.

РАБОТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

При перемещении заряда по проводнику электрическое поле **совершает работу**:

$$A = q \cdot U = I \cdot U \cdot t = \frac{U^2}{R} \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t,$$

где q — заряд, протекающий через поперечное сечение проводника за промежуток времени t , U — напряжение на проводнике (разность потенциалов), I — сила тока в проводнике, R — сопротивление проводника.

■ Закон Джоуля — Ленца

Электрический ток оказывает **тепловое действие** на проводник.

Закон Джоуля — Ленца отражает преобразование энергии электрического тока в проводнике в тепловую энергию вследствие взаимодействия заряженных частиц с ионами кристаллической решётки проводника.

Закон Джоуля — Ленца. Количество теплоты Q , выделяемое в проводнике с током, равно произведению квадрата силы тока I , сопротивления проводника R и времени t прохождения по нему тока:

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

Количество теплоты Q , выделяемое в схеме с несколькими проводниками, зависит от вида соединения.

При **последовательном** соединении проводников количество теплоты, выделяемое на каждом, пропорционально их сопротивлениям:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{R_1}{R_2},$$

где R_1 и R_2 — сопротивления проводников, R — их общее сопротивление, Q_1 и Q_2 — количество теплоты, выделяемое на каждом проводнике

При **параллельном** соединении проводников количество теплоты, выделяемое на каждом, обратно пропорционально их сопротивлениям:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{R_2}{R_1},$$



Практические задания

27 При прохождении по проводнику электрического тока силой 5 А в течение 2 мин совершается работа 150 кДж. Чему равно сопротивление проводника?

Дано:

$$I = 5 \text{ А}$$

$$t = 2 \text{ мин} = 120 \text{ с}$$

$$A = 150 \text{ кДж} = 150000 \text{ Дж}$$

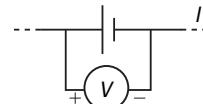
$$R - ?$$

Решение:

Из формулы работы электрического тока $A = I^2 \cdot R \cdot t$ выразим сопротивление проводника: $R = \frac{A}{I^2 \cdot t}$, $R = \frac{150000 \text{ Дж}}{(5 \text{ А})^2 \cdot 120 \text{ с}} = 50 \text{ Ом}$.

Ответ: $R = 50 \text{ Ом}$.

28 Вольтметр подключён к клеммам источника тока с ЭДС $\varepsilon = 3 \text{ В}$ и внутренним сопротивлением $r = 1 \text{ Ом}$, через который течёт ток $I = 2 \text{ А}$ (см. рисунок). Вольтметр показывает 5 В. Какое количество теплоты выделяется внутри источника за 1 с?



Дано:

$$\varepsilon = 3 \text{ В}$$

$$r = 1 \text{ Ом}$$

$$I = 2 \text{ А}$$

$$U = 5 \text{ В}$$

$$t = 1 \text{ с}$$

$$Q - ?$$

Решение:

Внутри источника по закону Джоуля — Ленца

$$Q = I^2 \cdot r \cdot t.$$

$$Q = 2 \text{ А}^2 \cdot 1 \text{ Ом} \cdot 1 \text{ с} = 4 \text{ Дж}.$$

Ответ: $Q = 4 \text{ Дж}$.

29 При лечении электростатическим душем к электродам электрической машины прикладывается разность потенциалов 10 кВ. Какой заряд проходит между электродами за время процедуры, если известно, что электрическое поле совершает при этом работу, равную 3,6 кДж?

<p>Дано:</p> <p>$U = 10\ 000 \text{ В}$</p> <hr/> <p>$A = 3600 \text{ Дж}$</p> <hr/> <p>$q - ?$</p>	<p>Решение:</p> <p>По формуле работы тока $A = I \cdot U \cdot t$, причём $q = I \cdot t$. Тогда $A = q \cdot U$, откуда $q = \frac{A}{U}$.</p> $q = \frac{3600 \text{ Дж}}{10\ 000 \text{ В}} = 0,36 \text{ Кл.}$ <p>Ответ: $q = 0,36 \text{ Кл.}$</p>
---	--

МОЩНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Мощность электрического тока — работа, совершаемая в единицу времени электрическим полем при упорядоченном движении заряженных частиц в проводнике. Средняя мощность тока P равна:

$$P = \frac{A}{t} = \frac{q \cdot U}{t} = I \cdot U = \frac{U^2}{R} = I^2 \cdot R,$$

где A — работа электрического тока, q — заряд, протекающий через поперечное сечение проводника за промежуток времени t , U — напряжение на проводнике (разность потенциалов), I — сила тока в проводнике, R — сопротивление проводника.

При **последовательном** соединении проводников мощность, выделяемая в проводниках, пропорциональна их сопротивлению:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{R_1}{R_2},$$

При **параллельном** соединении проводников мощность, выделяемая в проводниках, обратно пропорциональна их сопротивлению:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{R_2}{R_1},$$

где R_1 и R_2 — сопротивления проводников, R — их общее сопротивление, P_1 и P_2 — мощность, выделяемая в проводниках

■ Термовая мощность, выделяемая на резисторе. Мощность источника тока

Запишем закон Ома для полной цепи в виде $\varepsilon = I \cdot (R + r) = I \cdot R + I \cdot r$, умножим уравнение на силу тока I и получим выражение, в котором

каждое слагаемое имеет физический смысл:

$$\varepsilon \cdot I = I^2 \cdot R + I^2 \cdot r,$$

где ε — ЭДС источника тока, I — сила тока, R — внешнее сопротивление источника тока, r — внутреннее сопротивление источника тока.

Полная мощность цепи (мощность источника тока):

$$P_{\text{ист}} = \varepsilon \cdot I.$$

Тепловая мощность, выделяемая на резисторе (полезная мощность):

$$P_{\text{пол}} = I^2 \cdot R.$$

Мощность, теряемая при передаче энергии (мощность потерь):

$$P_{\text{пот}} = I^2 \cdot r.$$



Практические задания

- 30** На штепсельных вилках некоторых бытовых электрических приборов имеется надпись: «6 А, 250 В». Определите максимальную допустимую мощность электроприборов, которые можно включать, используя такие вилки.

Дано:

$$I = 6 \text{ А}$$

$$U = 250 \text{ В}$$

$$\underline{P - ?}$$

Решение:

По формуле мощности $P = I \cdot U$.

$$P = 6 \text{ А} \cdot 250 \text{ В} = 1500 \text{ Вт.}$$

Ответ: $P = 1500 \text{ Вт.}$

- 31** Два резистора, имеющие сопротивления $R_1 = 3 \text{ Ом}$ и $R_2 = 6 \text{ Ом}$, включены параллельно в цепь постоянного тока. Чему равно отношение мощностей $\frac{P_1}{P_2}$ электрического тока, выделившихся в этих резисторах?

Дано:

$$R_1 = 3 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 6 \text{ Ом}$$

$$\underline{\frac{P_1}{P_2} - ?}$$

Решение:

Учитывая, что при параллельном соединении напряжение одинаково, запишем формулу мощности для обоих резисторов через напряжение:

$$\begin{cases} P_1 = \frac{U^2}{R_1} \\ P_2 = \frac{U^2}{R_2} \end{cases}. \text{ Разделив первое уравнение на второе,}$$

$$\text{получим: } \frac{P_1}{P_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{6 \text{ Ом}}{3 \text{ Ом}} = 2.$$

Ответ: $\frac{P_1}{P_2} = 2$.

32

Электрическая цепь состоит из источника тока и реостата. ЭДС источника $\varepsilon = 6 \text{ В}$, его внутреннее сопротивление $r = 2 \text{ Ом}$. Сопротивление реостата можно изменять в пределах от 1 Ом до 5 Ом. Чему равна максимальная мощность тока, выделяемая на реостате?

Дано:

$$\varepsilon = 6 \text{ В}$$

$$r = 2 \text{ Ом}$$

$$1 \text{ Ом} \leq R \leq 5 \text{ Ом}$$

$$P_{\max} - ?$$

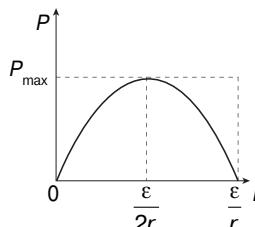
Решение:

Из закона Ома для полной цепи $I = \frac{\varepsilon}{R+r}$ выразим ЭДС: $\varepsilon = I \cdot R + I \cdot r$.

Умножив обе части уравнения на силу тока, получим полную мощность цепи: $\varepsilon \cdot I = I^2 \cdot R + I^2 \cdot r$, откуда выразим мощность, выделяемую на реостате:

$$P = I^2 \cdot R = \varepsilon \cdot I - I^2 \cdot r.$$

Таким образом, имеем квадратичную зависимость мощности на реостате от силы тока в цепи, которой соответствует график функции (см. рисунок).



Максимальное значение мощности на реостате соответствует вершине параболы.

Если $P = \varepsilon \cdot I - I^2 \cdot r = (\varepsilon - I \cdot r) \cdot I = 0$ при $I_1 = 0$ и $\varepsilon - I \cdot r = 0$,

$$I_2 = \frac{\varepsilon}{r} = \frac{6 \text{ В}}{2 \text{ Ом}} = 3 \text{ А},$$

то вершина параболы соответствует току

$I' = \frac{\varepsilon}{2r} = \frac{6 \text{ В}}{2 \cdot 2 \text{ Ом}} = 1,5 \text{ А}$, при этом сопротивление рео-

$$\text{стата: } R' = \frac{\varepsilon - I' \cdot r}{I'} = \frac{\varepsilon}{I'} - r.$$

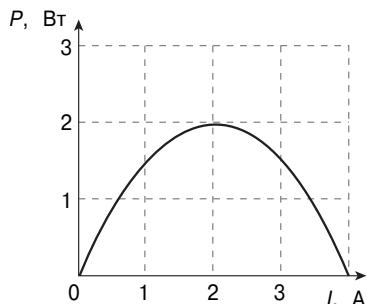
$$R' = \frac{6 \text{ В}}{1,5 \text{ А}} - 2 \text{ Ом} = 2 \text{ Ом}.$$

Максимальная мощность тока, выделяемая на реостате: $P = (1,5 \text{ А})^2 \cdot 2 \text{ Ом} = 4,5 \text{ Вт}$.

Ответ: $P_{\max} = 4,5 \text{ Вт}$.

33

Электрическая цепь состоит из батареи с ЭДС ε и внутренним сопротивлением $r=0,5 \text{ Ом}$ и подключённого к ней резистора нагрузки с сопротивлением R . При изменении сопротивления нагрузки изменяются сила тока в цепи и мощность в нагрузке. На рисунке представлен график изменения мощности, выделяющейся на нагрузке, в зависимости от силы тока в цепи.



Используя известные физические законы, объясните, почему данный график зависимости мощности от силы тока является параболой. Чему равна ЭДС батареи?

Решение:

Тепловая мощность, выделяющаяся на резисторе, имеющем сопротивление R , определяется законом Джоуля — Ленца: $P = I \cdot U$, где I — сила тока в цепи, U — напряжение на резисторе.

Сила тока определяется законом Ома для полной цепи:

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r}, \text{ или } \varepsilon = I \cdot (R+r) = I \cdot R + I \cdot r.$$

Напряжение на резисторе — законом Ома для участка цепи: $U = I \cdot R$.

На графике мощность в нагрузке зависит от силы тока I , поэтому сопротивление резистора непостоянно, и мы должны напряжение на резисторе выразить через силу тока и постоянные величины ε и r : $U(I) = I \cdot R = \varepsilon - I \cdot r$.

Мощность в нагрузке:

$$P(I) = I \cdot U(I) = I \cdot (\varepsilon - I \cdot r) = -I^2 \cdot r + I \cdot \varepsilon \quad \text{— квадратичная функция силы тока.}$$

График этой функции — парабола, проходящая через точки

$$I_1 = 0 \quad \text{и} \quad I_2 = I_{\max} = \frac{\varepsilon}{r} = 4 \text{ А.}$$

Следовательно, $\varepsilon = I_{\max} \cdot r = 4 \text{ А} \cdot 0,5 \text{ Ом} = 2 \text{ В.}$

Ответ: $\varepsilon = 2 \text{ В.}$

СВОБОДНЫЕ НОСИТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ В ПРОВОДНИКАХ

Электрический ток может протекать в пяти различных средах: металлах, вакууме и газах, полупроводниках, жидкостях.

■ Механизмы проводимости

Носители электрического заряда в различных средах	Механизмы проводимости и некоторые свойства электрического заряда в среде
В металлах — электроны	<p>Процесс образования носителей заряда — обобществление валентных электронов.</p> <p>Не происходит переноса вещества.</p> <p>Выполняется закон Ома.</p> <p>Техническое применение: обмотки двигателей, трансформаторов, генераторов, проводка внутри зданий, сети электропередачи, силовые кабели</p>
В жидкостях (водные растворы неорганических кислот, солей и щелочей, расплавы) — положительно и отрицательно заряженные ионы	<p>Процесс образования носителей заряда — электролитическая диссоциация.</p> <p>Сопровождается переносом вещества.</p> <p>Выполняется закон Ома.</p> <p>Сопротивление электролитов падает с ростом температуры.</p> <p>Техническое применение: получение цветных металлов; гальваностегия, гальванопластика</p>
В полупроводниках — электроны и дырки	<p>Процесс образования носителей заряда — нагревание, освещение или внедрение примесей.</p> <p>Не происходит переноса вещества.</p> <p>Закон Ома не выполняется.</p> <p>С понижением температуры сопротивление возрастает, и вблизи абсолютного нуля они практически становятся изоляторами.</p> <p>Техническое применение — электроника</p>

>>>

Носители электрического заряда в различных средах	Механизмы проводимости и некоторые свойства электрического заряда в среде
В вакууме и газах — электроны, положительно и отрицательно заряженные ионы	<p>Процесс образования носителей заряда — ионизация газа, установка электронной пушки в вакууме.</p> <p>Происходит перенос вещества.</p> <p>Закон Ома не выполняется.</p> <p>Техническое применение: в газосветных трубках, лампах дневного света, стабилизаторах напряжения, магнитогидродинамических генераторах</p>

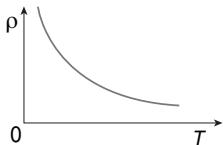
- В каких средах при прохождении электрического тока не происходит переноса вещества?

Ответ: при прохождении электрического тока в металлах и полупроводниках не происходит переноса вещества.

ПОЛУПРОВОДНИКИ

Полупроводники — твёрдые вещества, проводимость которых зависит от внешних условий (в основном от нагревания и освещения), представляют собой нечто среднее между проводниками и изоляторами.

У полупроводников с понижением температуры сопротивление возрастает, и вблизи абсолютного нуля они практически становятся изоляторами.



Зависимость удельного сопротивления ρ чистого полупроводника от абсолютной температуры T

■ Виды проводимости полупроводников

Атомы полупроводников на внешней оболочке имеют слабосвязанные электроны — **валентные электроны**.

Необходимым условием резкого уменьшения удельного сопротивления полупроводника при введении примесей является отличие валентности атомов примеси от валентности основных атомов кристалла.

Проводимость полупроводников при наличии примесей называется **примесной проводимостью**. Различа-

ют два типа примесной проводимости — электронную и дырочную.

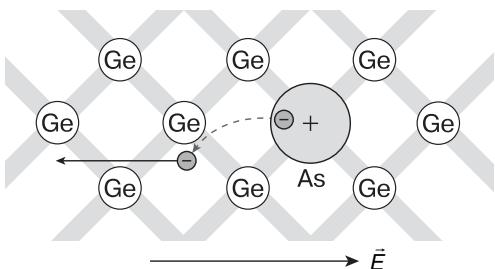
Электронная проводимость

Возникает, когда в кристалл с меньшей валентностью введены атомы с большей валентностью.

Примесь из атомов с валентностью, превышающей валентность основных атомов полупроводникового кристалла, называется донорной примесью.

Примесный полупроводник с электронной проводимостью называется полупроводником *n*-типа.

Основные носители заряда — электроны.



Полупроводник *n*-типа (атом мышьяка As в решётке германия Ge):

E — напряжённость электрического поля

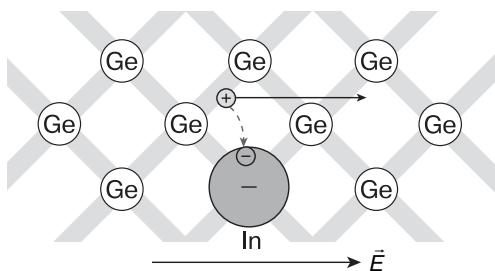
Дырочная проводимость

Возникает, когда в кристалл с большей валентностью введены атомы с меньшей валентностью.

Примесь из атомов с валентностью ниже валентности основных атомов полупроводникового кристалла (способных захватывать электроны) называется акцепторной примесью.

Примесный полупроводник с дырочной проводимостью называется полупроводником *p*-типа.

Основными носителями заряда являются дырки.



Полупроводник *p*-типа (атом индия In в решётке германия Ge):

E — напряжённость электрического поля

■ Полупроводниковый диод

Способность *n*-*p*-перехода пропускать ток практически только в одном направлении используется в приборах, которые называются **полупроводниковыми диодами**.

В любом полупроводниковом приборе (в том числе и диоде) имеется один или несколько электронно-дырочных переходов.

Преимущества полупроводниковых диодов по сравнению с вакуумными: малые размеры, длительный срок службы, механическая прочность.

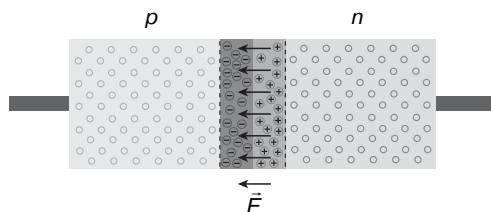
Недостаток полупроводниковых диодов: зависимость их параметров от температуры.

■ Электронно-дырочный переход

Электронно-дырочный переход (или *p-n*-переход) — это область контакта двух полупроводников с разными типами проводимости.

При контакте двух полупроводников *p*- и *n*-типов начинается **процесс диффузии**: дырки из *p*-области переходят в *n*-область, а электроны, наоборот, из *n*-области в *p*-область.

Пограничная область раздела полупроводников с разными типами проводимости (так называемый *запирающий слой*) обычно достигает толщины порядка десятков и сотен межатомных расстояний.

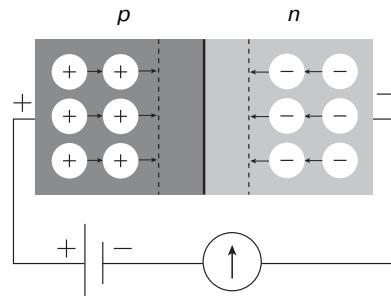


Образование запирающего слоя при контакте полупроводников *p*- и *n*-типов

Способность полупроводников пропускать ток только в одном направлении даёт возможность использовать их в качестве выпрямителей тока. Но ещё большее применение полупроводники получили благодаря своей способности становиться источниками тока при освещении — в качестве фотоэлементов. Изменение электропроводности полупроводников под влиянием температуры

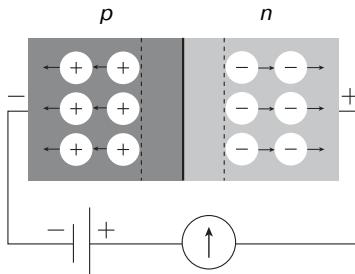
позволило применять их в качестве термометров, а также регуляторов температуры, температурных компенсаторов, термоэлементов (приборов, в которых тепловая энергия непосредственно превращается в электрическую), холодильников, нагревателей и т. п.

Прямой ток



Принцип подключения полупроводника для получения прямого тока: положительный полюс источника соединён с *p*-областью, а отрицательный — с *n*-областью.

Обратный ток



Принцип подключения полупроводника для получения обратного тока: отрицательный полюс источника соединён с *p*-областью, а положительный — с *n*-областью.

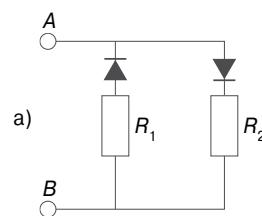


Практические задания

34

В цепи, изображённой на рисунке а, сопротивление диодов в прямом направлении пре-небрежимо мало, а в обратном многократно превышает сопротивление резисторов. При подключении к точке А положительного полюса батареи с ЭДС 12 В и пренебрежимо малым внутренним сопротивлением потребляемая мощность равна 7,2 Вт. При изменении полярности подключения батареи потребляемая мощность оказалась равной 14,4 Вт.

Укажите условия протекания тока через диоды и резисторы в обоих случаях и определите сопротивление резисторов в этой цепи.



Дано:

$$\varepsilon = 12 \text{ В}$$

$$P_1 = 7,2 \text{ Ом}$$

$$P_2 = 14,4 \text{ Ом}$$

$$R_1 - ?$$

$$R_2 - ?$$

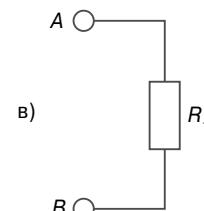
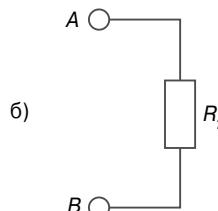
Решение:

При подключении положительного полюса батареи к точке А потенциал точки А выше потенциала точки В ($\varphi_A > \varphi_B$), поэтому ток через резистор R_1 не течёт, а течёт через резистор R_2 . Эквивалентная схема цепи имеет вид, изображённый на рисунке б. При этом потребляемая мощность:

$$P_1 = \frac{\varepsilon^2}{R_2}.$$

При изменении полярности подключения батареи $\varphi_A < \varphi_B$ ток через резистор R_2 не течёт, но течёт через резистор R_1 . Эквивалентная схема цепи в этом случае изображена на рисунке в. Тогда потребляемая мощность:

$$P_2 = \frac{\varepsilon^2}{R_1}.$$



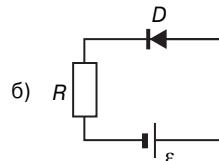
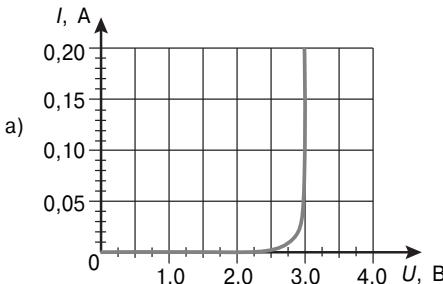
Из этих уравнений получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1 = \frac{\varepsilon^2}{P_2} \\ R_2 = \frac{\varepsilon^2}{P_1} \end{array} ; \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} R_1 = \frac{(12 \text{ В})^2}{14,4 \text{ Ом}} = 10 \text{ Ом} \\ R_2 = \frac{(12 \text{ В})^2}{7,2 \text{ Ом}} = 20 \text{ Ом} \end{array} . \right.$$

Ответ: $R_1 = 10 \text{ Ом}$, $R_2 = 20 \text{ Ом}$.

35

На рисунке *a* изображена зависимость силы тока через светодиод *D* от приложенного к нему напряжения, а на рисунке *б* — схема его включения. Напряжение на светодиоде практически не зависит от силы тока, текущего через него в интервале значений $0,05 \text{ А} < I < 0,2 \text{ А}$. Этот светодиод соединён последовательно с резистором *R* и подключён к источнику с ЭДС $\varepsilon_1 = 6 \text{ В}$. При этом сила тока в цепи равна $0,1 \text{ А}$. Какова сила тока, текущего через светодиод, при замене источника на другой с ЭДС $\varepsilon_2 = 4,5 \text{ В}$? Внутренним сопротивлением источников пренебречь.



Дано:

$$\varepsilon_1 = 6 \text{ В}$$

$$I_1 = 0,1 \text{ А}$$

$$U_1 = 3,0 \text{ В}$$

$$\varepsilon_2 = 4,5 \text{ В}$$

$$I_2 = ?$$

Решение:

$$\text{По закону Ома } R_D = \frac{U_1}{I_1}; \quad R_D = \frac{3,0 \text{ В}}{0,1 \text{ А}} = 30,0 \text{ Ом.}$$

$$\text{Полный ток в цепи: } I_1 = \frac{\varepsilon_1}{R + R_D}, \text{ откуда } R = \frac{\varepsilon_1}{I_1} - R_D.$$

$$R = \frac{6 \text{ В}}{0,1 \text{ А}} - 30,0 \text{ Ом} = 30,0 \text{ Ом.}$$

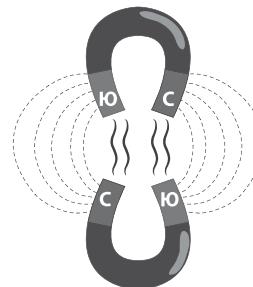
$$\text{Тогда } I_2 = \frac{\varepsilon_2}{R + R_D}; \quad I_2 = \frac{4,5 \text{ В}}{30,0 \text{ Ом} + 30,0 \text{ Ом}} = 0,075 \text{ А.}$$

Ответ: $I_2 = 0,075 \text{ А.}$



МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Свойство магнетита (или магнитного железняка) притягивать железные предметы было известно уже в глубокой древности. Слово «магнит» (от греч. *magnes*) означает название руды, добывавшейся в местности Магнезия 2500 лет назад. Магнетит — минерал, состоящий на 31 % из FeO (оксид железа(II)) (минерал вюстит) и на 69 % из Fe_2O_3 (оксид железа(III)) (минерал гематит)).



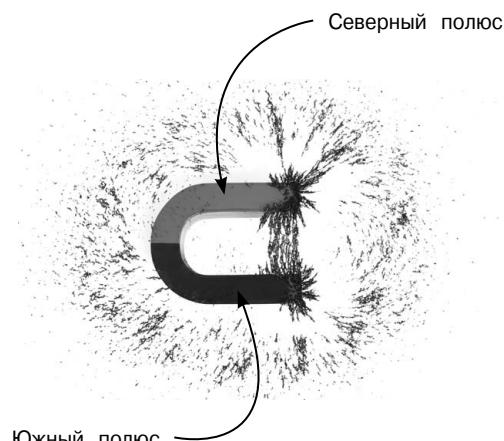
МЕХАНИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МАГНИТОВ

Магнит — это объект, сделанный из определённого материала; он притягивает к себе железо и создаёт магнитное поле.

Магнитные полюса — места наибольшего сгущения магнитных линий (см. раздел «Линии магнитного поля», с. 223). Каждый магнит имеет два полюса: северный (*N*) и южный (*S*).

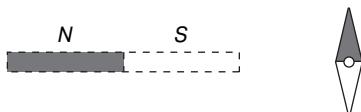
Невозможно добиться, чтобы образовался магнитный монополь (моно означает «один», монополь — «один полюс»), то есть кусок с одним полюсом. Если разломить магнит на два кусочка, каждый из них опять будет иметь северный и южный полюса.

Одноимённые магнитные полюса отталкивают друг друга, а разноимённые — притягивают.



Распределение железных опилок на стекле вокруг магнита

К магнитной стрелке (северный полюс затемнён, см. рисунок), которая может поворачиваться вокруг вертикальной оси, перпендикулярной плоскости чертежа, поднесли постоянный полосовой магнит. Как поведёт себя магнитная стрелка?



Ответ: стрелка повернётся на 90° против часовой стрелки, так как северный полюс стрелки притягивается к южному полюсу магнита.

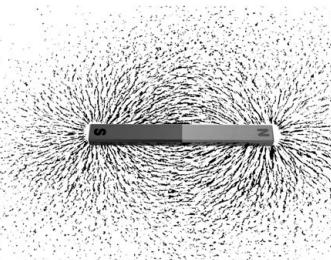
■ Магнитное поле

Магнитное поле — это область вокруг магнита, внутри которой ощущается действие магнита на внешние объекты.

Магнитных зарядов не существует. Источниками магнитного поля являются движущиеся электрические заряды (токи) или постоянные магниты. Постоянные магниты — устройства из магнитных жёстких материалов в виде полос, цилиндров, подковообразных конструкций, магнитных стрелок и др. Постоянными магнитами являются также Земля, Солнце и звёзды.

Магнитное поле в отличие от электрического оказывает силовое действие только на движущиеся заряды (токи).

Линии, образуемые магнитными стрелками или железными опилками в магнитном поле, называют **силовыми линиями** магнитного поля.



Магнитное поле постоянного магнита

Учёные условились, что линии магнитного поля выходят из северного конца магнита и входят в южный конец магнита.

■ Вектор магнитной индукции

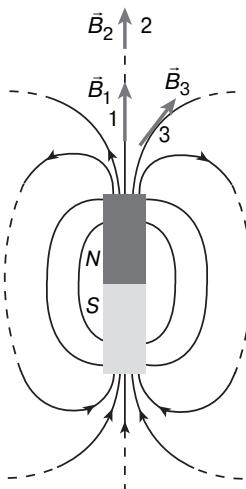
Вектор магнитной индукции \vec{B} является **силовой характеристикой** магнитного поля и определяет силы, действующие на токи или движущиеся заряды в магнитном поле; он направлен в каждой точке по касательной к силовым линиям.

Модуль вектора магнитной индукции равен отношению максимального значения силы, действующей на движущиеся заряды со стороны магнитного поля, к силе тока в проводнике и его длине:

$$B = \frac{F_{\max}}{I \cdot \Delta L},$$

где F_{\max} — сила, действующая на движущиеся заряды со стороны магнитного поля, I — сила тока в проводнике, ΔL — длина проводника.

Единица измерения называется тесла (**Тл**) — индукция такого магнитного поля, в котором на каждый метр длины проводника при силе тока 1 А действует максимальная сила Ампера 1 Н.

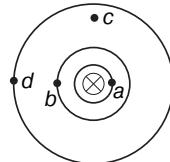


Линии магнитного поля постоянного магнита и векторы магнитной индукции \vec{B}_1 , \vec{B}_2 и \vec{B}_3 в точках 1, 2 и 3

Обозначение направления вектора магнитной индукции

\leftarrow	«влево»
\rightarrow	«вправо»
\odot	«выходит из плоскости рисунка»
\otimes	«уходит в плоскость рисунка»

✓ На рисунке (вид сверху) показана картина линий индукции магнитного поля прямого проводника с током. В какой из четырёх точек индукция магнитного поля наименьшая?

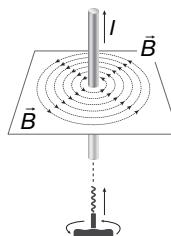


Ответ: наименьшая индукция магнитного поля в точке d .

За положительное направление вектора принимается (см. рисунок слева) направление от южного полюса S к северному полюсу N магнитной стрелки, свободно устанавливающейся в магнитном поле. Направление магнитной индукции определяется по правилу буравчика или по правилу правой руки.

Правило буравчика

Если направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращения ручки буравчика совпадает с направлением линий магнитной индукции.



Применение правила буравчика:
 I — сила тока в проводнике, \vec{B} — магнитная индукция

Правило правой руки

Если большой палец правой руки расположить по направлению тока, то направление обхвата проводника четырьмя пальцами покажет направление линий магнитной индукции.



Применение правила правой руки:
N и S — северный и южный полюса

■ Принцип суперпозиции магнитных полей

Результирующий вектор индукции магнитного поля в данной точке пространства равен векторной сумме векторов индукции магнитных полей, создаваемых в той же точке в отдельности:

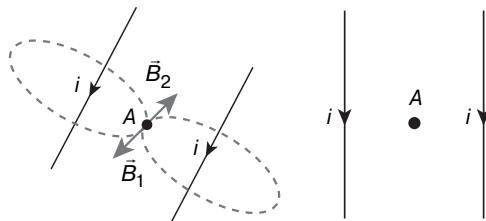
$$\vec{B} = \sum \vec{B}_i = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \dots + \vec{B}_n,$$

где $\vec{B} = \sum \vec{B}_i$ — индукция магнитного поля, $\vec{B}_1, \vec{B}_2, \vec{B}_3 \dots \vec{B}_n$ — векторы индукции магнитных полей, создаваемые в точке в отдельности.

В жизни практически всегда объекты находятся в полях нескольких источников магнитного поля. Если пройти по дому с компасом, можно заметить, что в некоторых местах стрелка отклоняется. Это происходит под

воздействием магнитных полей, создаваемых работающими электроприборами — микроволновыми печами, телевизорами, пылесосами и т. п.

По двум тонким прямым проводникам, параллельным друг другу, текут одинаковые токи i (см. рисунок справа). Как направлен вектор индукции создаваемого ими магнитного поля в точке A , находящейся посередине между проводниками?



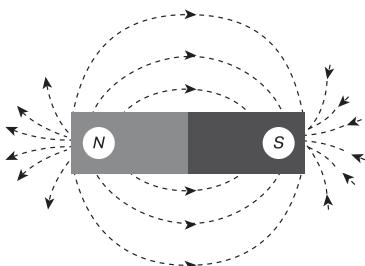
Ответ: определяя по правилу правой руки (см. рисунок слева) направление векторов магнитной индукции \vec{B}_1 и \vec{B}_2 , увидим, что они равны по модулю и противоположны по направлению, а значит, их векторная сумма равна нулю.

■ Линии магнитного поля

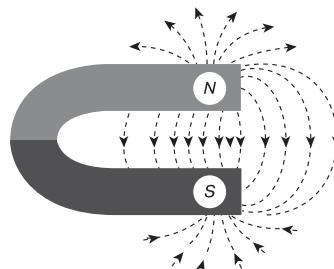
Линии магнитной индукции — линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора магнитной индукции в этой точке.

Линии магнитной индукции всегда замкнуты, они нигде не обрываются. Силовые поля, обладающие этим свойством, называются **вихревыми**.

Картина линий магнитного поля



Магнитное поле полосового постоянного магнита



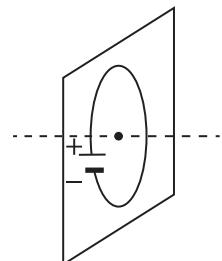
Магнитное поле подковообразного постоянного магнита



Практические задания

- 36** На рисунке изображён круглый проволочный виток, по которому течёт электрический ток. Виток расположен в вертикальной плоскости. Укажите направление вектора индукции магнитного поля тока в центре витка.

- 1) вертикально вверх в плоскости витка ↑
- 2) вертикально вниз в плоскости витка ↓
- 3) вправо перпендикулярно плоскости витка →
- 4) влево перпендикулярно плоскости витка ←

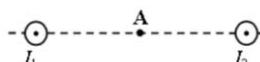


Решение:

По правилу буравчика (правилу правой руки) буравчик (большой палец) показывает направление вектора магнитной индукции влево.

Ответ: 4.

- 37** Магнитное поле $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$ создано в точке А двумя параллельными длинными проводниками с токами I_1 и I_2 , расположенными перпендикулярно плоскости чертежа.



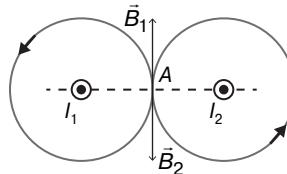
Укажите направление векторов \vec{B}_1 и \vec{B}_2 в точке А в плоскости чертежа.

- 1) \vec{B}_1 — вверх, \vec{B}_2 — вниз
- 2) \vec{B}_1 — вверх, \vec{B}_2 — вверх
- 3) \vec{B}_1 — вниз, \vec{B}_2 — вверх
- 4) \vec{B}_1 — вниз, \vec{B}_2 — вниз

Решение:

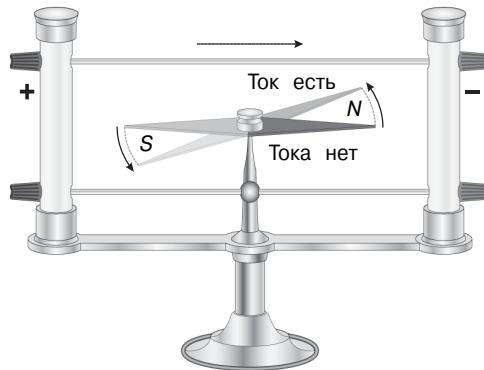
Оба тока направлены на нас. Покажем на рисунке направление векторов магнитной индукции.

Ответ: 1.



МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПРОВОДНИКА С ТОКОМ. ОПЫТ ЭРСТЕДА

В 1820 г. Х. Эрстед демонстрировал нагревание проводника электрическим током и обратил внимание на то, что стрелка компаса располагается в отсутствие тока параллельно проводнику (см. рисунок), а при включении тока отклоняется почти перпендикулярно проводнику. Таким образом было показано, что электрический ток оказывает магнитное действие.

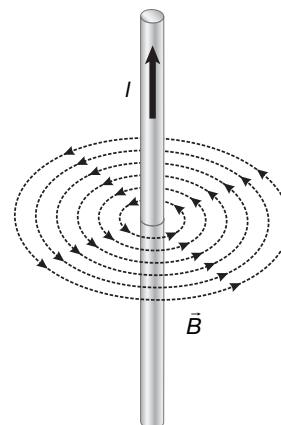


Опыт Эрстеда: N и S — полюса магнитной стрелки

При прохождении тока по прямолинейному проводнику вокруг него

возникает **магнитное поле**. Магнитные силовые линии этого поля располагаются по концентрическим окружностям, в центре которых находится проводник с током.

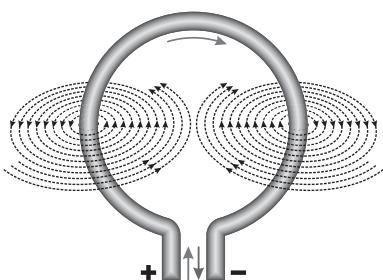
Картина линий магнитного поля



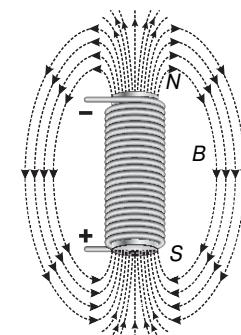
Магнитное поле длинного прямого проводника с током



Однородное поле — поле, во всех точках которого вектор магнитной индукции имеет одно и то же значение.



Магнитное поле длинного замкнутого кольцевого проводника с током



Магнитное поле катушки с током (внутри катушки поле однородное)

СИЛА АМПЕРА: НАПРАВЛЕНИЕ, ВЕЛИЧИНА

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

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

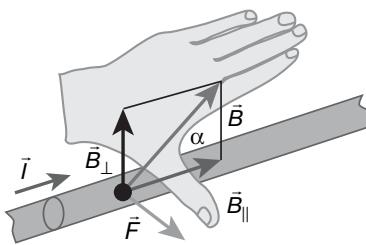
$$F_A = I \cdot B \cdot L \cdot \sin \alpha,$$

где F_A — сила Ампера, I — сила тока в проводнике, B — магнитная индукция, L — длина проводника, α — угол между направлениями тока и магнитной индукции.

■ Направление силы Ампера

Направление силы Ампера определяется **правилом левой руки**:

если кисть левой руки расположить так, что четыре вытянутых пальца указывают направление тока в проводнике, а составляющая вектора магнитной индукции, перпендикулярная проводнику, входит в ладонь, то отогнутый (в плоскости ладони) на 90° большой палец покажет направление силы, действующей на отрезок проводника (см. рисунок).



Демонстрация правила левой руки:

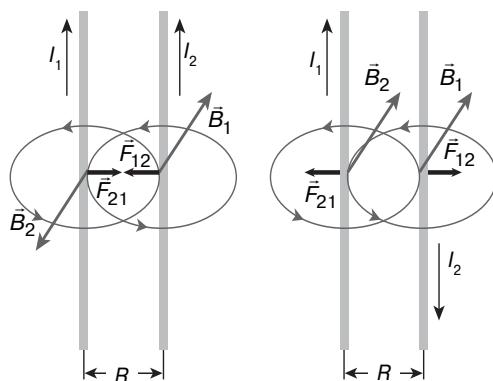
\vec{F} — сила Ампера, \vec{I} — сила тока в проводнике, \vec{B} — магнитная индукция, \vec{B}_\perp и \vec{B}_\parallel — её вертикальная и горизонтальная составляющие, α — угол между направлением тока и магнитной индукции

Следствие закона Ампера

Проводники с токами, текущими в одном направлении, притягиваются, а проводники с токами, текущими в противоположных направлениях, отталкиваются.



Вы когда-нибудь задумывались о том, почему троллейбусные «усы», срывааясь с проводов, разлетаются в разные стороны? Они представляют собой проводники с противоположно направленными токами и поэтому отталкиваются.



\vec{F}_{12} и \vec{F}_{21} — силы, действующие на проводник со стороны магнитного поля, созданного другим проводником, I_1 и I_2 — токи в этих проводниках, \vec{B}_1 и \vec{B}_2 — векторы магнитной индукции соответствующих полей, R — расстояние между проводниками



Практические задания

- 38 С какой силой действует однородное магнитное поле с индукцией 2,5 Тл на проводник длиной 50 см, расположенный под углом 30° к вектору индукции, при силе тока в проводнике 0,5 А?

Дано:

$$B = 2,5 \text{ Тл}$$

$$L = 50 \text{ см} = 0,5 \text{ м}$$

$$\alpha = 30^\circ$$

$$I = 0,5 \text{ А}$$

$$F_A = ?$$

Решение:

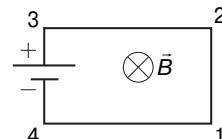
По закону Ампера

$$F_A = I \cdot B \cdot L \cdot \sin \alpha.$$

$$F_A = 0,5 \text{ А} \cdot 2,5 \text{ Тл} \cdot 0,5 \text{ м} \cdot \sin 30^\circ = 0,3125 \text{ Н.}$$

Ответ: $F_A = 0,3125 \text{ Н.}$

- 39 Электрическая цепь, состоящая из четырёх прямолинейных горизонтальных проводников (1—2, 2—3, 3—4, 4—1) и источника постоянного тока, находится в однородном магнитном поле, у которого вектор магнитной индукции \vec{B} направлен вертикально вниз (см. рисунок, вид сверху). Куда направлена сила Ампера, действующая на проводник 1—2?



- 1) вертикально вверх
2) вертикально вниз

- 3) горизонтально вправо
4) горизонтально влево

Решение:

На участке 1—2 сила тока направлена вниз (направление от «+» к «-»), вектор магнитной индукции входит в плоскость рисунка, тогда по правилу левой руки сила Ампера направлена вправо.

Ответ: 3.

- 40** Прямолинейный проводник подвешен горизонтально на двух нитях в однородном магнитном поле с индукцией 10 мТл. Вектор магнитной индукции горизонтален и перпендикулярен проводнику. Во сколько раз изменится сила натяжения нитей при изменении направления тока на противоположное? Масса единицы длины проводника 0,01 кг/м, сила тока в проводнике 5 А.

Дано:

$$B = 10^{-2} \text{ Тл}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$\frac{m}{L} = 10^{-2} \frac{\text{кг}}{\text{м}}$$

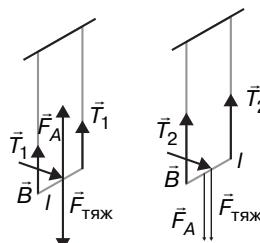
$$I = 5 \text{ А}$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$$\frac{T_2}{T_1} = ?$$

Решение:

При изменении направления тока в проводнике направление силы Ампера изменится (см. рисунок).



По первому закону Ньютона равнодействующая сил

$$\text{в обоих случаях будет равна: } \begin{cases} 2T_1 = F_{\text{тяж}} - F_A \\ 2T_2 = F_{\text{тяж}} + F_A \end{cases},$$

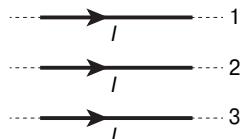
где $F_A = I \cdot B \cdot L \cdot \sin\alpha$ — сила Ампера и $\sin\alpha = 1$, $F_{\text{тяж}} = m \cdot g$ — сила тяжести. Разделив нижнее уравнение на верхнее, получим:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{F_{\text{тяж}} + F_A}{F_{\text{тяж}} - F_A} = \frac{m \cdot g + I \cdot B \cdot L}{m \cdot g - I \cdot B \cdot L} = \frac{\frac{m}{L} \cdot g + B \cdot I}{\frac{m}{L} \cdot g - B \cdot I}.$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{10^{-2} \frac{\text{КГ}}{\text{м}} \cdot 10 \text{ м/с}^2 + 10^{-2} \text{ Тл} \cdot 5 \text{ А}}{10^{-2} \frac{\text{КГ}}{\text{м}} \cdot 10 \text{ м/с}^2 - 10^{-2} \text{ Тл} \cdot 5 \text{ А}} = 3.$$

Ответ: в 3 раза.

- 41** На проводник 3 со стороны двух других проводников действует сила Ампера (см. рисунок). Все проводники тонкие, лежат в одной плоскости, параллельны друг другу, расстояния между соседними проводниками одинаковы, I — сила тока. Сила Ампера в этом случае



- 1) направлена вверх ↑ 3) направлена к нам ⊖
 2) направлена вниз ↓ 4) равна нулю

Решение:

По следствию из закона Ампера проводники с токами, текущими в одном направлении, притягиваются, а значит, сила Ампера направлена вверх.

Ответ: 1.

СИЛА ЛОРЕНЦА: НАПРАВЛЕНИЕ, ВЕЛИЧИНА

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

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

$$F_L = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha,$$

где q — заряд движущейся частицы, v — скорость частицы, B —

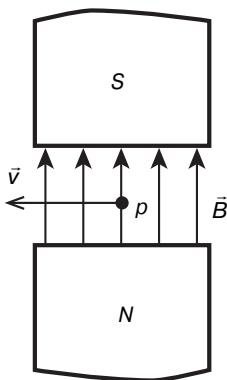
модуль вектора индукции магнитного поля, α — угол между скоростью и вектором магнитной индукции.

■ Направление силы Лоренца

Направление силы Лоренца, действующей на положительно заряженную частицу, определяется, как

и направление силы Ампера, по правилу левой руки. Если кисть левой руки расположить так, что четыре вытянутых пальца указывают направление скорости положительного заряда (или противоположное скорости отрицательного заряда), а составляющая вектора магнитной индукции, перпендикулярная скорости частицы, входит в ладонь, то отогнутый (в плоскости ладони) на 90° большой палец покажет направление силы, действующей на данный заряд.

Протон p , влетевший в зазор между полюсами электромагнита, имеет скорость \vec{v} , перпендикулярную вектору индукции \vec{B} магнитного поля, направленному вертикально (см. рисунок). Куда направлена действующая на него сила Лоренца \vec{F} ?



Ответ: сопоставив по правилу левой руки направления скорости протона и магнитной индукции, придём к выводу, что сила Лоренца направлена от наблюдателя в плоскость рисунка.

■ Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле

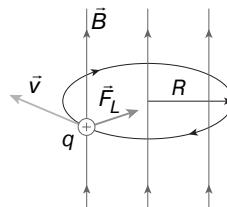
Следствия формулы силы Лоренца и правила левой руки:

- 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 работы не совершает.

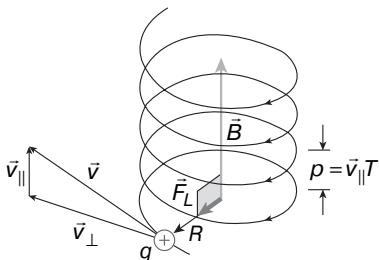
Период обращения частицы в однородном магнитном поле не зависит от её скорости:

$$T = \frac{2\pi \cdot R}{v} = \frac{2\pi \cdot m}{q \cdot B},$$

где R — радиус обращения частицы, v — скорость, m — масса, q — заряд частицы, B — индукция магнитного поля.



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



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, p — вертикальная составляющая импульса частицы, определяющая шаг спирали, T — период обращения



Практические задания

- 42** Нейтрон ${}_0^1n$ и альфа-частица ${}_2^4He$ влетают в однородное магнитное поле перпендикулярно вектору магнитной индукции с одинаковыми скоростями v . Чему равно отношение модулей сил $F_n : F_{He}$, действующих на них со стороны магнитного поля в этот момент времени?

Решение:

Поскольку сила Лоренца действует только на заряженные частицы, а нейтрон ${}_0^1n$ не заряжен, то и сила Лоренца, действующая на него, равна нулю: $F_n = 0$. Значит, и $\frac{F_n}{F_{He}} = 0$.

Ответ: $\frac{F_n}{F_{He}} = 0$.

- 43** Ион, заряд которого равен элементарному заряду, движется в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,15$ Тл. Импульс движущегося иона равен $2,4 \cdot 10^{-23}$ кг·м/с и перпендикулярен \vec{B} . Каков радиус дуги, по которой движется ион? Ответ выразите в мм.

Дано:

$$\begin{aligned}q &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \\B &= 0,15 \text{ Тл} \\p &= 2,4 \cdot 10^{-23} \text{ кг} \cdot \text{м/с} \\&\alpha = 90^\circ \\R &=?\end{aligned}$$

Решение:

При движении иона в магнитном поле на него действует сила Лоренца, по второму закону Ньютона сообщает ему центростремительное ускорение (его скорость перпендикулярна силе): $F_L = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha = m \cdot a$. (1)

Поскольку центростремительное ускорение связано со скоростью формулой $a = \frac{v^2}{R}$, то выражение (1) примет вид: $q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha = m \cdot \frac{v^2}{R}$, или $q \cdot B \cdot \sin \alpha = m \cdot \frac{v}{R} = \frac{p}{R}$.

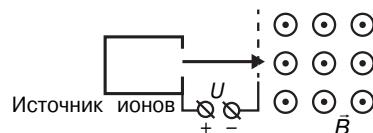
Учитывая, что $\sin\alpha = 1$, получим:

$$R = \frac{p}{q \cdot B}; R = \frac{2,4 \cdot 10^{-23} \text{ кг} \cdot \text{м}/\text{с}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 0,15 \text{ Тл}} = 10^{-3} \text{ м} = 1 \text{ мм.}$$

Ответ: $R = 1 \text{ мм.}$

44

Ион ускоряется в электрическом поле с разностью потенциалов $U = 10 \text{ кВ}$ и попадает в однородное магнитное поле перпендикулярно вектору его индукции \vec{B} (см. рисунок). Радиус траектории движения иона в магнитном поле $R = 0,2 \text{ м}$, отношение массы иона к его электрическому заряду $\frac{m}{q} = 5 \cdot 10^{-7} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$. Определите значение модуля индукции магнитного поля. Кинетической энергией иона при его вылете из источника пренебречь.



Дано:

$$U = 10^4 \text{ В}$$

$$R = 0,2 \text{ м}$$

$$\frac{m}{q} = 5 \cdot 10^{-7} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$B - ?$$

Решение:

Электрическое поле передаёт электрону кинетическую энергию: $W_k = \frac{m \cdot v^2}{2} = e \cdot U$, то есть в электрическом поле электрон приобретает скорость $v = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{m}}$.

В магнитном поле сила Лоренца по второму закону Ньютона сообщает ускорение: $F_L = B \cdot q \cdot v \cdot \sin\alpha = m \cdot a$.

Поскольку сила Лоренца направлена перпендикулярно скорости движения частицы, то электрон начинает двигаться по окружности, а значит, ускорение —

$$\text{центробежительное: } a = \frac{v^2}{R}.$$

$$\text{Тогда } B \cdot q \cdot v \cdot \sin\alpha = m \cdot \frac{v^2}{R}, \text{ или } B \cdot q \cdot \sin\alpha = \frac{m \cdot v}{R},$$

$$\text{откуда } B \cdot q \cdot \sin\alpha = m \cdot \frac{v}{R} = m \cdot \frac{\sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot U}{m}}}{R} = \frac{\sqrt{2 \cdot q \cdot U \cdot m}}{R},$$

$$\text{откуда } B = \frac{\sqrt{2 \cdot q \cdot U \cdot m}}{R \cdot q \cdot \sin \alpha} = \frac{1}{R \cdot \sin \alpha} \sqrt{2 \cdot U \cdot \frac{m}{q}}$$

$$B = \frac{1}{0,2 \text{ м} \cdot \sin 90^\circ} \sqrt{2 \cdot 10^4 \text{ В} \cdot 5 \cdot 10^{-7} \frac{\text{КГ}}{\text{Кл}}} = 0,5 \text{ Тл.}$$

Ответ: $B = 0,5 \text{ Тл.}$

- 45** Два первоначально покоявшихся электрона ускоряются в электрических полях: первый в поле с разностью потенциалов U , второй в поле с разностью потенциалов $2U$. После ускорения электроны попадают в однородное магнитное поле, линии индукции которого перпендикулярны скорости движения электронов. Определите отношение радиусов окружностей $\frac{R_2}{R_1}$, описываемых электронами в магнитном поле.

Дано:

$$q_1 = q_2 = e$$

$$m_1 = m_2 = m$$

$$v_{01} = v_{02} = 0$$

$$U_1 = U$$

$$U_2 = 2U$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$$\frac{R_2}{R_1} - ?$$

Решение:

Электрическое поле передаёт электрону кинетическую энергию: $W_k = \frac{m \cdot v^2}{2} = e \cdot U$, то есть в электрическом поле электрон приобретает скорость $v = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{m}}$.

С такой скоростью электрон влетает в магнитное поле, где сила Лоренца по второму закону Ньютона сообщает ускорение: $F_L = B \cdot q \cdot v \cdot \sin \alpha = m \cdot a$.

Поскольку сила Лоренца направлена перпендикулярно скорости движения частицы, то электрон начинает двигаться по окружности, а значит, ускорение центростремительное: $a = \frac{v^2}{R}$. Тогда $B \cdot q \cdot v \cdot \sin \alpha = m \cdot \frac{v^2}{R} \Rightarrow$

$$\Rightarrow B \cdot q \cdot \sin \alpha = m \cdot \frac{v}{R} = m \cdot \frac{\sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{m}}}{R} = \frac{\sqrt{2 \cdot e \cdot U \cdot m}}{R},$$

$$\text{откуда } R = \frac{\sqrt{2 \cdot e \cdot U \cdot m}}{B \cdot q \cdot \sin \alpha}.$$

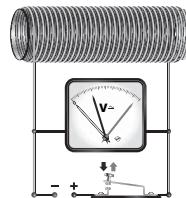
$$\text{Тогда для каждой частицы } \frac{R_2}{R_1} = \sqrt{\frac{U_2}{U_1}} = \sqrt{\frac{2U}{U}} = \sqrt{2} \approx 1,4.$$

Ответ: $\frac{R_2}{R_1} \approx 1,4$.



ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

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



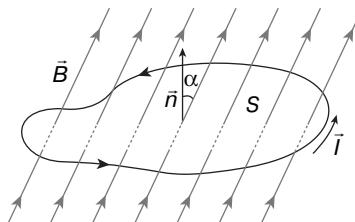
ПОТОК ВЕКТОРА МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Магнитным потоком Φ через площадь S контура называют величину:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos\alpha,$$

где B — модуль вектора магнитной индукции, α — угол между вектором и нормалью к плоскости контура.

Единица магнитного потока в системе СИ — вебер (**Вб**).



Изображение потока вектора магнитной индукции:

B — магнитная индукция, \vec{n} — нормаль к площадке, I — сила тока в контуре, S — площадь контура, α — угол между вектором магнитной индукции и нормалью к плоскости контура

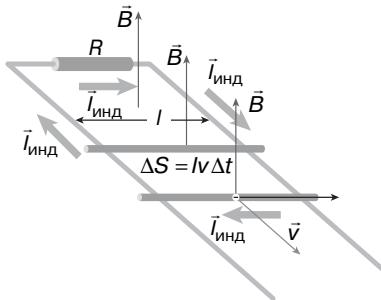
ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

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

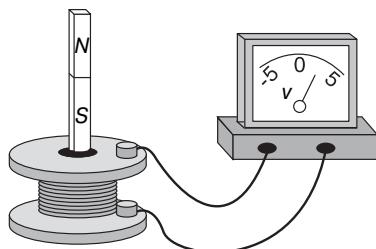
Изменение магнитного потока, пронизывающего замкнутый контур,

может происходить по двум причинам:

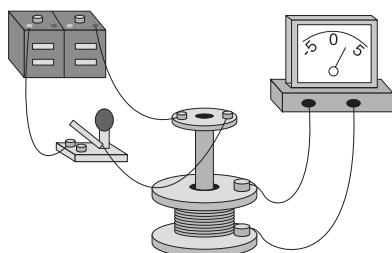
- изменение вследствие перемещения контура или его частей в постоянном во времени магнитном поле;
- изменение во времени магнитного поля при неподвижном контуре.



Движение проводника в магнитном поле:
 \vec{B} — магнитная индукция, $I_{\text{инд}}$ — индуцированный ток в контуре, ΔS — площадь контура, \vec{v} — скорость движения проводника



Вдвигание постоянного магнита в катушку



Вдвигание катушки с током в неподвижную катушку

- ✓ Сквозь металлическое и деревянное кольца, не касаясь их, падают одинаковые намагниченные стержни. По-разному ли влияют кольца на ускорение стержней? Если да, то в чём состоит это различие?

Ответ: на обеих стадиях падения стержня сквозь металлическое кольцо его ускорение меньше g , поскольку при приближении кольца магнитный поток возрастает и возникает препятствующий индукционный ток, а при удалении — наоборот. Деревянное же кольцо не влияет на ускорение пролетающего сквозь него стержня.

- ✓ На горизонтальном столе лежит полосовой магнит. Сверху падают два металлических колечка так, что их плоскости вертикальны. Первое попадает на середину полосового магнита, второе — на его конец. В каком случае возникает ток в процессе падения колец?

Ответ: поскольку изменение магнитного потока относительно металлических колечек происходит в обоих случаях, то и ток возникает в обоих колечках.



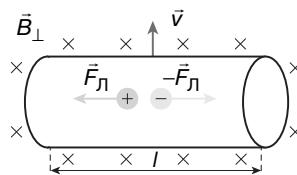
Приходилось ли вам видеть искру при извлечении вилки из розетки? Это происходит потому, что при выключении источника тока возникает ЭДС самоиндукции, которая по правилу Ленца поддерживает уменьшающийся ток в цепи. При этом между кон-

цами вилки создаётся разность потенциалов, что и приводит к электрическому разряду. В результате по закону Джоуля — Ленца проводник нагревается, что может вызвать выгорание контактов.

■ 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:

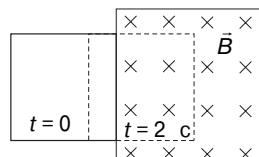
B_{\perp} — вертикальная составляющая магнитной индукции, \vec{F}_L — сила Лоренца со стороны магнитного поля, l — длина проводника, v — скорость движения проводника, \times — направление магнитной индукции (в плоскость рисунка)



Практические задания

46

Квадратная рамка со стороной $a = 10$ см вдвигается со скоростью $v = 3$ см/с в однородное магнитное поле с индукцией $B = 10^{-2}$ Тл, направленной перпендикулярно плоскости рамки (см. рисунок). Найдите магнитный поток сквозь рамку в момент времени $t = 2$ с.

Дано:

$$a = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$$

$$v = 3 \text{ см/с} = 0,03 \text{ м/с}$$

$$\alpha = 0^\circ$$

$$B = 10^{-2} \text{ Тл}$$

$$t = 2 \text{ с}$$

$$\Phi = ?$$

Решение:

По формуле магнитного потока

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha,$$

где $S = a^2 = a \cdot v \cdot t$ — площадь рамки, причём $a = v \cdot t$ — изменяющаяся сторона рамки. Тогда

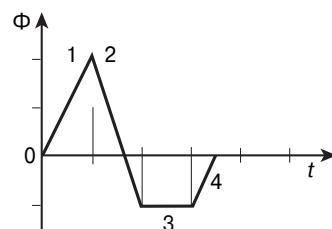
$$\Phi = B \cdot a \cdot v \cdot t \cdot \cos \alpha.$$

$$\Phi = 10^{-2} \text{ Тл} \cdot 0,1 \text{ м} \cdot 0,03 \text{ м/с} \cdot 2 \text{ с} \cdot \cos 0^\circ = 6 \cdot 10^{-5} \text{ Вб} = 60 \text{ мкВб.}$$

Ответ: $\Phi = 60 \text{ мкВб.}$

47

На рисунке показан график зависимости магнитного потока, пронизывающего контур, от времени. На каком участке графика модуль ЭДС индукции принимает наибольшее значение?



Решение:

По углу наклона прямой можно судить о быстроте изменения магнитного потока, то есть модуль ЭДС индукции принимает наибольшее значение на участке 2.

Ответ: на участке 2.

- 48** Квадратная проволочная рамка со стороной $a=0,4$ м расположена перпендикулярно линиям вектора магнитной индукции однородного магнитного поля. Величина вектора магнитной индукции $B=0,04$ Тл. За время $\Delta t=0,02$ с магнитное поле равномерно исчезает до нуля. Чему равен модуль ЭДС индукции, генерируемой при этом в проволочной рамке?

Дано:

$$\begin{aligned}a &= 0,4 \text{ м} \\ \alpha &= 0^\circ \\ B_1 &= 0,04 \text{ Тл} \\ \Delta t &= 0,02 \text{ с} \\ B_2 &= 0\end{aligned}$$

$$\varepsilon_i = ?$$

Решение:

По закону электромагнитной индукции Фарадея

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta B \cdot S \cdot \cos\alpha}{\Delta t}, \text{ где } S = a^2, \cos\alpha = 1.$$

Тогда

$$\varepsilon_i = -\frac{(B_2 - B_1) \cdot a^2}{\Delta t}.$$

$$\varepsilon_i = -\frac{(0 - 0,04 \text{ Тл}) \cdot (0,4 \text{ м})^2}{0,02 \text{ с}} = 0,32 \text{ В.}$$

Ответ: $\varepsilon_i = 0,32 \text{ В.}$

ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ФАРАДЕЯ

Закон электромагнитной индукции, или закон Фарадея — Максвелла. ЭДС электромагнитной индукции ε_i в замкнутом контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром:

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\Phi'(t),$$

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

ЭДС ИНДУКЦИИ В ПРЯМОМ ПРОВОДНИКЕ ДЛИНОЙ L , ДВИЖУЩЕМСЯ СО СКОРОСТЬЮ v В ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ B

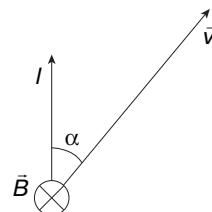
ЭДС индукции в проводнике, движущемся в однородном магнитном поле, определяется по формуле:

$$\varepsilon_i = B \cdot I \cdot v \cdot \sin \alpha,$$

где B — индукция магнитного поля, I — длина проводника, v — скорость движения проводника, α — угол между векторами \vec{v} и \vec{B} .

Если в магнитном поле будет двигаться прямоугольная рамка, то ЭДС

будет индуцироваться в её параллельных сторонах, а если в рамке n витков, то $\varepsilon_i = n \cdot B \cdot L \cdot v \cdot \sin \alpha$.



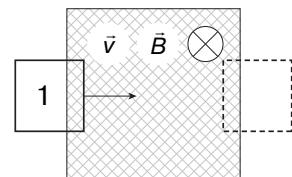
Проводник длиной I , движущийся со скоростью \vec{v} в однородном магнитном поле \vec{B}



Практические задания

49

В заштрихованной области на рисунке действует однородное магнитное поле, направленное перпендикулярно плоскости рисунка, $B = 0,1$ Тл. Проволочную квадратную рамку с сопротивлением $R = 10$ Ом и стороной $I = 10$ см перемещают в плоскости рисунка поступательно со скоростью $v = 1$ м/с. Чему равен индукционный ток в рамке в состоянии 1?

**Дано:**

$$\begin{aligned} B &= 0,1 \text{ Тл} \\ R &= 10 \text{ Ом} \\ \alpha &= 90^\circ \\ I &= 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м} \\ v &= 1 \text{ м/с} \end{aligned}$$

$$I_i = ?$$

Решение:

Согласно закону Фарадея при изменении магнитного потока через замкнутый контур в нём возникает ЭДС индукции величиной:

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

Магнитный поток при $\cos \alpha = 1$ определяется:

$$\Delta \Phi = B \cdot \Delta S.$$

При этом пока рамка пересекает границы магнитного поля (то есть в состоянии 1), площадь изменяется на величину ΔS за время Δt . Следовательно, в рамке возникает ЭДС величиной

$$|\varepsilon_i| = \frac{B \cdot \Delta S}{\Delta t} = \frac{B \cdot I \cdot l}{\Delta t} = B \cdot I \cdot v.$$

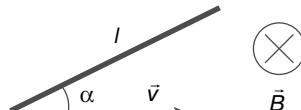
Величину индукционного тока можно найти из закона Ома:

$$I_i = \frac{\varepsilon_i}{R} = \frac{B \cdot I \cdot v}{R}.$$

$$I_i = \frac{0,1 \text{ Тл} \cdot 0,1 \text{ м} \cdot 1 \text{ м/с}}{10 \text{ Ом}} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ А} = 1 \text{ мА.}$$

Ответ: $I_i = 1 \text{ мА.}$

- 50** Проводящий стержень длиной $l = 20 \text{ см}$ движется поступательно в однородном магнитном поле со скоростью $v = 1 \text{ м/с}$ так, что угол между стержнем и вектором скорости $\alpha = 30^\circ$ (см. рисунок). ЭДС индукции в стержне равна 0,5 В. Какова индукция магнитного поля?



Дано:

$$l = 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м}$$

$$v = 1 \text{ м/с}$$

$$\alpha = 30^\circ$$

$$\varepsilon_i = 0,05 \text{ В}$$

$B - ?$

Решение:

ЭДС индукции в проводнике, движущемся в однородном магнитном поле:

$$\varepsilon_i = B \cdot l \cdot v \cdot \sin \alpha, \text{ откуда } B = \frac{\varepsilon_i}{l \cdot v \cdot \sin \alpha}.$$

$$B = \frac{0,05 \text{ В}}{0,2 \text{ м} \cdot 1 \text{ м/с} \cdot \sin 30^\circ} = 0,5 \text{ Тл.}$$

Ответ: $B = 0,5 \text{ Тл.}$

- 51** Горизонтально расположенный проводник длиной 1 м движется равноускоренно в вертикальном однородном магнитном поле, индукция которого направлена перпендикулярно проводнику и скорости его движения (см. рисунок). При начальной скорости проводника, равной нулю, и ускорении 8 м/с^2 он переместился на 1 м. Какова индукция магнитного поля, в котором двигался проводник, если ЭДС индукции на концах проводника в конце движения равна 2 В?

Дано:

$I = 1\text{ м}$

$\alpha = 90^\circ$

$v_0 = 0$

$a = 8\text{ м}/\text{с}^2$

$s = 1\text{ м}$

$\varepsilon_i = 2\text{ В}$

 $B - ?$ **Решение:**

ЭДС индукции в проводнике, движущемся в однородном магнитном поле: $\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

Изменение магнитного потока за малое время Δt равно:

$$\Delta\Phi = B \cdot S \cdot \cos(90^\circ - \alpha) = B \cdot S,$$

где $S = I \cdot s$ — площадь, равная произведению длины проводника I на его перемещение s за время Δt , то есть $\Delta\Phi = B \cdot I \cdot s$.

$$\text{Следовательно, } |\varepsilon_i| = \frac{B \cdot I \cdot s}{\Delta t} = B \cdot I \cdot \frac{s}{\Delta t} = B \cdot I \cdot v,$$

где v — скорость движения проводника.

В конце пути длиной x скорость проводника найдём

$$\text{из формулы } s = \frac{v^2 - v_0^2}{2 \cdot a} = \frac{v^2}{2 \cdot a}, \text{ откуда } v = \sqrt{2 \cdot a \cdot s}$$

(a — ускорение), так что $|\varepsilon_i| = B \cdot \sqrt{2 \cdot a \cdot s} \cdot I$, откуда

$$B = \frac{|\varepsilon_i|}{\sqrt{2 \cdot a \cdot s} \cdot I}.$$

$$B = \frac{2\text{ В}}{\sqrt{2 \cdot 8\text{ м}/\text{с}^2 \cdot 1\text{ м}}} = 0,5\text{ Тл.}$$

Ответ: $B = 0,5\text{ Тл.}$

ПРАВИЛО ЛЕНЦА

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. Наглядно проиллюстрировать правило Ленца можно с помощью алюминиевого (медного) кольца, приближая (удаляя) его к магниту. При этом кольцо будет отталкиваться (притягиваться).

■ Алгоритм определения направления индукционного тока

1. Определить направление вектора магнитной индукции \vec{B} (по направлению северного полюса).
2. Определить $\Delta\Phi > 0$ (при приближении магнита) или $\Delta\Phi < 0$ (при удалении магнита).

3. Определить направление вектора \vec{B}_i , индуцированного магнитного поля: при $\Delta\Phi > 0$ векторы \vec{B} и \vec{B}_i противоположно направлены, при $\Delta\Phi < 0$ векторы \vec{B} и \vec{B}_i сонаправлены.

4. По направлению вектора \vec{B}_i с помощью правила правой руки определить направление индукционного тока в контуре.

■ Применение правила Ленца

I случай



$$\Delta\Phi > 0$$

II случай



$$\Delta\Phi > 0$$

III случай



$$\Delta\Phi < 0$$

IV случай



$$\Delta\Phi < 0$$

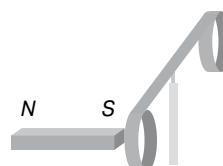
Магнит приближают

Магнит удаляют

На рисунке запечатлён момент демонстрации по проверке правила Ленца, когда все предметы неподвижны. Южный полюс магнита находится вблизи сплошного алюминиевого кольца. Коромысло с алюминиевыми кольцами может свободно вращаться вокруг вертикальной опоры. Как будет реагировать ближайшее к магниту кольцо, если передвинуть магнит вправо?

Ответ: кольцо будет удаляться от магнита. Если передвинуть магнит

вправо (приблизить), то магнитный поток будет возрастать: $\Delta\Phi > 0$. Значит, индукционный ток создаст такую магнитную индукцию, которая будет направлена противоположно вектору индукции магнита, то есть магниты будут отталкиваться.

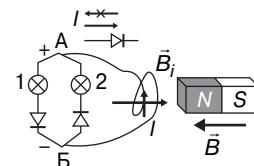
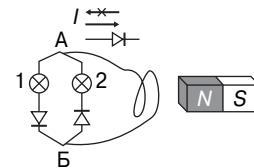




Практические задания

52

Электрическая цепь состоит из двух лампочек, двух диодов и витка провода, соединённых, как показано на рисунке. (Диод пропускает ток только в одном направлении, что представлено в верхней части рисунка.) Какая из лампочек загорится, если к витку приблизить северный полюс магнита? Ответ поясните, указав, какие явления и закономерности были использованы при решении.



Решение:

При изменении магнитного потока (приближении магнита) в контуре по закону электромагнитной индукции будет возникать ток (см. рисунок), который по правилу Ленца будет противодействовать изменению магнитного потока. Поскольку при приближении магнита $\Delta\Phi > 0$, то индукционный ток будет создавать магнитное поле противоположного направления (на рисунке вектор B_i). Определяя направление тока по правилу буравчика (правилу правой руки), получим, что ток будет направлен от точки А к точке В. Значит, через диод 1 ток будет идти, через диод 2 — нет. Таким образом, загорится лампочка 1.

Ответ: загорится лампочка 1.

ИНДУКТИВНОСТЬ

Собственный магнитный поток Φ , пронизывающий контур или катушку с током, пропорционален силе тока I :

$$\Phi = L \cdot I.$$

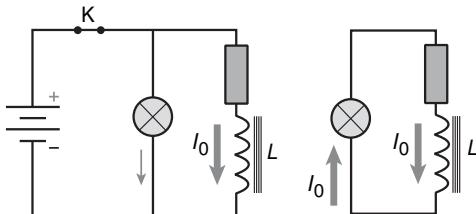
Коэффициент пропорциональности L в этой формуле называется коэффициентом самоиндукции или индуктивностью катушки. Единица индуктивности в СИ называется генри (Гн).

Самоиндукция

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.



Пример самоиндукции:
при размыкании ключа К лампа ярко вспыхивает.
 L — индуктивность катушки, I_0 — ток, созданный источником тока

■ ЭДС самоиндукции

ЭДС самоиндукции, возникающая в катушке с постоянным значением индуктивности, согласно закону Фардая равна:

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t},$$

где $\Delta\Phi$ — изменение магнитного потока, t — время, L — индуктивность катушки, ΔI — изменение силы тока в ней за время Δt .

ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна индуктивности катушки и скорости изменения силы тока в ней.



Практические задания

- 53 В проводнике индуктивностью 1 мГн сила тока в течение $0,1$ с равномерно возрастает от 0 до некоторого конечного значения. При этом в проводнике возникает ЭДС самоиндукции $0,2$ В. Определите конечное значение силы тока в проводнике.

Дано:

$$L = 1\text{ мГн} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

$$\Delta t = 0,1 \text{ с}$$

$$I_0 = 0$$

$$\varepsilon_s = 0,2 \text{ В}$$

$$I = ?$$

Решение:

Из формулы ЭДС самоиндукции

$$\varepsilon_i = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = -L \frac{(I - I_0)}{\Delta t} \text{ имеем: } I = \frac{\varepsilon_i \cdot \Delta t}{L} + I_0.$$

$$I = \frac{0,2 \text{ В} \cdot 0,1 \text{ с}}{1 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}} + 0 = 20 \text{ А.}$$

Ответ: $I = 20 \text{ А.}$

- 54 При какой силе тока в витке проволоки индуктивностью $2 \cdot 10^{-3}$ Гн создаётся магнитный поток 12 мВб ?

Дано:

$$L = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

$$\Phi = 12 \text{ мВб} = 12 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$$

$$I = ?$$

Решение:

Из формулы магнитного потока

$$\Phi = L \cdot I \text{ имеем: } I = \frac{\Phi}{L}.$$

$$I = \frac{12 \cdot 10^{-3} \text{ В}}{2 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}} = 6 \text{ А.}$$

Ответ: $I = 6 \text{ А.}$

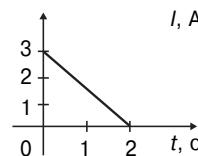
- 55** На рисунке представлен график изменения силы тока с течением времени в катушке индуктивностью $L = 6 \text{ мГн}$. ЭДС самоиндукции равна

Решение:

$$\text{ЭДС самоиндукции: } |\varepsilon_i| = L \cdot \frac{\Delta I_i}{\Delta t}.$$

$$\text{Из графика: } \Delta I_i = 3 \text{ А, } \Delta t = 2 \text{ с.}$$

$$\text{Тогда } |\varepsilon_i| = 6 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \cdot \frac{3 \text{ А}}{2 \text{ с}} = 9 \cdot 10^{-3} \text{ В} = 9 \text{ мВ.}$$

Ответ: $|\varepsilon_i| = 9 \text{ мВ.}$ 

ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ КАТУШКИ С ТОКОМ

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

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

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



Практические задания

- 56** Во сколько раз надо уменьшить индуктивность катушки, чтобы при неизменном значении силы тока в ней энергия магнитного поля катушки уменьшилась в 4 раза?

Дано:

$$I_1 = I_2 = I$$

$$\frac{W_{M1}}{W_{M2}} = 4$$

$$\frac{L_1}{L_2} = ?$$

Решение:

Поскольку энергия магнитного поля прямо пропорциональна индуктивности: $W_M = \frac{L \cdot I^2}{2}$, то индуктивность изменится также, как и энергия, то есть уменьшится в 4 раза.

Ответ: в 4 раза.

- 57** Чему равна индуктивность катушки, если при силе тока $I = 4\text{ A}$ энергия её магнитного поля равна $0,01\text{ Дж}$?

Дано:

$$I = 4\text{ A}$$

$$W_L = 0,01\text{ Дж}$$

$$L = ?$$

Решение:

Энергия магнитного поля: $W_M = \frac{L \cdot I^2}{2}$, откуда $L = \frac{2 \cdot W_M}{I^2}$.

$$L = \frac{2 \cdot 0,01\text{ Дж}}{(4\text{ A})^2} = 1,25 \cdot 10^{-3}\text{ Гн} = 1,25\text{ мГн.}$$

Ответ: $L = 1,25\text{ мГн.}$

- 58** Напряжение на концах первичной обмотки трансформатора (см. рисунок) 127 V , сила тока в ней 1 A . Напряжение на концах вторичной обмотки $12,7\text{ V}$, сила тока в ней 8 A . Каков КПД трансформатора?

Дано:

$$U_1 = 127\text{ В}$$

$$I_1 = 1\text{ А}$$

$$U_2 = 12,7\text{ В}$$

$$I_2 = 8\text{ А}$$

$$\eta = ?$$

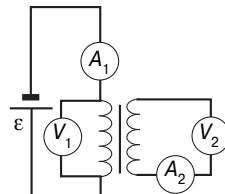
Решение:

Левая катушка (первичная) питается от источника тока; в правой (вторичной) катушке индуцируется ЭДС по закону электромагнитной индукции: $|\varepsilon_i| = |U_2| = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = L \cdot \frac{\Delta I_2}{\Delta t}$.

По закону сохранения энергии, учитывая потери энергии, имеем: $\eta \cdot W_1 = W_2$, или для мощностей: $\eta \cdot P_1 = P_2$, где $W_1 = I_1 \cdot U_1 \cdot t = P_1 \cdot t$ — энергия первичной катушки, P_1 — её мощность; $W_2 = I_2 \cdot U_2 \cdot t = P_2 \cdot t$ — энергия вторичной катушки, P_2 — её мощность.

Тогда КПД трансформатора $\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2}{I_1} \cdot \frac{U_2}{U_1}$.

$$\eta = \frac{8\text{ А}}{1\text{ А}} \cdot \frac{12,7\text{ В}}{127\text{ В}} = 0,8 = 80\%$$

Ответ: $\eta = 80\%$.



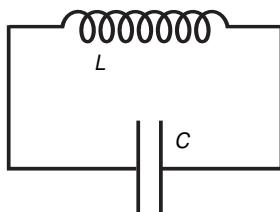
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

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



КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР

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: C — ёмкость конденсатора, L — индуктивность катушки

■ Свободные электромагнитные колебания в идеальном колебательном контуре

Свободные электромагнитные колебания — это периодически по-

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

Для возбуждения колебаний в контуре конденсатор заряжают, сообщая его обкладкам заряды $\pm q_0$. Тогда в начальный момент времени ($t = 0$) между обкладками конденсатора возникает электрическое поле. Вследствие разрядки конденсатора в контуре возникают электромагнитные колебания заряда и силы тока, которые сопровождаются взаимными превращениями электрического и магнитного полей.

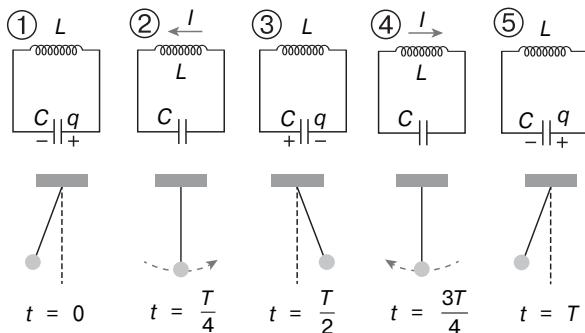
Рассмотрим последовательные стадии колебательного процесса в L - C -контуре.

Свободные электромагнитные колебания возникают в колебательном контуре после однократного подве-

дения энергии. Это можно сделать, зарядив конденсатор от источника.

Свободные колебания, протекающие в колебательном контуре, считаются незатухающими из-за отсутствия у катушки и конденсатора активного сопротивления. Но на самом деле эти элементы обладают хотя

и небольшим, но всё же активным сопротивлением, а поэтому в реальности колебания являются затухающими. Энергия электромагнитного поля переходит также и во внутреннюю энергию проводников диэлектрика, а кроме этого, выделяется в виде джоулевого тепла на активной нагрузке.



Изменение силы тока и заряда конденсатора в течение периода и аналогия с механическими колебаниями:

q — заряд конденсатора, I — сила тока, C — ёмкость конденсатора, L — индуктивность катушки, t — время, T — период колебаний

Стадии колебания (см. рисунок)				
1	2	3	4	5
Время t (с)				
$0+nT$	$\frac{T}{4}+nT$	$\frac{T}{2}+nT$	$\frac{3T}{4}+nT$	$T+nT$
$(n$ — целое число)				
Заряд q на правой обкладке конденсатора (Кл)				
q_0	0	$-q_0$	0	q_0
Сила тока I в катушке (А)				
0	I_{\max}	0	$-I_{\max}$	0
Энергия электрического поля $W_{\text{эл}}$ (Дж)				
$\frac{q_0^2}{2 \cdot C} = \frac{L \cdot I_{\max}^2}{2}$	0	$\frac{q_0^2}{2 \cdot C} = \frac{L \cdot I_{\max}^2}{2}$	0	$\frac{q_0^2}{2 \cdot C} = \frac{L \cdot I_{\max}^2}{2}$

>>>

Стадии колебания (см. рисунок на с. 247)

1	2	3	4	5
Энергия магнитного поля W_m (Дж)				
0	$\frac{q_0^2}{2 \cdot C} = \frac{L \cdot I_{\max}^2}{2}$	0	$\frac{q_0^2}{2 \cdot C} = \frac{L \cdot I_{\max}^2}{2}$	0

**Практические задания**

- 59** Колебательный контур состоит из катушки индуктивности и конденсатора. В нём наблюдаются гармонические электромагнитные колебания с периодом $T = 5$ мс. В начальный момент времени заряд конденсатора максимальен и равен $4 \cdot 10^{-6}$ Кл. Каков будет заряд конденсатора через $t = 2,5$ мс?

Дано:

$$T = 5 \text{ мс} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$$

$$q_{\max} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$$

$$t = 2,5 \text{ мс} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$$

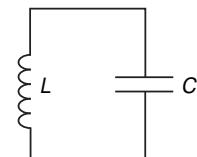
$$q - ?$$

Решение:

Время $t = 2,5$ мс соответствует половине периода $t = 2,5 \text{ мс} = \frac{1}{2}T$. В этот момент конденсатор полностью перезарядился и модуль заряда на его обкладках такой же, как и в начальный момент времени, но знак противоположный, то есть $q = -4 \cdot 10^{-6}$ Кл.

Ответ: $q = -4 \cdot 10^{-6}$ Кл.

- 60** В колебательном контуре (см. рисунок) напряжение между обкладками конденсатора меняется по закону $U_C = U_0 \cos \omega t$, где $U_0 = 5$ В, $\omega = 2000\pi \text{ c}^{-1}$. Определите период колебаний напряжения.

**Решение:**

$$\text{Период колебаний } T = \frac{2\pi}{\omega}.$$

$$T = \frac{2\pi}{2000\pi \text{ c}^{-1}} = 10^{-3} \text{ с} = 1 \text{ мс.}$$

Ответ: $T = 1$ мс.

■ Формула Томсона

Период собственных колебаний T заряда на конденсаторе и силу тока в катушке индуктивности определяет формула Томсона:

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

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

Собственная частота колебаний:

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}.$$

Циклическая (круговая) частота колебаний:

$$\omega = 2\pi \cdot \nu = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}.$$



Важно помнить, что период и частота колебаний определяются только ёмкостью конденсатора и индуктивностью катушки и не зависят от других факторов.

■ Связь амплитуды заряда конденсатора с амплитудой силы тока в колебательном контуре

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

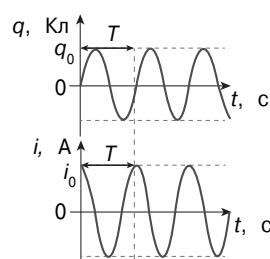
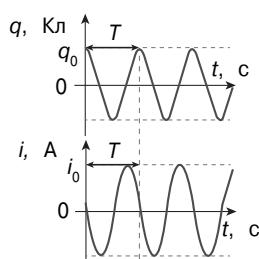
Уравнение колебаний

заряда: $q = q_0 \cos(\omega \cdot t + \phi_0)$,
силы тока: $i = -i_0 \sin(\omega \cdot t + \phi_0)$, причём
 $i = q'(t)$

Уравнение колебаний

заряда: $q = q_0 \sin(\omega \cdot t + \phi_0)$,
силы тока: $i = i_0 \cos(\omega \cdot t + \phi_0)$, причём
 $i = q'(t)$

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



Графики колебаний заряда $q(t)$ конденсатора и силы тока $i(t)$ в катушке:
 q — заряд конденсатора, i — сила тока, t — время, q_0 — амплитуда заряда, T — период соответствующих колебаний



Практические задания

- 61** В наборе радиодеталей для изготовления колебательного контура имеются две катушки с индуктивностями $L_1 = 1 \text{ мкГн}$ и $L_2 = 2 \text{ мкГн}$, а также два конденсатора, ёмкости которых $C_1 = 3 \text{ пФ}$ и $C_2 = 4 \text{ пФ}$. При каком выборе двух элементов период собственных колебаний контура T будет наименьшим? Вычислите его.

Дано:

$$\begin{aligned}L_1 &= 1 \text{ мкГн} = 10^{-6} \text{ Гн} \\L_2 &= 2 \text{ мкГн} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} \\C_1 &= 3 \text{ пФ} = 3 \cdot 10^{-12} \Phi \\C_2 &= 4 \text{ пФ} = 4 \cdot 10^{-12} \Phi \\T &= T_{\min}\end{aligned}$$

$$L_{\min} - ?$$

$$C_{\min} - ?$$

$$T_{\min} - ?$$

Решение:

Поскольку период пропорционален корню из произведения индуктивности катушки на ёмкость конденсатора, то период собственных колебаний контура T будет наименьшим при наименьших значениях индуктивности и ёмкости, то есть при $L_1 = 1 \text{ мкГн} = 10^{-6} \text{ Гн}$, $C_1 = 3 \text{ пФ} = 3 \cdot 10^{-12} \Phi$:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{10^{-6} \text{ Гн} \cdot 3 \cdot 10^{-12} \Phi} \approx 1,08 \cdot 10^{-8} \text{ с} \approx 11 \text{ нс.}$$

Ответ: $T_{\min} \approx 11 \text{ нс.}$

- 62** В таблице показано, как менялся ток в катушке колебательного контура. Вычислите по этим данным ёмкость конденсатора, если индуктивность катушки равна 4 мГн.

$t, 10^{-6} \text{ с}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I, 10^{-3} \text{ А}$	4	2,83	0	-2,83	-4	-2,83	0	2,83	4	2,83

Решение:

Из таблицы определим период колебаний в контуре: $T = 8 \cdot 10^{-6} \text{ с}$.

Тогда из формулы Томсона $T = 2\pi \cdot \sqrt{LC}$ получим: $C = \frac{T^2}{4\pi^2 \cdot L}$.

$$C = \frac{(8 \cdot 10^{-6} \text{ с})^2}{4\pi^2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}} = 4 \cdot 10^{-10} \Phi.$$

Ответ: $C = 4 \cdot 10^{-10} \Phi$.

- 63** В таблице показано, как менялся ток в катушке идеального колебательного контура при свободных колебаниях. Вычислите по этим данным максимальный заряд конденсатора.

$T, 10^{-6}$ с	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I, 10^{-3}$ А	4	2,83	0	-2,83	-4	-2,83	0	2,83	4	2,83

Дано:

$$T = 8 \cdot 10^{-6} \text{ с}$$

$$I_{\max} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ А}$$

$$q_{\max} - ?$$

Решение:

Составим уравнение колебаний силы тока:

$$i = I_{\max} \cos \omega \cdot t = I_{\max} \cos \frac{2\pi}{T} \cdot t = q'(t),$$

где $q'(t)$ — производная заряда конденсатора. Подставляя данные, получим:

$$i = 4 \cdot 10^{-3} \cos \frac{2\pi}{8 \cdot 10^{-6}} \cdot t = 4 \cdot 10^{-3} \cos(2,5 \cdot 10^5 \pi \cdot t).$$

Найдём первообразную уравнения, получим уравнение заряда:

$$q = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{2,5 \cdot 10^{-5}} \sin(2,5 \cdot 10^5 \pi \cdot t) = 5,1 \cdot 10^{-9} \sin(2,5 \cdot 10^5 \pi \cdot t),$$

откуда видим максимальное значение заряда:

$$q_{\max} = 5,1 \cdot 10^{-9} \text{ Кл.}$$

Ответ: $q_{\max} = 5,1 \cdot 10^{-9}$ Кл.

- 64** В идеальном колебательном контуре происходят свободные электромагнитные колебания. В таблице показано, как изменялся заряд конденсатора в колебательном контуре с течением времени.

$t, 10^{-6}$ с	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$q, 10^{-9}$ Кл	2	1,42	0	-1,42	-2	-1,42	0	1,42	2

Вычислите по этим данным максимальное значение силы тока в катушке. Ответ выразите в мА, округлив его до десятых.

Дано:

$$T = 8 \cdot 10^{-6} \text{ с}$$

$$q_{\max} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$I_{\max} - ?$$

Решение:

В начальный момент заряд имеет максимальное значение, а значит, уравнение заряда будет иметь вид: $q = q_{\max} \sin \frac{2\pi}{T} \cdot t$.

Поскольку сила тока $i(t) = q'(t)$ — производная заряда конденсатора, тогда

$$i = \frac{2\pi}{T} \cdot q_{\max} \cos \frac{2\pi}{T} \cdot t = I_{\max} \cos \frac{2\pi}{T} \cdot t.$$

Отсюда максимальное значение силы тока в катушке: $I_{\max} = \frac{2\pi}{T} \cdot q_{\max}$.

$$I_{\max} = \frac{2\pi}{8 \cdot 10^{-6} \text{ с}} \cdot 2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ А} = 1,6 \text{ мА.}$$

Ответ: $I_{\max} = 1,6 \text{ мА.}$

■ Закон сохранения энергии в колебательном контуре

Полная энергия в контуре определяется начальной энергией электрического поля конденсатора:

$$W = W_{\text{эл}} = \frac{q_0^2}{2 \cdot C}.$$

При этом выполняется закон сохранения энергии:

$$W_{\text{полная}} = W_{\text{эл max}} = W_{\text{м max}} = \frac{q_{\max}^2}{2 \cdot C} =$$

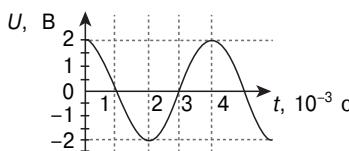
$$= \frac{L \cdot I_{\max}^2}{2} = \frac{q^2}{2 \cdot C} + \frac{L \cdot i^2}{2},$$

где q — мгновенное значение заряда конденсатора, q_{\max} — амплитудное значение электрического заряда, i — мгновенное значение силы тока, I_{\max} — амплитудное значение силы тока, $W_{\text{полная}}$ — полная энергия

в контуре, $W_{\text{эл max}}$ — максимальное значение энергии электрического поля, $W_{\text{м max}}$ — максимальное значение энергии магнитного поля, C — ёмкость конденсатора, L — индуктивность катушки.

✓ Напряжение на клеммах конденсатора в колебательном контуре меняется с течением времени согласно графику. Какое преобразование энергии происходит в контуре в промежутке от $2 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ до $3 \cdot 10^{-3} \text{ с}$?

Ответ: энергия электрического поля конденсатора преобразуется в энергию магнитного поля катушки.

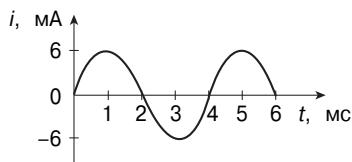




Практические задания

65

На рисунке приведён график зависимости силы тока от времени в колебательном контуре, образованном конденсатором и катушкой, индуктивность которой равна 0,3 Гн. Чему равно максимальное значение энергии электрического поля конденсатора?



Дано:

$$T = 4 \cdot 10^{-3} \text{ с}$$

$$L = 0,3 \text{ Гн}$$

$$I_{\max} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ А}$$

$$W_{\max} — ?$$

Решение:

Максимальное значение энергии равно:

$$W_{\max} = W_{\text{полная}} = W_{\text{эл max}} = W_{\text{м max}} = \frac{L \cdot I_{\max}^2}{2},$$

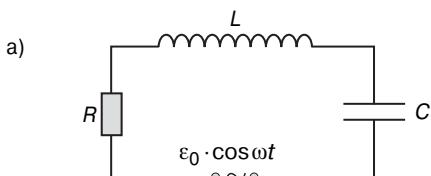
где I_{\max} — амплитудное значение силы тока, $W_{\text{полная}}$ — полная энергия в контуре, $W_{\text{эл max}}$ — максимальное значение энергии электрического поля, $W_{\text{м max}}$ — максимальное значение энергии магнитного поля, L — индуктивность катушки.

$$W_{\max} = \frac{0,3 \text{ Гн} \cdot (6 \cdot 10^{-3} \text{ А})^2}{2} = 5,4 \cdot 10^{-6} \text{ Дж.}$$

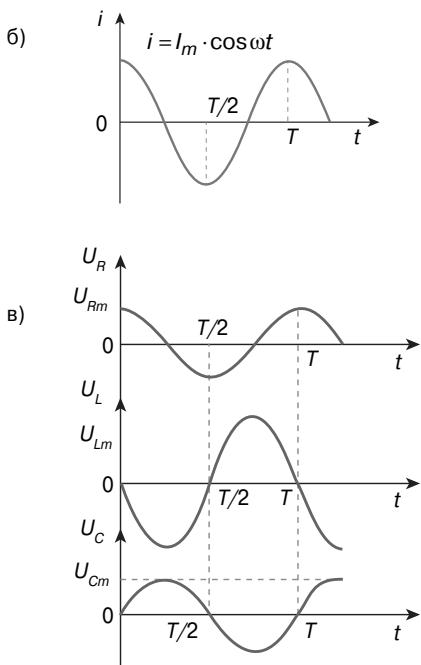
Ответ: $W_{\max} = 5,4 \cdot 10^{-6} \text{ Дж.}$

ВЫНУЖДЕННЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

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



Вынужденные колебания в контуре:
a) схема включения



Вынужденные колебания в контуре:

- б) график изменения силы тока; в) графики напряжений на резисторе U_{Rm} , катушке индуктивности U_{Lm} и конденсаторе U_{Cm} .
 R — сопротивление резистора, C — ёмкость конденсатора, L — индуктивность катушки, $\varepsilon_0 \cdot \cos \omega t$ — уравнение колебаний источника, T — период колебаний, t — время

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

■ Резонанс

Явление возрастания амплитуды колебаний тока при совпадении частоты ω колебаний внешнего источника с собственной частотой ω_0 электрической цепи называется **электрическим резонансом**.

При резонансе сила тока I_p :

$$I_p = \frac{\varepsilon_{\max}}{R} = \frac{\varepsilon_{\max}}{\sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}},$$

где I_p — резонансное значение силы тока, ε_{\max} — максимальное значение ЭДС источника, R — активное сопротивление, L — индуктивность катушки, C — ёмкость конденсатора, ω — циклическая частота колебаний.

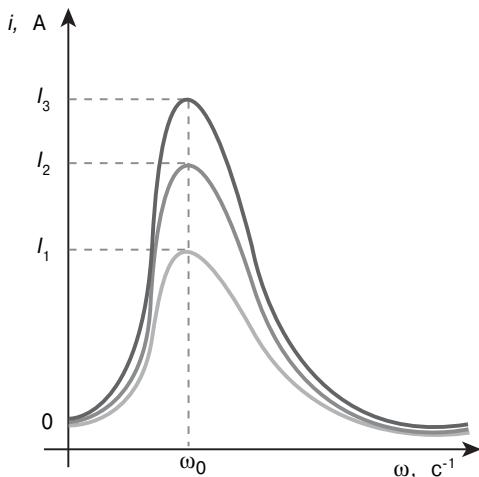


График резонанса:

$\frac{U_C}{\varepsilon_0} = I_p$ — резонансная сила тока, ω — циклическая частота контура, ω_0 — резонансная частота, Q_1, Q_2, Q_3 — значения резонансной силы тока для различных контуров

Условие резонанса:

$$\sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2} = \min, \text{ откуда}$$

$$\omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C}, \text{ или } \omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}.$$



Практические задания

66

В двух идеальных колебательных контурах происходят незатухающие электромагнитные колебания. Максимальное значение заряда конденсатора во втором контуре равно 6 мкКл . Амплитуда колебаний силы тока в первом контуре в 2 раза меньше, а период его колебаний в 3 раза меньше, чем во втором контуре. Определите максимальное значение заряда конденсатора в первом контуре.

Дано:

$$q_{\max 2} = 6 \text{ мкКл} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$$

$$\frac{i_{\max 2}}{i_{\max 1}} = 2$$

$$\frac{T_2}{T_1} = 3$$

$$q_{\max 1} — ?$$

Решение:

Составим уравнение колебаний заряда для обоих контуров:

$$\begin{cases} q_1 = q_{\max 1} \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{T_1} \cdot t\right) \\ q_2 = q_{\max 2} \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{T_2} \cdot t\right) \end{cases}$$

Поскольку сила тока есть производная заряда конденсатора $i = q'(t)$, то уравнение для силы тока в обоих контурах:

$$\begin{cases} i_1 = -\frac{2 \cdot \pi}{T_1} \cdot q_{\max 1} \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{T_1} \cdot t\right) = i_{\max 1} \sin\left(\frac{2\pi}{T_1} \cdot t\right) \\ i_2 = -\frac{2 \cdot \pi}{T_2} \cdot q_{\max 2} \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{T_2} \cdot t\right) = i_{\max 2} \sin\left(\frac{2\pi}{T_2} \cdot t\right) \end{cases}$$

Разделив второе уравнение на первое, получим: $\frac{i_2}{i_1} = \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{q_{\max 2}}{q_{\max 1}} = \frac{i_{\max 2}}{i_{\max 1}}$.

Тогда максимальное значение заряда:

$$q_{\max 1} = \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{i_{\max 1}}{i_{\max 2}} \cdot q_{\max 2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3} \cdot 6 \cdot 10^{-6} \text{ Кл} = \\ = 10^{-6} \text{ Кл} = 1 \text{ мкКл.}$$

Ответ: $q_{\max 1} = 1 \text{ мкКл.}$

67

Последовательно соединены конденсатор, катушка индуктивности и резистор. Если при неизменной частоте и амплитуде напряжения на концах цепи увеличивать ёмкость конденсатора от 0 до ∞ , то амплитуда тока в цепи будет

- | | |
|-------------------------|--------------------------------------|
| 1) монотонно убывать | 3) сначала возрастать, затем убывать |
| 2) монотонно возрастать | 4) сначала убывать, затем возрастать |

Решение:

$$\text{По закону Ома } I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}},$$

где R — активное сопротивление цепи, $X_L = \omega \cdot L$ — индуктивное сопротивление, $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$ — ёмкостное сопротивление, I — сила тока,

U — напряжение на источнике, ω — циклическая частота контура.

Если при неизменной частоте и амплитуде напряжения на концах цепи увеличивать ёмкость конденсатора от 0 до ∞ , то выражение, стоящее в скобках $\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}$, будет уменьшаться. При этом сила тока будет увеличиваться до максимального значения (резонансного) и будет выполняться условие: $\frac{1}{\omega \cdot C} = \omega \cdot L$. При дальнейшем увеличении ёмкости выражение $\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}$ снова станет отличным от нуля и начнёт увеличиваться, поэтому сила тока будет уменьшаться.

Ответ: 3.

ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

Переменный ток — электрический ток, который с течением времени изменяется по величине и направлению или, в частном случае, по величине, сохраняя своё направление в электрической цепи неизменным. Величина переменного тока, соответствующая данному моменту, называется **мгновенным значением переменного тока** i . Максимальное мгновенное значение пере-

менного тока, которого он достигает в процессе своего изменения, называется **амплитудой тока** I_{\max} . Электрические цепи, в которых происходят установившиеся вынужденные колебания под действием периодического источника тока, называются **цепями переменного тока**, напряжение которого изменяется по периодическому закону:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{\max} \cdot \cos(\omega \cdot t).$$

■ Выражения для напряжения и силы тока на элементах цепи

На резисторе	На катушке индуктивности	На конденсаторе
Сила тока		
$i = I_{\max} \cos \omega t = I_{\max} \cos \frac{2\pi}{T} \cdot t = q'(t)$		
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		
$R = \frac{U_{R\max}}{I_{\max}}$	$X_L = \omega \cdot L$	$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$

Для всех элементов	
Сила тока	$i = I_{\max} \cos \omega t = I_{\max} \cos \frac{2\pi}{T} \cdot t = q'(t)$
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	$Z = \frac{U_{\max}}{I_{\max}} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$

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

Действующее значение силы переменного тока I_d равно силе такого постоянного тока, при котором

в проводнике выделяется то же количество теплоты, что и при переменном токе за то же время:

$I_d = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}$, где I_{\max} — максимальное значение силы переменного тока.

Действующее значение напряжения:

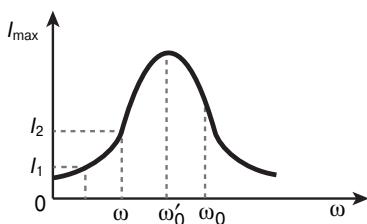
$$U_d = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}, \text{ где } U_{\max} — \text{ максимальное значение напряжения.}$$

Мощность P_R в цепи переменного тока выделяется только на активном сопротивлении: $P_R = I_d \cdot U_d$. Средняя мощность переменного тока на конденсаторе и катушке индуктивности равна нулю.

✓ За счёт переменной ёмкости конденсатора работают все радиоприёмники. Если электроёмкость C конденсатора колебательного контура плавно менять от минимального значения C_{\min} до максимального C_{\max} , то амплитуда силы тока I_2 сначала возрастает до некоторого максимального значения I_{\max} (на ре-

зонарной частоте $\frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega'_0$), а за-

тем начинает убывать (см. рисунок).



■ Производство, передача и потребление электрической энергии

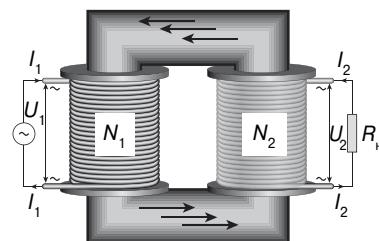
Для производства электроэнергии используются **генераторы** пере-

менного тока (принцип действия основан на явлении электромагнитной индукции).

Необходимость в передаче электроэнергии на большие расстояния возникает из-за удалённости источников энергии (ГЭС, ГРЭС, ТЭЦ и т. д.) и потребителя (дома, предприятия и т. п.). При большой длине линии электропередачи её электрическое сопротивление становится значительным, что приводит к существенным потерям передаваемой мощности.

Уменьшение потерь мощности в линиях электропередачи (ЛЭП) достигается за счёт повышения передаваемого напряжения с помощью трансформаторов, которые изменяют напряжение в нескольких точках линии.

Трансформатор — устройство, применяемое для повышения или понижения переменного напряжения.



Принципиальная схема трансформатора, подключённого к нагрузке.

Первичная обмотка (число витков N_1) с силой тока I_1 подключается к источнику переменного напряжения U_1 . Вторичная обмотка (число витков N_2), по которой течёт ток I_2 с напряжением U_2 , подключается к нагрузке (сопротивлению R_H).

Трансформатор состоит из магнитно-мягкого стального сердечника, на который надеты две катушки с проволочными обмотками.

Принцип действия основан на явлении электромагнитной индукции.

Коэффициент $K = \frac{N_2}{N_1}$ — коэффициент трансформации.

При $K > 1$ трансформатор называется повышающим, при $K < 1$ — понижающим.



Практические задания

- 68** Ёмкость конденсатора, включённого в цепь переменного тока, равна 6 мкФ. Уравнение колебаний напряжения на конденсаторе имеет вид: $U = 50 \cdot \cos(1 \cdot 10^3 t)$, где все величины выражены в СИ. Найдите амплитуду силы тока.

Дано:

$$C = 6 \cdot 10^{-6} \Phi$$

$$U = 50 \cdot \cos(1 \cdot 10^3 t)$$

$$I_{\max} — ?$$

Решение:

По закону Ома $I_{\max} = \frac{U_{\max}}{X_C}$,

где $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$ — ёмкостное сопротивление цепи,

$\omega = 1 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ — циклическая частота колебаний, в уравнении стоит под знаком косинуса.

Тогда $I_{\max} = \omega \cdot C \cdot U_{\max}$.

$$I = 1 \cdot 10^3 \cdot 6 \cdot 10^{-6} \cdot 50 = 0,3 \text{ А.}$$

Тогда амплитуда силы тока $I_{\max} = 0,3 \text{ А.}$

Ответ: $I_{\max} = 0,3 \text{ А.}$

- 69** Напряжения на концах первичной и вторичной обмоток ненагруженного трансформатора $U_1 = 220 \text{ В}$ и $U_2 = 11 \text{ В}$. Каково отношение числа витков в первичной обмотке к числу витков во вторичной?

Дано:

$$U_1 = 220 \text{ В}$$

$$U_2 = 11 \text{ В}$$

$$\frac{N_1}{N_2} — ?$$

Решение:

По свойству трансформатора напряжение на катушке прямо пропорционально числу витков, так как $|\varepsilon_i| = |U| = N \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$.

$$\text{Тогда } \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220 \text{ В}}{11 \text{ В}} = 20.$$

Ответ: $\frac{N_1}{N_2} = 20$.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Электромагнитная волна — возмущение электромагнитного поля, распространяющееся в пространстве. Излучение электромагнитных волн возникает при ускоренном движении электрических зарядов. В электромагнитной волне происходят взаимные превращения электрического и магнитного полей. Длина волны λ — кратчайшее расстояние между двумя возмущениями, колеблющимися в одинаковой фазе:

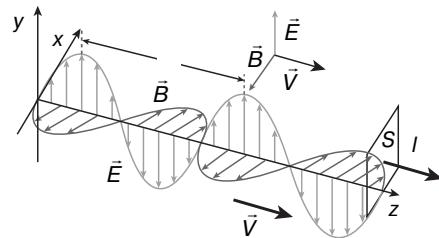
$$\lambda = V \cdot T = \frac{V}{v},$$

где $V = \frac{c}{n}$ — скорость распространения волны, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в вакууме, n — показатель преломления среды, T — период волны, v — частота волны.

■ Взаимная ориентация векторов в электромагнитной волне в вакууме

Электромагнитные волны поперечны — векторы \vec{E} (напряжённость электрического поля) и \vec{B} (напряжённость магнитного поля) перпендикулярны друг другу и лежат в плоскости, перпендикулярной направлению скорости \vec{V} распространения волны:

$$\vec{E} \perp \vec{B} \perp \vec{V}.$$



Синусоидальная (гармоническая) электромагнитная волна:

\vec{E} — напряжённость электрического поля, \vec{B} — напряжённость магнитного поля, \vec{V} — скорость распространения электромагнитной волны

✓ Параллельно какой координатной оси бежит плоская электромагнитная волна, если в некоторый момент времени в точке с координатами (x, y, z) напряжённость электрического поля $E = (E, 0, 0)$, а индукция магнитного поля $B = (0, 0, B)$?

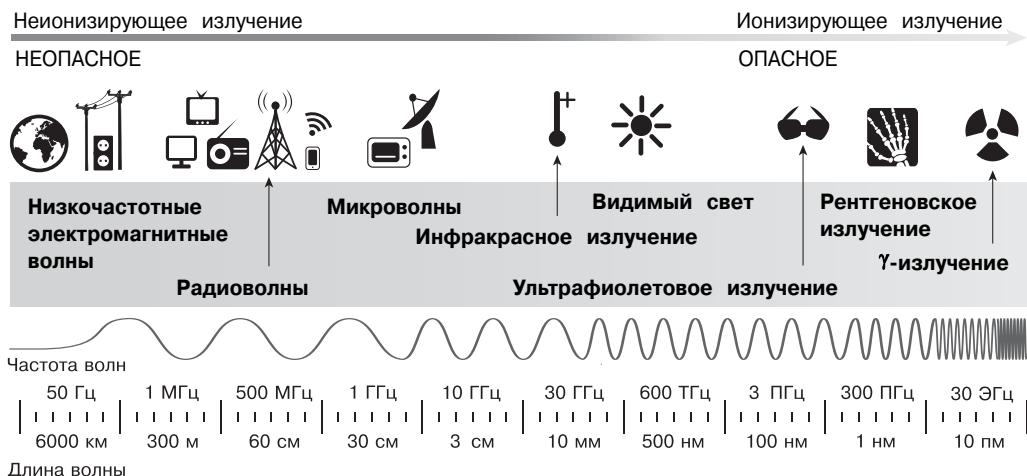
Ответ: напряжённость электрического поля \vec{E} направлена вдоль оси OX , индукция магнитного поля \vec{B} — вдоль оси OZ , значит, вдоль оси OY направлена скорость распространения волны \vec{V} .

■ Шкала электромагнитных волн

Важнейшая характеристика электромагнитных волн — **частота** v (период T), так как именно она остаётся постоянной при переходе волн

ны из одной среды в другую, например из воздуха в воду. По возрастанию частоты построена

шкала электромагнитных волн (спектр электромагнитного излучения).



Шкала электромагнитных волн

■ Применение электромагнитных волн в технике и быту

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. В авиации и наземном транспорте часто используется частота 400 Гц, которая даёт преимущества по весу электрических машин и трансформаторов в 8 раз по сравнению с частотой 50 Гц. В импульсных источниках питания

последних поколений используются частоты трансформирования переменного тока в единицы и десятки кГц, что делает их компактными, энергонасыщенными.

Радиоволны

$$100 \text{ кГц} \leq \nu \leq 300 \text{ ГГц}, 1 \text{ мм} \leq \lambda \leq 3 \text{ км}$$

Название определяет их назначение: на этих волнах работает радио- и телевещание, а также радиолокация. Их излучают и принимают антенны. Различают сверхдлинные волны ($\nu \leq 300 \text{ кГц}, \lambda \geq 3 \text{ км}$); ДВ — длинные ($30 \text{ кГц} < \nu \leq 300 \text{ кГц}, 300 \text{ м} \leq \lambda < 3 \text{ км}$); СВ — средние ($300 \text{ кГц} < \nu \leq 3 \text{ МГц}, 100 \text{ м} \leq \lambda < 300 \text{ м}$); КВ — короткие ($3 \text{ МГц} < \nu \leq 30 \text{ МГц}, 10 \text{ м} \leq \lambda < 100 \text{ м}$); УКВ — ультракороткие ($\nu > 30 \text{ МГц}, \lambda < 10 \text{ м}$).

Каждая из перечисленных групп радиоволн применяется для решения ряда технических задач. Так, подводная и подземная радиосвязь возможна лишь на сверхдлинных волнах, телевидение и радиолокация — исключительно на ультракоротких.

Оптическое излучение

$$1,5 \cdot 10^{14} \text{ Гц} \leq v \leq 3 \cdot 10^{16} \text{ Гц}; \\ 2 \text{ мкм} \leq \lambda < 10 \text{ нм}$$

- Инфракрасное (тепловое) излучение (ИК)

$$3 \cdot 10^{12} \text{ Гц} \leq v \leq 3 \cdot 10^{14} \text{ Гц}; \\ 400 \text{ нм} \leq \lambda < 2 \text{ мкм};$$
- световое излучение

$$3 \cdot 10^{14} \text{ Гц} \leq v \leq 7,5 \cdot 10^{14} \text{ Гц}; \\ 400 \text{ нм} \leq \lambda < 760 \text{ нм};$$
- ультрафиолетовое излучение (УФ)

$$7,5 \cdot 10^{14} \text{ Гц} \leq v \leq 10^{16} \text{ Гц}; \\ 10 \text{ нм} \leq \lambda < 400 \text{ нм}.$$

Инфракрасное — это тепловое излучение. Оно невидимо для человека, но ощущается как тепло. Например, радиаторы отопления или обычная грелка излучают инфракрасные волны; человеческое тело тоже является источником инфракрасных волн.

Световое излучение (видимый свет) — это та часть электромагнитных волн, на которые реагируют человеческие глаза. На разные частоты глаза реагируют по-разному. При этом мы выделяем семь основных цветов (цвета радуги), которые соответствуют семи группам частот: красный, оранжевый, жёлтый, зелёный, голубой, синий, фиолетовый.

Ультрафиолетовое излучение также может восприниматься человеком. Оно проявляется как загар, то есть на данный вид излучения реагируют не глаза, а кожа. Это происходит из-за достаточно высокой энергетичности волны. Такая особенность ультрафиолетовых волн позволяет использовать излучение в лампах для создания искусственного загара и для дезинфекции в медицинских учреждениях.

Рентгеновские лучи

$$v > 10^{16} \text{ Гц}; 10^{-3} \text{ нм} \leq \lambda < 50 \text{ нм}$$

Из-за высокой проникающей способности и не очень большой опасности (левая часть участка диапазона) рентгеновские лучи используют для различных исследований, в том числе и человеческого организма, например в микроскопии, дефектоскопии и медицине (рентгеновский томограф).

Гамма-лучи $\lambda \approx 10^{-6} \text{ нм}$

Обладают очень высокой проходимостью и несут огромную энергию.

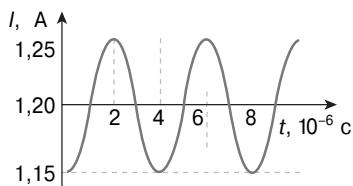
Области применения гамма-излучения:

- гамма-дефектоскопия, контроль изделий просвечиванием γ -лучами;
- консервирование пищевых продуктов;
- гамма-стерилизация специй, зерна, рыбы, мяса и других продуктов для увеличения срока хранения;
- стерилизация медицинских материалов и оборудования;
- лучевая терапия;
- уровнемеры и т. д.



Практические задания

- 70** На рисунке показан график колебаний силы тока в колебательном контуре с антенной. Определите длину электромагнитной волны, излучаемой антенной.



Дано:

$$I_{\max} = 1,25 \text{ А}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$T = 4 \cdot 10^{-6} \text{ с}$$

$\lambda — ?$

Решение:

По формуле длины волны

$$\lambda = c \cdot T.$$

$$\lambda = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \cdot 4 \cdot 10^{-6} \text{ с} = 1,2 \cdot 10^3 \text{ м.}$$

Ответ: $\lambda = 1,2 \cdot 10^3 \text{ м.}$

- 71** Электромагнитная волна возбуждается источником, период колебаний которого $4,89 \cdot 10^{-11} \text{ с}$. Определите длину этой волны в сероуглероде. Показатель преломления сероуглерода 1,63. Ответ выразите в мм.

Дано:

$$T = 4,89 \cdot 10^{-11} \text{ с}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$n = 1,63$$

$\lambda_c — ?$

Решение:

По формуле длины волны

$$\lambda_c = V_c \cdot T, \text{ где } V_c = \frac{c}{n} \text{ — скорость волны в сероуглероде.}$$

$$\text{Тогда } \lambda_c = \frac{c}{n} \cdot T.$$

$$\lambda_c = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{1,63} \cdot 4,89 \cdot 10^{-11} \text{ с} = 0,009 \text{ м} = 9 \text{ мм.}$$

Ответ: $\lambda_c = 9 \text{ мм.}$

- 72** Индуктивность катушки колебательного контура радиоприёмника $L = 2 \text{ мкГн}$, максимальный ток в ней $I_{\max} = 2 \text{ мА}$. В контуре используется плоский воздушный конденсатор, расстояние между пластинами которого $d = 2 \text{ мм}$. Максимальная напряжённость электрического поля конденсатора $E_{\max} = 2,5 \text{ В/м}$. На какую длину волны настроен контур?

Дано:

$$\begin{aligned}L &= 2 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} \\I_{\max} &= 2 \cdot 10^{-3} \text{ А} \\d &= 2 \cdot 10^{-3} \text{ м} \\E_{\max} &= 2,5 \text{ В/м} \\c &= 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}\end{aligned}$$

 $\lambda - ?$ **Решение:**

Длина волны колебательного контура: $\lambda = c \cdot T$,
где период по формуле Томсона: $T = 2\pi \cdot \sqrt{LC}$.

Ёмкость конденсатора: $C = \frac{q_{\max}}{U_{\max}} = \frac{q_{\max}}{E_{\max} \cdot d}$, тогда

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{L \cdot q_{\max}}{E_{\max} \cdot d}}, \text{ а длина волны: } \lambda = 2 \cdot \pi \cdot c \cdot \sqrt{\frac{L \cdot q_{\max}}{E_{\max} \cdot d}}.$$

По закону сохранения энергии $\frac{q_{\max}^2}{2 \cdot C} = \frac{L \cdot I_{\max}^2}{2}$, откуда

$$q_{\max} = \sqrt{L \cdot C} \cdot I_{\max} = \sqrt{\frac{L \cdot q_{\max}}{E_{\max} \cdot d}} \cdot I_{\max}.$$

Преобразовывая последнее равенство, выразим из

$$\text{него } q_{\max}: q_{\max} = \frac{L}{E_{\max} \cdot d} \cdot I_{\max}^2.$$

Тогда длина волны будет равна:

$$\lambda = 2 \cdot \pi \cdot c \cdot \sqrt{\frac{\frac{L}{E_{\max} \cdot d} \cdot I_{\max}^2}{E_{\max} \cdot d}} = 2 \cdot \pi \cdot c \cdot \frac{L \cdot I_{\max}}{E_{\max} \cdot d}.$$

$$\lambda = 2 \cdot \pi \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \text{ А}}{2,5 \text{ В/м} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}} = 1,5 \cdot 10^3 \text{ м} = 1,5 \text{ км.}$$

Ответ: $\lambda = 1,5 \text{ км.}$

73 Выберите среди приведённых примеров электромагнитные волны с минимальной частотой.

- 1) инфракрасное излучение Солнца
- 2) ультрафиолетовое излучение Солнца
- 3) излучение γ -радиоактивного препарата
- 4) излучение антенны радиопередатчика

Ответ: 4.

74 В каком излучении энергия фотонов имеет наименьшее значение?

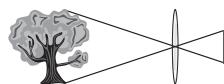
- | | |
|---------------------|-----------------|
| 1) рентгеновском | 3) видимом |
| 2) ультрафиолетовом | 4) инфракрасном |

Ответ: 4.



ОПТИКА

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



Учение о свете принято делить на три части.

1. Геометрическая или лучевая оптика, в основе которой лежит представление о световых лучах. Изучает законы распространения света в прозрачных средах.

2. Волновая оптика, изучающая явления, в которых проявляются волновые свойства света.

3. Квантовая оптика, изучающая взаимодействие света с веществом, при котором проявляются корпускулярные свойства света.

ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА

Луч — вектор, перпендикулярный фронту волны, показывающий направление переноса энергии волны в данной точке.

Закон прямолинейного распространения света. В оптически однородной среде свет распространяется прямолинейно.

Опытные доказательства: 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.



Практические задания

75

Маленькая лампочка в непрозрачном конусообразном абажуре освещает стол. Лампочка расположена в вершине конуса на высоте 1 м над поверхностью стола; угол при вершине конуса равен 60° . Каков радиус освещённого круга на столе?

- 1) $\frac{1}{\sqrt{3}}$ м
- 2) 0,5 м
- 3) $\sqrt{3}$ м
- 4) $\frac{\sqrt{3}}{2}$ м

Дано:

$$h = 1 \text{ м}$$

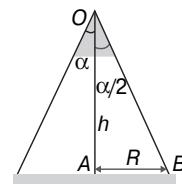
$$\alpha = 60^\circ$$

R — ?**Решение:**

Сделаем рисунок.

Радиус освещённого круга на столе найдём из прямоугольного треугольника OAB , в котором угол при вершине:

$$\beta = \frac{\alpha}{2} = \frac{60^\circ}{2} = 30^\circ.$$

Тогда $R = AB = h \cdot \operatorname{tg} \beta = 1 \text{ м} \cdot \operatorname{tg} 30^\circ = \frac{1}{\sqrt{3}} \text{ м.}$ **Ответ:** 1.**76**

К потолку комнаты высотой 4 м прикреплена люминесцентная лампа длиной 2 м. На высоте 2 м от пола параллельно ему расположен круглый непрозрачный диск диаметром 2 м. Центр лампы и центр диска лежат на одной вертикали. Найдите минимальный линейный размер тени.

Дано:

$$H = 4 \text{ м}$$

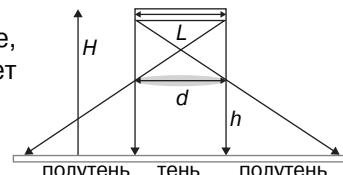
$$l = 2 \text{ м}$$

$$h = 2 \text{ м}$$

$$d = 2 \text{ м}$$

a — ?**Решение:**

Сделаем рисунок.

Область тени показана на рисунке, то есть линейный размер тени будет равен: $a = l = d = 2 \text{ м.}$ **Ответ:** $a = 2 \text{ м.}$ 

ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА

Угол падения волны — угол между падающим лучом и перпендикуляром к границе раздела двух сред в точке падения.

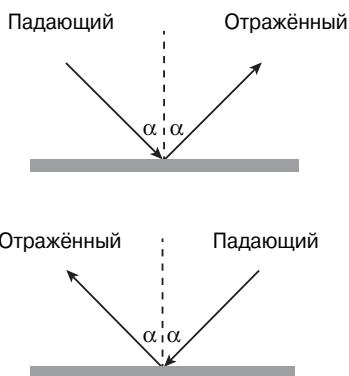
Угол отражения волны — угол между отражённым лучом и перпендикуляром к отражающей поверхности.

Закон отражения. Угол отражения равен углу падения. Падающий луч,

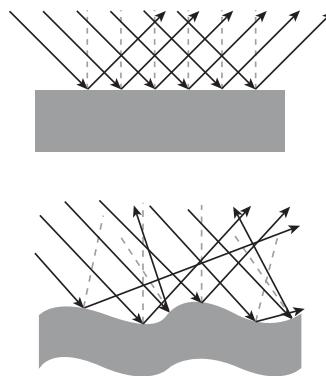
отражённый луч и перпендикуляр, восстановленный в точке падения к отражающей поверхности, лежат в одной плоскости.

В случае зеркального отражения (от абсолютно гладкой поверхности) отражённые лучи параллельны.

В случае диффузного отражения (от неровной поверхности) направление отражённых лучей различно.



Падающий и отражённый лучи. Обратимость световых лучей: α — угол падения и отражения



Ход лучей при зеркальном (сверху) и диффузном (снизу) отражении

ПОСТРОЕНИЕ 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).

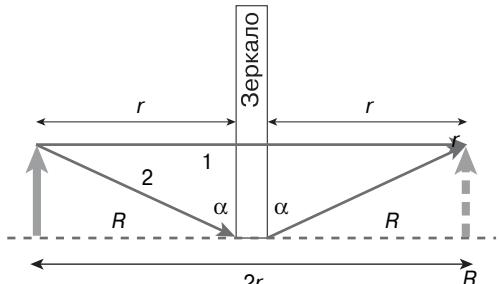
Луч 1, перпендикулярный плоскости зеркала, не преломляется. Расстояние от точки до зеркала равно расстоянию от изображения до зеркала — r .

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.



Ход лучей при построении изображений в плоском зеркале

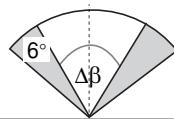


Практические задания

- 77** Угол между плоским зеркалом и падающим лучом света увеличили на 6° . Как изменится угол между падающим и отражённым от зеркала лучами?

Решение:

Сделаем рисунок.



По закону отражения угол между плоским зеркалом и отражённым лучом также увеличится на 6° (см. рисунок). Тогда угол между падающим и отражённым от зеркала лучами уменьшится на 12° .

Ответ: уменьшится на 12° .

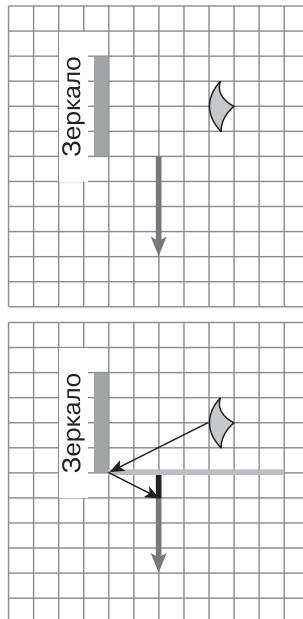
- 78** Какая часть изображения стрелки (см. рисунок) в зеркале видна глазу?

Решение:

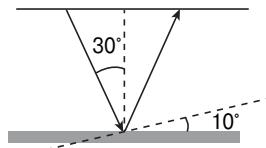
Сделаем рисунок. Построим луч, падающий на край зеркала; отражённый луч построим по клеткам.

По построению видно, что будет видна только $\frac{1}{4}$ часть стрелки.

Ответ: 0,25.



- 79** Угол падения света на горизонтально расположенное плоское зеркало равен 30° . Каким будет угол отражения света, если повернуть зеркало на 10° так, как показано на рисунке?

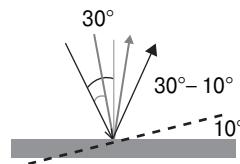


Решение:

Сделаем рисунок.

Если повернуть зеркало на 10° , то перпендикуляр повернётся вместе с зеркалом. Тогда угол падения станет равен 20° , а значит, по закону отражения и угол отражения света станет равен 20° .

Ответ: 20° .



ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА

Преломление — изменение направления распространения волны при переходе из одной среды в другую. Преломление вызвано тем, что скорости распространения волн в этих средах различны.

Абсолютный показатель преломления среды n — физическая величина, равная отношению скорости света c в вакууме к скорости света V в данной среде:

$$n = \frac{c}{V}.$$

Оптически более плотная среда — среда с большим показателем преломления, оптически менее плотная среда — среда с меньшим показателем преломления.

Относительный показатель преломления среды n — физическая величина, равная отношению скоростей света в этих средах:

$$n_{21} = \frac{V_1}{V_2},$$

где V_1 — скорость света в первой среде, V_2 — скорость света во второй среде.

Угол преломления — угол между преломлённым лучом и перпендикуляром к границе раздела, восстановленным в точке падения.

■ Закон преломления света

Падающий и преломлённый лучи, а также перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, **лежат в одной плоскости**.

Отношение синуса угла падения α к синусу угла преломления β есть величина, постоянная для двух данных сред:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{21} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{n_1}{n_2},$$

где n_{21} — относительный показатель

преломления, V_1 — скорость света в первой среде, V_2 — скорость света во второй среде, n_1 — абсолютный показатель преломления

первой среды, n_2 — абсолютный показатель преломления второй среды.



Практические задания

80

Пучок света переходит из воды в воздух. Частота световой волны — v , длина световой волны в воде — λ , показатель преломления воды относительно воздуха — n . Установите соответствие между физическими величинами и формулами, по которым их можно рассчитать. Подберите к каждой букве соответствующую цифру.

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

- А) скорость света в воздухе
Б) скорость света в воде

1) $\lambda \cdot v$

2) $\frac{\lambda}{v}$

3) $\lambda \cdot v \cdot n$

4) $\frac{\lambda \cdot n}{v}$

ФОРМУЛЫ

Дано: v $\lambda_v = \lambda$ n $c - ?$ $V - ?$ **Решение:**

Зная длину волны в воде, найдём скорость света в воде:

$$\lambda = \frac{V}{v} \Rightarrow V = \lambda \cdot v \text{ — соответствует формуле 1.}$$

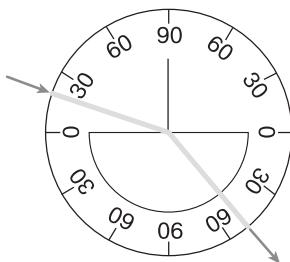
Из определения показателя преломления

$$n = \frac{c}{V} \Rightarrow c = n \cdot V = n \cdot \lambda \cdot v \text{ — соответствует формуле 3.}$$

Ответ: А — 3; Б — 1.

81

На рисунке представлен опыт по преломлению света. Пользуясь приведённой таблицей, определите показатель преломления вещества.



угол α	$\sin \alpha$
20°	0,34
40°	0,64
50°	0,78
70°	0,94

Решение:

Сделаем рисунок.

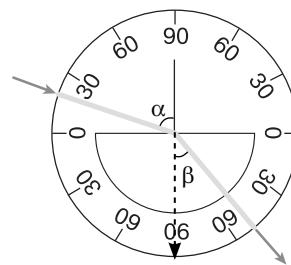
Из рисунка видно, что угол падения:
 $\alpha = 90^\circ - 20^\circ = 70^\circ$.

Угол преломления: $\beta = 90^\circ - 50^\circ = 40^\circ$.

Коэффициент преломления:

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin 70^\circ}{\sin 40^\circ} = \frac{0,94}{0,64} = 1,47.$$

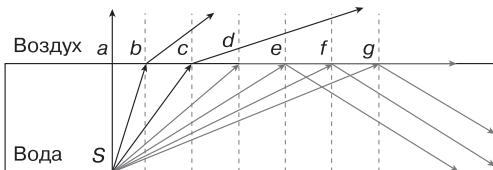
Ответ: $n = 1,47$.



ПОЛНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ОТРАЖЕНИЕ

Полное внутреннее отражение — явление отражения света от оптически менее плотной среды, при котором преломление отсутствует, а интенсивность отражённого света равна интенсивности падающего. Испытывая полное внутреннее отражение, световой сигнал распространяется внутри гибкого стекловолокна (световода).

Волоконная оптика — система передачи оптических изображений с помощью стекловолокон (световодов).



Ход лучей из оптически более плотной среды в оптически менее плотную.

Полное внутреннее отражение наблюдается в точках d , e , f , g ; в точке a луч не преломляется; в точках b , c существуют преломлённые лучи

■ Предельный угол полного внутреннего отражения

Предельный угол полного внутреннего отражения $\alpha_{\text{пр}}$ — это минимальный угол падения света, начиная с которого возникает явление полного внутреннего отражения:

$$\sin \alpha_{\text{пр}} = \frac{1}{n}, \text{ или } \alpha_{\text{пр}} = \arcsin \frac{1}{n}$$

где n — абсолютный показатель преломления.

Для границы раздела «стекло — воздух» угол полного внутреннего отражения равен:

$$\alpha_0 = 42^\circ.$$



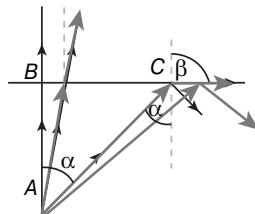
Явлением полного отражения можно объяснить случаи, когда мы видим только серебристую поверхность воды, не замечая плавающих в ней или находящихся выше предметов.



Практические задания

82

Бассейн глубиной 3 м заполнен водой, относительный показатель преломления на границе «воздух — вода» составляет 1,33. Каков радиус светового круга на поверхности воды от электрической лампы на дне бассейна?



Дано:

$$h = 3 \text{ м}$$

$$n = 1,33 \text{ м}$$

$$R = ?$$

Решение:

Сделаем рисунок хода лучей из точки A на дне бассейна. Вертикальный луч AB не изменяет своего направления после прохождения границы раздела, все остальные лучи испытывают преломление или отражаются от границы раздела.

Полное внутреннее отражение происходит, начиная с такого значения угла падения α , при котором угол преломления $\beta = 90^\circ$, $\sin\beta = 1$.

Следовательно, предельное значение угла α , при котором свет выходит из воды, определяется условием:

$$\frac{\sin\beta}{\sin\alpha} = n, \text{ или } \sin\alpha = \frac{1}{n}, \text{ причём } \tan\alpha = \frac{\sin\alpha}{\sqrt{1 - (\sin\alpha)^2}} = \frac{1}{\sqrt{n^2 - 1}}.$$

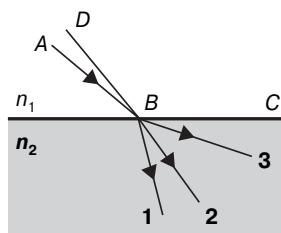
Радиус светового круга BC равен:

$$R = BC = AB \cdot \tan\alpha = \frac{AB}{\sqrt{n^2 - 1}} = \frac{h}{\sqrt{n^2 - 1}}; R = \frac{3 \text{ м}}{\sqrt{(1,33)^2 - 1}} \approx 3,4 \text{ м.}$$

Ответ: $R \approx 3,4 \text{ м.}$

83

Луч AB преломляется в точке B на границе раздела двух сред с показателями преломления $n_1 > n_2$ и идёт по пути BC (см. рисунок). По какому из указанных на рисунке путей пойдёт луч, если изменить угол его падения и направить падающий луч по пути DB ?



Решение:

Луч AB образует угол полного отражения, так как угол преломления в данном случае равен 90° . Любой угол, меньший этого угла, будет преломляться. Луч DB образует угол, лишь немного меньший, чем луч AB , поэтому угол преломления будет немного меньше 90° .

Ответ: 3.

ЛИНЗЫ

Линзой называется 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.

Если толщина самой линзы мала по сравнению с радиусами кривизны сферических поверхностей, то линзу называют тонкой.

Линзы бывают собирающими и рассеивающими.

Плоскую поверхность можно рассматривать как частный случай сферической, радиус кривизны которой стремится к бесконечности.

Линзы используются в телескопах, микроскопах, биноклях, фотоаппаратах, проекторах, для изготовления очков и т. д.

Собирающие и рассеивающие линзы

Собирающие линзы (выпуклые) — линзы, преобразующие параллельный пучок световых лучей в сходящийся

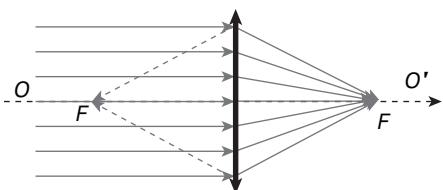
Рассеивающие линзы (вогнутые) — линзы, преобразующие параллельный пучок световых лучей в расходящийся

Радиус кривизны положителен: $R > 0$

Радиус кривизны отрицателен: $R < 0$

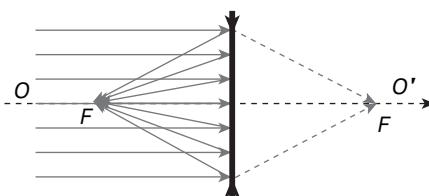
>>>

Главный фокус F собирающей линзы — точка на главной оптической оси, в которой собираются лучи, падающие параллельно главной оптической оси, после преломления их в линзе



Определение главного фокуса F собирающей линзы: OO' — главная оптическая ось

Главный фокус F (мнимый) рассеивающей линзы — точка на главной оптической оси, через которую проходят продолжения расходящегося пучка лучей, возникшего после преломления в линзе лучей, параллельных главной оптической оси



Определение главного фокуса F рассеивающей линзы: OO' — главная оптическая ось

Фокусное расстояние и оптическая сила тонкой линзы

Фокусное расстояние F — 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**)

Оптическая сила собирающей линзы положительна: $D > 0$

Оптическая сила рассеивающей линзы отрицательна: $D < 0$

■ Формула тонкой линзы

Взаимосвязь между расстоянием от предмета до линзы d , фокусным расстоянием F и расстоянием от изображения до линзы f называют **формулой тонкой линзы**:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f} = D,$$

где D — оптическая сила линзы.

Если изображение оказывается мнимым ($d < F$), то $f < 0$, а если действительным — то $f > 0$.

■ Увеличение, даваемое линзой

Линейное увеличение оптической системы Γ — отношение линейного размера изображения H к линейному размеру предмета h :

$$\Gamma = \frac{H}{h}.$$



Если размер предмета больше размера изображения, то Γ означает уменьшение, хотя термин «увеличение» при этом сохраняется.

■ Ход луча, прошедшего линзу под произвольным углом к её главной оптической оси

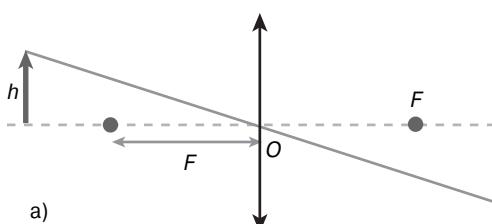
Изображения бывают прямыми и перевёрнутыми, действительными и мнимыми, увеличенными и уменьшенными.

Действительное изображение точки A — точка A' , в которой сходится после преломления в линзе пучок лучей, испускаемых точкой A .

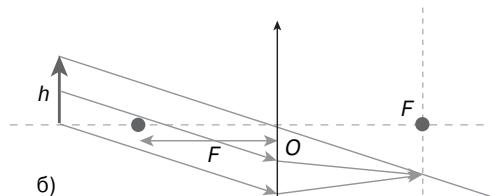
Мнимое изображение точки A — точка A' , в которой пересекаются после преломления в линзе продолжения расходящегося пучка лучей, мимо испускаемых точкой A .

Основные закономерности построения изображений

Луч, проходящий через оптический центр линзы O , не преломляется (оптическая ось); F — фокус (фокусное расстояние) линзы, h — высота предмета (рис. а).

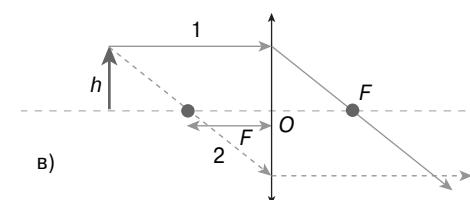


Все параллельные лучи пересекаются в фокальной плоскости (плоскости, проведённой через фокус параллельно линзе) (рис. б).



Луч 1, параллельный главной оптической оси, преломляясь в линзе, проходит через её главный фокус (рис. в).

Луч 2, проходящий через главный фокус (по принципу обратимости лучей), после преломления в линзе идёт параллельно главной оптической оси.



■ Построение изображений точки и отрезка прямой в собирающих и рассеивающих линзах и их системах

Для построения изображения точки используем описанные выше закономерности. При пересечении двух лучей получим изображение точки. Для построения отрезка достаточно построить и соединить две точки.

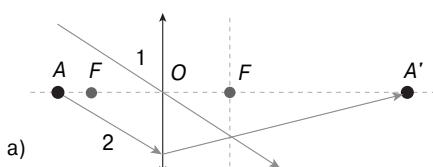
Основные случаи построения изображений

Предмет A находится на главной оптической оси.

Требуются дополнительные построения.

Луч 1 (под любым углом) — оптическая ось, не преломляется (рис. а).

Луч 2, параллельный ему, преломляясь, пересекается с лучом 1 в фокальной плоскости. На пересечении луча 2 с главной оптической осью получим изображение точки А.

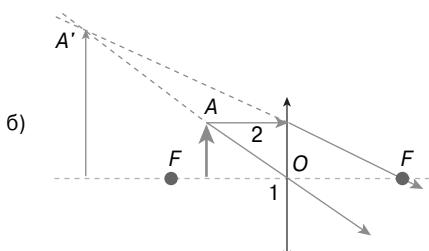


Если предмет находится между линзой и фокусом:

$$d < F,$$

то лучи выйдут из линзы расходящимся пучком, нигде не пересекаясь.

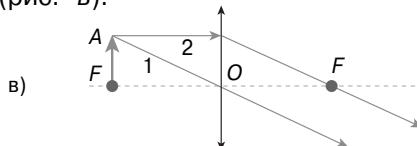
Изображение при этом получается мнимое, прямое, увеличенное, то есть в данном случае линза работает как лупа (рис. б).



Если предмет находится в плоскости переднего главного фокуса линзы:

$$d = F,$$

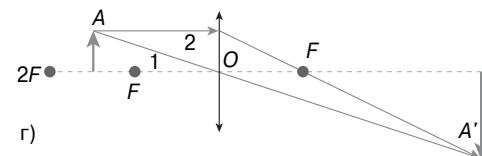
то лучи, пройдя через линзу, пойдут параллельно, и изображение может получиться лишь в бесконечности (рис. в).



Если предмет находится между передним фокусом и двойным фокусным расстоянием:

$$2F < d < F,$$

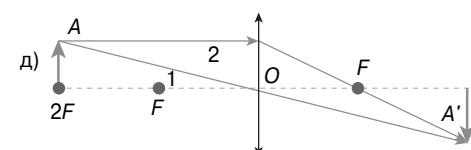
то изображение будет получено за двойным фокусным расстоянием и будет действительным, перевёрнутым, увеличенным (рис. г).



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 будет действительным, перевёрнутым, равным по величине предмету (рис. д).

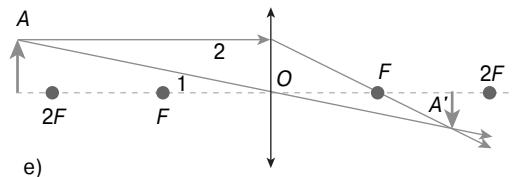


Если предмет находится на расстоянии, превышающем двойное фокусное расстояние:

$$d > 2F,$$

то изображение будет действительным, перевёрнутым, уменьшенным и расположится за главным фокусом

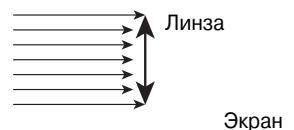
на отрезке между ним и двойным фокусным расстоянием (рис. е).



Практические задания

84

Пучок параллельных световых лучей падает перпендикулярно на тонкую собирающую линзу оптической силой 5 дптр. Диаметр линзы — 6 см. Диаметр светового пятна на экране — 12 см. На каком расстоянии от линзы помещён экран? Ответ выразите в см.



Решение:

Сделаем рисунок.

Фокусное расстояние линзы:

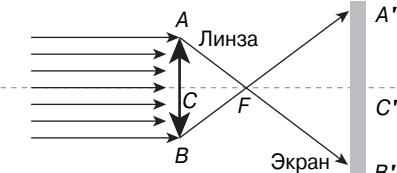
$$F = \frac{1}{D} = \frac{1}{5} = 0,2 \text{ м.}$$

Поскольку диаметр светового пятна на экране 12 см, значит, увеличение: $\Gamma = \frac{H}{h} = 2$.

Из подобия треугольников AFB и $A'FB'$ ($k = 2$) имеем: $FC' = 2FC$, причём $FC' + FC = f$, $CF = F$.

$$f = 3F = 0,6 \text{ м} = 60 \text{ см.}$$

Ответ: $f = 60 \text{ см.}$



85

Линза с фокусным расстоянием $F = 1 \text{ м}$ даёт на экране изображение предмета, увеличенное в 4 раза. Каково расстояние от предмета до линзы?

Дано:

$F = 1 \text{ м}$

$\Gamma = 4$

$d - ?$

Решение:

Сделаем рисунок.

По формуле тонкой линзы

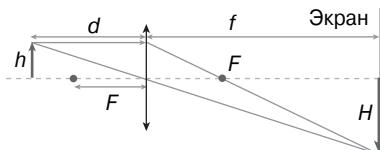
$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f},$$

где увеличение линзы

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}, \text{ то есть } f = \Gamma \cdot d.$$

Тогда $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{\Gamma \cdot d} = \frac{1}{d} + \frac{1}{4 \cdot d} = \frac{5}{4 \cdot d}$, откуда

$$d = \frac{5}{4} F = \frac{5}{4} \cdot 1 \text{ м} = 1,25 \text{ м.}$$

Ответ: $d = 1,25 \text{ м.}$ **86**

Тонкая палочка AB длиной $l = 10 \text{ см}$ расположена параллельно главной оптической оси тонкой собирающей линзы на расстоянии $h = 15 \text{ см}$ от неё (см. рисунок). Конец A палочки располагается на расстоянии $a = 40 \text{ см}$ от линзы. Постройте изображение палочки в линзе и определите его длину L . Фокусное расстояние линзы $F = 20 \text{ см}$.

Дано:

$l = 0,1 \text{ м}$

$h = 0,15 \text{ м}$

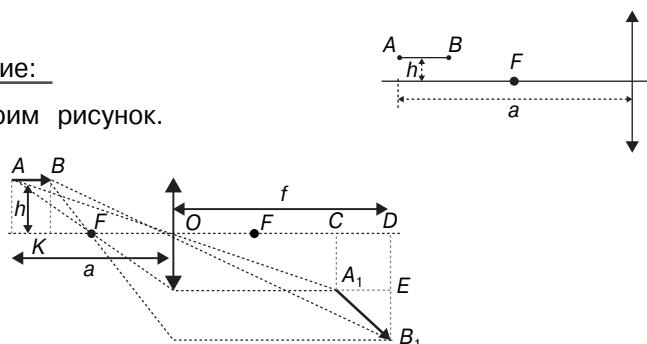
$a = 0,4 \text{ м}$

$F = 0,2 \text{ м}$

$L - ?$

Решение:

Построим рисунок.



Точка A находится на расстоянии $2F$ от линзы, поэтому её изображение будет удалено от линзы и от оси на такое же расстояние $2F$. Изображение точек A и B строится традиционно по двум лучам (см. рисунок).

Длину отрезка A_1B_1 найдём из треугольника A_1B_1E .

Имеем: $A_1C = h = 0,15 \text{ м}$; $OC = a = 0,4 \text{ м}$; $OK = d = a - l = 0,3 \text{ м}$.

Для определения расстояний B_1C и OB_1 используем формулу тонкой

$$\text{линзы: } \frac{1}{F} = \frac{1}{f} + \frac{1}{d}, \text{ откуда } \frac{1}{f} = \frac{1}{OD} = \frac{1}{F} - \frac{1}{d}.$$

$$\frac{1}{OD} = \frac{1}{0,2 \text{ м}} - \frac{1}{0,3 \text{ м}} = \frac{1}{0,6 \text{ м}}, \quad OD = 0,6 \text{ м.}$$

$$A_1E = OD - OC; \quad A_1E = 0,6 \text{ м} - 0,4 \text{ м} = 0,2 \text{ м.}$$

Из подобия треугольников OBK и OB_1D имеем: $\frac{BK}{B_1D} = \frac{OK}{OD}$,

$$B_1D = \frac{OD}{OK} \cdot BK; \quad B_1D = \frac{0,6 \text{ м}}{0,3 \text{ м}} \cdot 0,15 \text{ м} = 0,3 \text{ м.}$$

$$\text{Тогда } B_1E = B_1D - DE; \quad B_1E = 0,3 \text{ м} - 0,15 \text{ м} = 0,15 \text{ м.}$$

$$\text{По теореме Пифагора } A_1B = L = \sqrt{(A_1E)^2 + (B_1E)^2};$$

$$L = \sqrt{(0,2 \text{ м})^2 + (0,15 \text{ м})^2} = 0,25 \text{ м} = 25 \text{ см.}$$

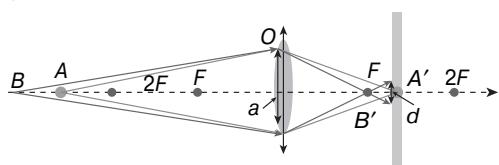
Ответ: $L = 25 \text{ см.}$

ФОТОАППАРАТ КАК ОПТИЧЕСКИЙ ПРИБОР

Фотоаппарат представляет собой **замкнутую светонепроницаемую камеру**. Изображение фотографируемых предметов создаётся на фотоплёнке системой линз, которая называется объективом. Специальный затвор позволяет открывать объектив на время экспозиции.

Особенностью работы фотоаппарата является то, что на плоской фотоплёнке должны получаться достаточно резкими изображения предметов, находящихся на разных расстояниях. Объективы фотоаппаратов представляют собой систему линз. В фокус-

се объектива размещают матрицу (фотоплёнку), на которой формируется изображение. Диафрагма служит для управления интенсивностью светового потока, проходящего через объектив.



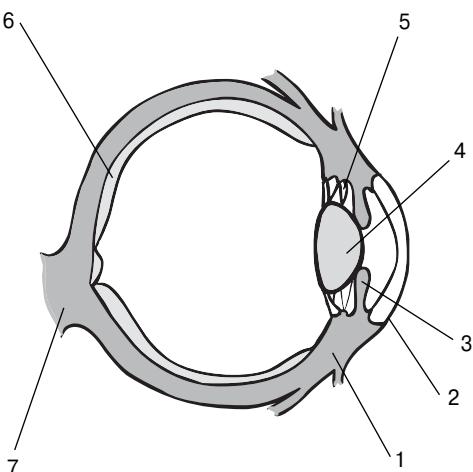
Ход лучей в фотоаппарате:

A и B — предметы, A' и B' — их изображения, O — линза (объектив), F — фокусное расстояние, d — размер изображения, a — размер изображения на линзе

ГЛАЗ КАК ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Глаз человека представляет собой **сложную оптическую систему**, которая по своему действию аналогична оптической системе фотоаппарата. Глаз имеет почти шарообразную форму и диаметр около 2,5 см.

Оптическая сила хрусталика при нормальном зрении равна 19 дптр, а роговицы — 43 дптр.



Схематическое строение глаза:

1 — склеры (защитная оболочка белого цвета); 2 — роговица; 3 — радужная оболочка, окрашенная пигментом; отверстие в радужной оболочке представляет собой зрачок, который действует подобно диафрагме фотоаппарата и способен рефлекторно изменять свой диаметр от 2 до 8 мм; 4 — хрусталик (эластичное линзоподобное тело); 5 — мышца, которая может изменять в некоторых пределах форму хрусталика, варьируя тем самым его оптическую силу; 6 — сетчатая оболочка; 7 — разветвление зрительного нерва с нервыми окончаниями

Аккомодация (основная особенность глаза) — способность рефлекторно изменять оптическую силу глазной оптики в зависимости от положения предмета.

У нормального глаза дальняя точка аккомодации находится в бесконечности.

Ближняя точка нормального глаза располагается на расстоянии 10—20 см от глаза. С возрастом это расстояние увеличивается.

Расстояние наилучшего зрения, то есть расстояние от предмета до глаза, при котором удобнее всего (без чрезмерного напряжения) рассматривать детали предмета, для нормального глаза условно полагают равным 25 см.

Глаз приближённо можно рассматривать как тонкую линзу с переменной оптической силой в 60—70 дптр.

✓ Человек с нормальным зрением рассматривает предмет невооружённым глазом. Каким получается изображение предметов на сетчатке глаза?

Ответ: изображение предметов получается уменьшенным перевёрнутым, так как предмет всегда находится за двойным фокусным расстоянием.



Практические задания

87

Условимся считать изображение на плёнке фотоаппарата резким, если вместо идеального изображения в виде точки на плёнке получается изображение пятна диаметром не более некоторого предельного значения. Поэтому если объектив находится на фокусном расстоянии от плёнки, то резкими считаются не только бесконечно удалённые предметы, но и все предметы, находящиеся дальше некоторого расстояния d . Оцените предельный размер пятна, если при фокусном расстоянии объектива 50 мм и диаметре входного отверстия 5 мм резкими оказались все предметы, находившиеся на расстояниях более 5 м от объектива. Сделайте рисунок, поясняющий образование пятна.

Дано:

$$F = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

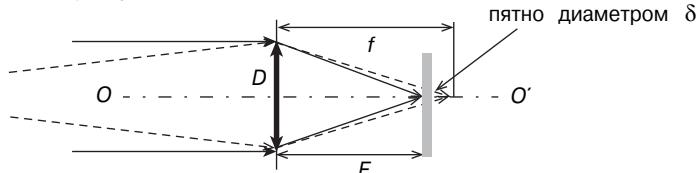
$$D = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$d = 5 \text{ м}$$

$$\delta - ?$$

Решение:

Построим рисунок.



Лучи, идущие от предмета, находящегося на расстоянии d , собираются на расстоянии f , которое больше фокусного расстояния, и поэтому образуют на плёнке пятно диаметром δ . Из подобия треугольников получим:

$$\frac{\delta}{D} = \frac{f - F}{f}, \text{ откуда } \delta = \frac{(f - F) \cdot D}{f}.$$

Из формулы тонкой линзы $\frac{1}{F} = \frac{1}{f} + \frac{1}{d}$, откуда $f = \frac{d \cdot F}{d - F}$.

$$\text{Тогда предельный размер пятна } \delta = \frac{\left(\frac{d \cdot F}{d - F} - F \right) \cdot D}{\frac{d \cdot F}{d - F}} = F \cdot \frac{D}{d}.$$

$$\delta = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \frac{5 \cdot 10^{-3} \text{ м}}{5 \text{ м}} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 0,05 \text{ мм.}$$

Ответ: $\delta = 0,05 \text{ мм.}$

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Интерференция (от лат. *inter* — взаимно и *ferio* — ударяю) — явление наложения волн, вследствие которого наблюдается устойчивое во времени усиление или ослабление результирующих колебаний в различных точках пространства.

Устойчивая во времени интерференционная картина может наблюдаться только при сложении коррелированных (взаимосвязанных) колебаний, называемых **когерентными волнами** (от лат. *cohaerens* — находящийся в связи).

Интерференционная картина — неизменная во времени картина усиления или ослабления волн

в пространстве (светлые и тёмные точки, круги на экране).

■ Когерентные источники

Когерентные волны — волны с одинаковой частотой, поляризацией и постоянной разностью фаз.

Устойчивой интерференционной картины от независимых источников света не наблюдается.

Геометрическая разность хода интерферирующих волн — разность расстояний от источников волн до точки их интерференции.

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

Условие максимума	Условие минимума
<p>Интерференция когерентных волн при времени запаздывания $\Delta t = T$</p>	<p>Интерференция когерентных волн при времени запаздывания $\Delta t = \frac{T}{2}$</p>

E — напряжённость волны, t — время, T — период волн, E_1 — напряжённость первой волны, E_2 — напряжённость второй волны, (E_1+E_2) — напряжённость результирующей волны

>>>

Условие максимума	Условие минимума
<p>Максимальная результирующая интенсивность при интерференции когерентных колебаний в определённой точке пространства получается при их запаздывании друг относительно друга на время, кратное периоду этих колебаний:</p> $\Delta t_{\min} = m \cdot T, \text{ где } m = 0, \pm 1, \pm 2\dots$	<p>Минимальная результирующая интенсивность при интерференции когерентных колебаний в определённой точке пространства получается при их запаздывании друг относительно друга на время, равное нечётному числу полупериодов этих колебаний:</p> $\Delta t_{\min} = (2m+1) \cdot \frac{T}{2}, \text{ где } m = 0, \pm 1, \pm 2\dots$
<p>Или:</p> <p>При одинаковом законе колебаний двух источников максимумы интенсивности наблюдаются в точках пространства, для которых геометрическая разность хода интерферирующих волн равна целому числу длин волн:</p> $\Delta = m \cdot \lambda, \text{ где } m = 0, \pm 1, \pm 2\dots$	<p>Или:</p> <p>При одинаковом законе колебаний двух источников минимумы интенсивности наблюдаются в точках пространства, для которых геометрическая разность хода интерферирующих волн равна нечётному числу полуволн:</p> $\Delta = (2m+1) \cdot \frac{\lambda}{2}, \text{ где } m = 0, \pm 1, \pm 2\dots$

■ Просветление оптики

Просветление оптики — 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.



Практические задания

- 88 Масляная плёнка на воде при наблюдении вертикально к поверхности кажется оранжевой. Каково минимальное возможное значение толщины плёнки? Показатель преломления воды 1,33, масла — 1,47. Длина световой волны $588 \cdot 10^{-7}$ м. Учтите, что отражение света от оптически более плотной среды происходит с потерей полуволны, а от оптически менее плотной среды — без потери полуволны.

Дано:

$$n_1 = 1,33$$

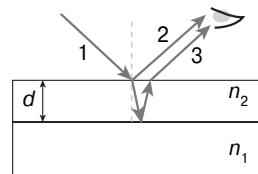
$$n_2 = 1,47$$

$$\lambda = 5,88 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

 d — ?**Решение:**

Свет частично отражается от поверхности плёнки и частично отражается от поверхности воды (см. рисунок).



Разность хода лучей 2 и 3 (условие максимума):

$$\Delta = k \cdot \lambda, \text{ где } k = 0, \pm 1, \pm 2 \dots .$$

Разность хода с учётом оптической плотности плёнки: $\Delta = 2 \cdot n_2 \cdot d$.

Поскольку потеря полуволны происходит только на границе раздела «воздух — масло», то разность хода при отражениях от двух поверхностей равна:

$$\Delta = 2 \cdot n_2 \cdot d - \frac{\lambda}{2}.$$

Условие максимума в отражённом свете:

$$2 \cdot n_2 \cdot d - \frac{\lambda}{2} = k \cdot \lambda.$$

Отсюда минимальная толщина плёнки при условии $k = 0$ равна:

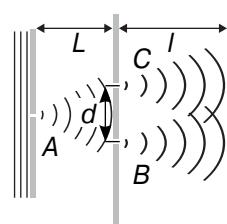
$$2 \cdot n_2 \cdot d = \frac{\lambda}{2}, \text{ отсюда } d = \frac{\lambda}{4 \cdot n_2}; \quad d = \frac{5,88 \cdot 10^{-7} \text{ м}}{4 \cdot 1,47} = 10^{-7} \text{ м.}$$

Ответ: $d = 10^{-7} \text{ м.}$

89

В классическом опыте Юнга по дифракции пучок света, прошедший через узкое отверстие A , освещает отверстия B и C , за которыми на экране возникает интерференционная картина (см. рисунок). Если уменьшить L вдвое, то

- 1) интерференционная картина останется неизменной
- 2) расстояние между интерференционными полосами увеличится
- 3) расстояние между интерференционными полосами уменьшится
- 4) интерференционная картина сместится по экрану, сохранив свой вид



Решение:

Интерференционная картина зависит только от расстояния между щелями d , расстояния от щелей до экрана l и от разности хода лучей Δ , которая определяется расстоянием от оси симметрии до точки максимума.

Построим рисунок.

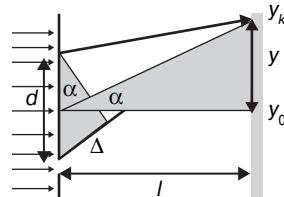
$$\text{Из подобия треугольников } \sin\alpha = \frac{\Delta}{d}, \quad \operatorname{tg}\alpha = \frac{y}{l}.$$

Поскольку при малых углах можем считать,

$$\text{что } \sin\alpha \approx \operatorname{tg}\alpha, \text{ то } \frac{\Delta}{d} = \frac{y}{l}, \text{ откуда } y = \frac{\Delta}{d} \cdot l,$$

где y и есть расстояние между интерференционными максимумами, то есть характеризует интерференционную картину.

Ответ: 1.



ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

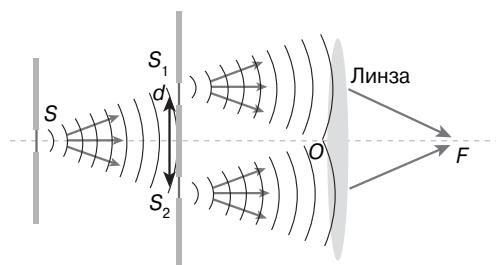
Дифракция — отклонение при распространении волн от законов геометрической оптики.

Дифракция сопровождается нарушением целостности фронта волны, вызванным резкими неоднородностями среды.

Согласно принципу Гюйгенса

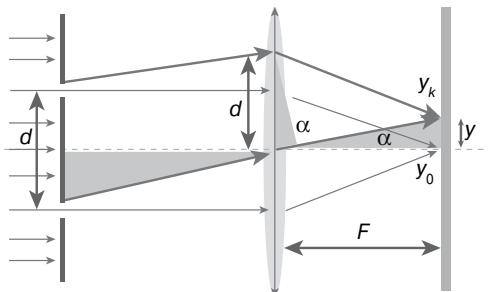
► Каждая точка фронта волны является источником вторичных волн, распространяющихся во все стороны со скоростью распространения волны в среде.

► Огибающая этих волн определяет положение фронта волны в следующий момент времени.



Интерференция вторичных волн за щелью:
 F — фокус линзы, S — источник света, d — ширина щели, S_1 и S_2 — вторичные источники, O — центр линзы

► В результате дифракции мы снова получаем интерференцию волн.



Ход лучей при дифракции света на щели:
 F — фокусное расстояние линзы, d — ширина щели, y_0 и y_k — точки наложения лучей,
 y — расстояние между ними, α — угол

■ Дифракционная решётка

Дифракционная решётка представляет собой совокупность большого числа узких щелей шириной a , разделённых непрозрачными промежутками шириной b , причём величина $d = a + b$ называется периодом решётки.

Примером дифракционной решётки в природе можно считать ресницы.

Условие наблюдения главных максимумов при нормальном падении монохроматического света с длиной волны λ на решётку с периодом d

Монохроматическая волна — электромагнитная волна определённой постоянной частоты.

Если на дифракционную решётку падает плоская монохроматическая волна длиной λ , то каждая щель является источником когерентных вторичных волн (см. рисунок выше). Главные максимумы будут наблюдаться под углом, который определяется условием:

$$d \cdot \sin \alpha = k \cdot \lambda, \text{ где } k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Дифракционные решётки изготавливают отражательные (металлическая зеркальная поверхность с нанесёнными штрихами) и прозрачные (штрихи наносят на специальную оптическую поверхность, пропускающую лучи, или же вырезают узкие щели в непрозрачном материале).

ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

Цвет, видимый и воспринимаемый глазом, определяется **частотой световой волны**.

Монохроматические волны разных частот и длины распространяются в одной среде с одной скоростью.

Дисперсия света — разложение света в спектр при его преломлении и дифракции. Один из самых

наглядных примеров дисперсии — разложение белого света при прохождении его через призму (опыт Ньютона). 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.

Дисперсия света относится к числу самых красивых явлений природы. Каждому доводилось наблюдать дисперсию в повседневной жизни. Один из наиболее популярных примеров — радуга. Сюда же можно причислить цветные круги на мыльных пузырях (явление интерференции) или полярное сияние — свечение наэлектризованного газа.

Узкий пучок белого света после прохождения через стеклянную призму даёт на экране спектр. Укажите правильную последовательность цветов в спектре.

Ответ: волны с меньшей частотой преломляются больше, а с большей частотой — меньше, значит, волны в спектре расположатся в следующем порядке: красный — оранжевый — жёлтый — зелёный — голубой — синий — фиолетовый.



Практические задания

90

На дифракционную решётку с периодом 0,004 мм падает по нормали плоская монохроматическая волна. Количество дифракционных максимумов, наблюдаемых с помощью этой решётки, равно 19. Какова длина волны света?

- 1) 640 нм
2) 560 нм

- 3) 440 нм
4) 580 нм

Дано:

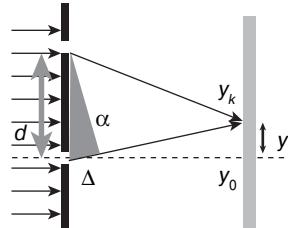
$$d = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$n = 19$$

$$\lambda = ?$$

Решение:

Сделаем рисунок.



Из формулы дифракционной решётки: $d \cdot \sin \alpha = k \cdot \lambda$,
 $k = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$, откуда $\lambda = \frac{1}{k} \cdot d \cdot \sin \alpha$.

В данном случае имеем 1 центральный максимум и по 9 максимумов вверх и вниз от центрального. Тогда для последней точки максимума ($k = 9$) запишем формулу

решётки: $d \cdot \sin\alpha = 9 \cdot \lambda$, откуда $\lambda = \frac{1}{9} \cdot d \cdot \sin\alpha$.
 $\lambda = \frac{1}{9} \cdot 4 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 4,4 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 440 \text{ нм}$.

Ответ: 3.

- 91** На дифракционную решётку, имеющую 100 штрихов на 1 мм, перпендикулярно её поверхности падает луч света, длина волны которого 650 нм. Каков наибольший порядок дифракционного максимума, доступного для наблюдения?

Дано:

$$\begin{aligned} N &= 100 \\ a &= 1 \text{ мм} = 10^{-3} \text{ м} \\ \lambda &= 6,50 \cdot 10^{-7} \text{ м} \\ \alpha &= 90^\circ \end{aligned}$$

$k_{\max} - ?$

Решение:

Постоянная решётки будет равна:

$$d = \frac{a}{N}$$

Из формулы дифракционной решётки

$$d \cdot \sin\alpha = k \cdot \lambda, \text{ где } k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \text{ или } \frac{a}{N} \cdot \sin\alpha = k \cdot \lambda.$$

$$\text{Тогда } k = \left[\frac{a \cdot \sin\alpha}{N \cdot \lambda} \right].$$

$$k = \left[\frac{10^{-3} \text{ м} \cdot \sin 90^\circ}{100 \cdot 6,50 \cdot 10^{-7} \text{ м}} \right] = [15,4] = 15.$$

Ответ: $k_{\max} = 15$.

- 92** Разложение белого света в спектр при прохождении через призму обусловлено
- 1) интерференцией света
 - 2) отражением света
 - 3) дисперсией света
 - 4) дифракцией света

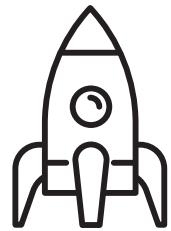
Ответ: 3.

- 93** После прохождения белого света через красное стекло свет становится красным. Это происходит из-за того, что световые волны других цветов в основном
- 1) отражаются
 - 2) рассеиваются
 - 3) поглощаются
 - 4) преломляются

Ответ: 3.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Теория относительности, или релятивистская механика (от 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.



Общая теория относительности (ОТО) — физическая теория пространства, времени и тяготения.

Специальная теория относительности (СТО) рассматривает про-

странственно-временные закономерности, справедливые для любых процессов. СТО была создана одним из основателей теоретической физики Альбертом Эйнштейном в 1905 г.

ПОНЯТИЯ СТО

Событие — физическое явление, происходящее в некоторой точке пространства в определённый момент времени.

Два события, одновременные в одной инерциальной системе отсчёта, не являются одновременными в другой инерциальной системе отсчёта. Разные наблюдатели могут иметь различные представления об одновременности событий.

Собственное время — время, измеренное наблюдателем, который движется вместе с часами.

Масса покоя — масса тела в системе отсчёта, относительно которой тело поконится.

Фотон — материальная, электрически нейтральная частица, квант электромагнитного поля.

ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ЭЙНШТЕЙНА

Специальная теория относительности базируется на двух постулатах.

Первый постулат теории относительности (принцип относительности Эйнштейна). Законы природы, определяющие изменение состояния физических систем, одинаковы в инерциальных системах отсчёта.

Первый постулат теории относительности является обобщением классического принципа относительности Галилея на любые законы природы, а не только механики.

Если в космическом корабле, летящем к далёкой звезде с постоянной

скоростью, проводят экспериментальное исследование взаимодействия заряженных шаров, то результаты этого исследования не будут отличаться от аналогичного, проводимого на Земле.

Второй постулат теории относительности (инвариантность модуля скорости света в вакууме). Скорость света в вакууме одинакова во всех инерциальных системах отсчёта. Она не зависит ни от скорости источника света, ни от скорости приёмника. Она имеет одно значение при распространении в любых направлениях и является предельной скоростью в природе. Эта предельная скорость равна $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с.



Практические задания

1

В космическом корабле, летящем к далёкой звезде с постоянной скоростью, проводят экспериментальное исследование взаимодействия заряженных шаров. Будут ли отличаться результаты этого исследования от аналогичного, проводимого на Земле?

- 1) Да, так как корабль движется с некоторой скоростью.
- 2) Да — из-за релятивистских эффектов, если скорость корабля близка к скорости света; нет — при малых скоростях корабля.
- 3) Нет, результаты будут одинаковыми при любой скорости корабля.
- 4) Для определённого ответа не хватает данных.

Ответ: 3.

Пояснение:

В соответствии с первым постулатом теории относительности результаты будут одинаковыми при любой скорости корабля, поскольку космический корабль движется с постоянной скоростью и является инерциальной системой отсчёта.

2 В некоторой системе отсчёта движутся вдоль оси Ox с одинаковыми скоростями v две светящиеся кометы: одна — в положительном направлении, другая — в отрицательном. В системе отсчёта, связанной с первой кометой, скорость света, испускаемого второй кометой, равна

- | | |
|----------|----------|
| 1) $c+v$ | 3) c |
| 2) v | 4) $c-v$ |

Решение:

В соответствии со вторым постулатом теории относительности скорость света, испускаемого второй кометой, в системе отсчёта, связанной с первой кометой, будет равна $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с.

Ответ: 3.

СЛЕДСТВИЯ ПОСТУЛАТОВ ЭЙНШТЕЙНА

Время в неподвижной системе отсчёта и 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 отсчёта, c — скорость света.

Формула времени отражает «парадокс близнецов»: если один близнец остаётся на Земле, а второй летит в космосе со скоростью, близкой к скорости света, — для второго близнеца время замедляется, то есть он стареет меньше, чем оставшийся на Земле.

Релятивистский закон сложения скоростей:

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

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

Релятивистская масса m (масса частицы, которая движется со скоростью v):

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

где m_0 — масса покоя, c — скорость света.



Практические задания

- 3** Представим, что изобретён космический двигатель, позволяющий лететь со скоростью $v = 0,6 c$ (c — скорость света в вакууме). В каком возрасте вернётся космонавт, вылетевший в возрасте 25 лет, если на Земле пройдёт 70 лет?

Решение:

Время в неподвижной системе отсчёта и движущейся относительно неё течёт с разной скоростью: $t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$, откуда время для космонавта $t' = t \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$

$$t' = t \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}; t' = 70 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{0,6 \cdot c}{c}\right)^2} = 56 \text{ лет},$$

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

Значит, космонавт вернётся в возрасте: $(25 + 56) \text{ лет} = 81 \text{ год}$.

Ответ: в возрасте 81 год.

ЭНЕРГИЯ СВОБОДНОЙ ЧАСТИЦЫ. ИМПУЛЬС ЧАСТИЦЫ

В 1905 г. А. Эйнштейн показал, что энергия тела E прямо пропорциональна его массе:

$$E = m \cdot c^2,$$

где $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$ — масса частицы,

движущейся со скоростью v , m_0 — масса покоя, c — скорость света.

Импульс частицы в релятивистской физике:

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

где $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$ — масса частицы,

движущейся со скоростью v , m_0 — масса покоя, c — скорость света.

СВЯЗЬ МАССЫ И ЭНЕРГИИ СВОБОДНОЙ ЧАСТИЦЫ. ЭНЕРГИЯ ПОКОЯ

Покоящееся тело имеет определённую энергию, называемую **энергией покоя** E_0 , — это энергия тела в системе отсчёта, относительно которой тело покоится.



Практические задания

- 4 Скорость частицы равна $\frac{3}{5} c$. Какую часть от полной энергии составляет её кинетическая энергия?

Дано:

$$\begin{aligned} v &= \frac{3}{5} c \\ c &= 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \\ \hline E_k - ? \end{aligned}$$

Решение:

Кинетическая энергия частицы будет равна разности между полной энергией и энергией покоя: $E_k = E - E_0$.

Учитывая, что $\begin{cases} E_0 = m_0 \cdot c^2 \\ E = m \cdot c^2 \end{cases}$,

получим: $\frac{E_k}{E} = \frac{m \cdot c^2 - m_0 \cdot c^2}{m \cdot c^2} = \frac{m - m_0}{m} = 1 - \frac{m_0}{m}$.

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

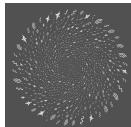
$$\frac{E_k}{E} = 1 - \frac{m_0}{m_0} = 1 - \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} =$$

$$= 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\frac{3}{5}c}{c}\right)^2} = 1 - \sqrt{1 - \frac{9}{25}} = 1 - \sqrt{\frac{16}{25}} = 1 - \frac{4}{5} = \frac{1}{5}.$$

Тогда кинетическая энергия составляет: $E_k = 0,2E$.

Ответ: $E_k = 0,2E$.

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА



КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ

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



Тепловое излучение — электромагнитное излучение, испускаемое нагретыми телами за счёт своей внутренней энергии.

Абсолютно чёрное тело (по определению, поглощающее все виды излучения) может испускать электромагнитное излучение любой частоты, то есть мы можем его видеть. Спектр излучения абсолютно чёрного тела определяется его температурой.

Проблема теории теплового излучения заключалась в нахождении зависимости плотности энергии равновесного излучения от частоты и температуры: при увеличении температуры тела возрастает энер-

гия теплового излучения на всех частотах.

Интегральная светимость $R(T)$ абсолютно чёрного тела 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.

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

ГИПОТЕЗА ПЛАНКА О КВАНТАХ

Квант (от лат. *quantum* — количество) — это минимальная порция

энергии, излучаемой или поглощаемой телом.

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 кванта прямо пропорциональна частоте v излучения:

$$E = h \cdot v,$$

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

ФОТОНЫ

Фотон — микрочастица, квант электромагнитного излучения. Фотон — электрически нейтральная частица, то есть $q=0$.

Скорость фотона в вакууме во всех системах отсчёта равна скорости света в вакууме: $v=c=3 \cdot 10^8$ м/с.

■ Энергия фотона

Энергия фотона пропорциональна частоте электромагнитного излучения:

$$E = h \cdot v,$$

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

Следует помнить, что энергия покоя фотона равна нулю, то есть фотон — безмассовая частица.

Кроме того, фотон не имеет заряда.

■ Импульс фотона

Фотон обладает **импульсом**:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda} = \frac{h \cdot v}{c},$$

где E — энергия фотона, p — импульс фотона, $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж · с — постоянная Планка, λ — длина волны фотона, v — частота фотона, c — скорость фотона.



Практические задания

1

Энергия фотона в рентгеновском дефектоскопе в 2 раза больше энергии фотона в рентгеновском медицинском аппарате. Отношение частоты электромагнитных колебаний в первом пучке рентгеновских лучей к частоте во втором пучке равно

- 1) 1 2) 2 3) $\sqrt{2}$ 4) $\frac{1}{2}$

Решение:

По формуле Планка $E = h \cdot v$.

То есть частота прямо пропорциональна энергии. Значит, если энергия фотона в рентгеновском дефектоскопе в 2 раза больше энергии фотона в рентгеновском медицинском аппарате, то соответствующая частота также в 2 раза больше.

Ответ: 2.

2 Чему равна энергия фотона частотой $v = 6 \cdot 10^{14}$ Гц?

Дано:

$$v = 6 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$$

$$h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$E — ?$

Решение:

Согласно гипотезе Планка,

$$E = h \cdot v.$$

$$E = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 6 \cdot 10^{14} \text{ Гц} = 3,96 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Ответ: $E = 3,96 \cdot 10^{-19}$ Дж.

3 Зелёный свет ($\lambda = 550$ нм) переходит из воздуха в стекло с показателем преломления 1,5. Определите отношение частоты фотона в воздухе к его частоте в стекле.

Решение:

Частота волны не меняется при переходе из одной среды в другую.

Ответ: 1.

4 Чему равен импульс, полученный атомом при поглощении фотона из светового пучка частотой $1,5 \cdot 10^{14}$ Гц?

Решение:

Импульс фотона: $p = \frac{E}{c} = \frac{h \cdot v}{c}$.

$$p = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 1,5 \cdot 10^{14} \text{ Гц}}{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} = 3,3 \cdot 10^{-28} \text{ кг} \cdot \text{м/с.}$$

Ответ: $p = 3,3 \cdot 10^{-28}$ кг·м/с.

ФОТОЭФФЕКТ

Фотоэффеkt — явление вырывания электронов из твёрдых и жидких веществ под действием света. Открыт Г. Герцем в 1887 г.

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. Анализируя результаты опытов, он выявил зависимости, которые впоследствии назвали законами фотоэффекта.

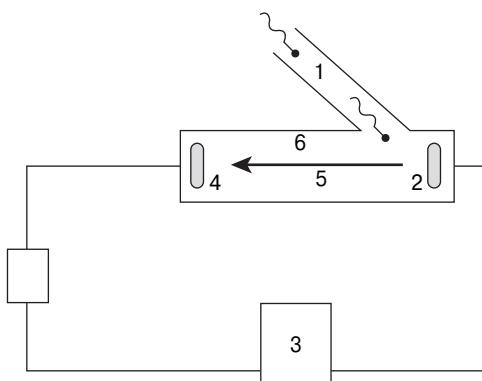
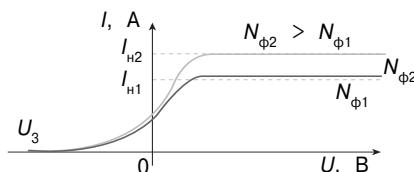


Схема опыта Столетова:
1 — поток фотонов, 2 — катод из исследуемого металла, 3 — источник напряжения, 4 — анод, 5 — поток электронов, 6 — вакуумная трубка

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 носители заряда — **фотоэлектронами**. Фототок возникает даже при нулевой разности потенциалов между электродами.

До некоторого момента не все фотоэлектроны достигают анода, образуя «электронное облако» вокруг катода. При увеличении напряжения сила тока в цепи возрастает (см. рисунок ниже) и при определённом уровне достигает максимального значения, которое называют **током насыщения** $I_{\text{н}}$.

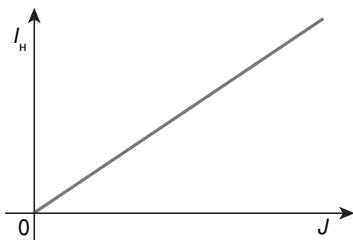
Сила тока уменьшается до нуля при изменении полярности подключения. Напряжение, при котором сила фототока равна нулю, называется **задерживающим напряжением** U_3 .



Вольт-амперная характеристика (зависимость силы тока I от напряжения U на электродах) при фотоэффекте: $N_{\phi 1}$ и $N_{\phi 2}$ — число фотонов в единицу времени (интенсивность падающего света) в 1-м и 2-м опытах, $I_{\text{н}1}$ и $I_{\text{н}2}$ — ток насыщения в 1-м и 2-м опытах, U_3 — задерживающее напряжение

■ Законы фотоэффекта

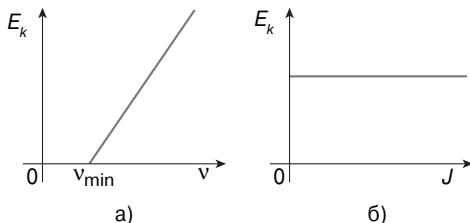
1. Фототок насыщения прямо пропорционален интенсивности света, падающего на катод.



Зависимость силы тока насыщения I_n от интенсивности падающего света J

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

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



Графики зависимости кинетической энергии E_k фотоэлектронов:

- а) от частоты v падающего света; б) от интенсивности J падающего света; v_{min} — минимальная частота света, ниже которой фотоэффект невозможен, красная граница фотоэффекта

Работа выхода — минимальная работа, которую нужно совершить для вырываания электрона из металла. При фотоэффекте работа выхода электрона из металла зависит только от химической природы металла.

Металл	$A_{вых}$, эВ
Алюминий	4,25
Вольфрам	4,54
Железо	4,31
Золото	4,8
Магний	3,67
Медь	4,4
Никель	4,5
Олово	4,39
Платина	5,32
Ртуть	4,52
Серебро	4,3
Цинк	4,24

КПД фотоэлементов в настоящее время составляет около 10—14 %, а в некоторых случаях — 20 % и более.

✓ От чего зависит работа выхода электрона из металла при фотоэффекте?

Ответ: при фотоэффекте работа выхода электрона из металла зависит только от химической природы металла.

■ Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

Энергия E_Φ фотона идёт на совершение работы выхода $A_{\text{вых}}$ и на сообщение вылетевшему фотоэлектрону кинетической энергии E_k :

$$E_\Phi = A_{\text{вых}} + E_k.$$

Следует учитывать:

$$E_\Phi = h \cdot v = \frac{h \cdot c}{\lambda},$$

где E_Φ — энергия фотона, $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка, v — частота фотона, c —

скорость фотона, λ — длина волны фотона.

$$A_{\text{вых}} = h \cdot v_{\min} = \frac{h \cdot c}{\lambda_{\max}},$$

где $A_{\text{вых}}$ — работа выхода электронов, $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка, v_{\min} — минимальная частота, а λ_{\max} — максимальная длина волны, при которой возможен фотоэффект, c — скорость фотона.

$$E_k = e \cdot U_3 = \frac{m \cdot v^2}{2},$$

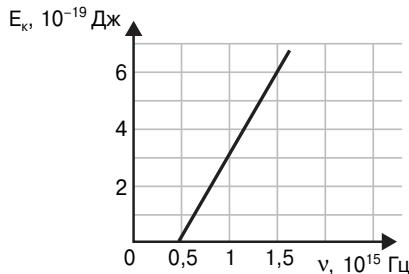
где E_k — кинетическая энергия фотоэлектронов, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — модуль заряда электрона, U_3 — за- пирающее напряжение, m — масса электрона, v — скорость электрона.



Практические задания

5

Слой оксида кальция облучается светом и испускает электроны. На рисунке показан график изменения максимальной энергии фотоэлектронов в зависимости от частоты падающего света. Какова работа выхода фотоэлектронов из оксида кальция?



Решение:

Из графика видно, что фотоэффект начинается при частоте света $v_{\min} = 0,5 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$.

Тогда работа выхода

$$A_{\text{вых}} = h \cdot v_{\min} = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 0,5 \cdot 10^{15} \text{ Гц} = 3,3 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 2 \text{ эВ.}$$

Ответ: $A_{\text{вых}} = 2 \text{ эВ.}$

6 Оцените максимальную скорость электронов, выбиваемых из металла светом длиной волны 300 нм, если работа выхода $A_{\text{вых}} = 3 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Дано:

$$\lambda = 3 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$A_{\text{вых}} = 3 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$V_{\text{max}} = ?$$

Решение:

Из уравнения Эйнштейна для фотоэффекта $E = A_{\text{вых}} + E_{\text{max}}$,

где $E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ — энергия падающего света,

$E_{\text{max}} = \frac{m \cdot V_{\text{max}}^2}{2}$ — максимальная кинетическая

энергия фотоэлектронов.

Тогда $\frac{h \cdot c}{\lambda} = A_{\text{вых}} + \frac{m \cdot V_{\text{max}}^2}{2}$, откуда

$$V_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2}{m} \left(\frac{h \cdot c}{\lambda} - A_{\text{вых}} \right)}.$$

$$V_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}} \left(\frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{3 \cdot 10^{-7} \text{ м}} - 3 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \right)} = \\ = 8,89 \cdot 10^5 \text{ м/с} = 889 \text{ км/с.}$$

Ответ: $V_{\text{max}} = 889 \text{ км/с.}$

7 Внешний фотоэффект — это явление

- 1) почернения фотоэмulsionии под действием света
- 2) вылета электронов с поверхности вещества под действием света
- 3) свечения некоторых веществ в темноте
- 4) излучения нагретого твёрдого тела

Ответ: 2.

ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА ЧАСТИЦ

Гипотеза де Броиля. Любая микрочастица обладает помимо корpusкулярных ещё и волновыми свойствами. Частица массой m ,

движущаяся со скоростью v , характеризуется не только импульсом p и энергией E , но и подобно фотону частотой v и длиной волны λ_B .

■ 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.

■ Корпускулярно-волновой дуализм

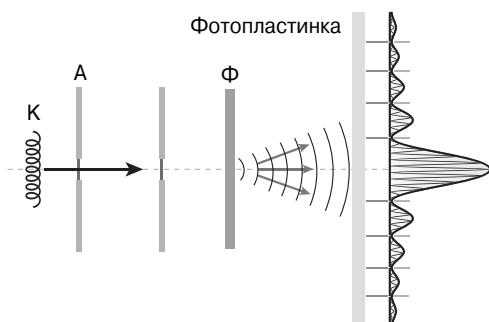
Корпускулярно-волновой дуализм (от лат. *dualis* — двойственный) — физический принцип, утверждающий, что любой объект природы может вести себя и как частица, и как волна. Первые проявления данного принципа — двойственность, корпускулярно-волновая природа света. В частности, свет — это и корпускулы (фотоны), и электромагнитные волны.

Волновые свойства света (свет демонстрирует свойства волны при масштабах, сравнимых с длиной световой волны) подтверждают дифракция, интерференция, поляризация. **Корпускулярные свойства** (фотон ведёт себя как частица, которая из-

лучается или поглощается целиком объектами, размеры которых много меньше длины его волны) подтверждают распространение света в виде потока фотонов, квантовый характер взаимодействия света с веществом, действие законов фотоэффекта.

■ Дифракция электронов на кристаллах

Г. Томсон в своих экспериментах наблюдал **дифракционную картину**, возникающую при прохождении пучка электронов через тонкую поликристаллическую фольгу из золота.



Упрощённая схема опытов Томсона по дифракции электронов:

К — накаливаемый катод, А — анод, Ф — фольга из золота.

График справа — распределение электронов на фотопластиинке

■ ДАВЛЕНИЕ СВЕТА

Фотоны, распространяясь лишь в одном направлении, подобно частицам идеального газа, упруго

отражаются от стенок. При этом величина давления на стенки составляет:

$$p_{\text{эм}} = 2 \cdot \bar{\omega}_{\text{эм}} = 2 \cdot \frac{I}{c},$$

где $\bar{\omega}_{\text{эм}}$ — объёмная плотность энергии электромагнитного излучения, I — интенсивность электромагнитного излучения.

Следствием давления света является, например, образование «хвоста» у кометы, пролетающей вблизи Солнца.

■ Давление света на полностью отражающую поверхность и на полностью поглощающую поверхность

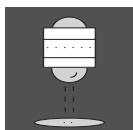
Давление света на полностью отражающую поверхность	Давление света на полностью поглощающую поверхность
Используем общую формулу давления: $P = \frac{F}{S}$, где S — площадь поверхности. Силу давления F найдём из второго закона Ньютона: $F \cdot \Delta t = \Delta p$, где Δt — время действия силы, Δp — изменение импульса. Получим:	
$P = \frac{\Delta p}{S \cdot \Delta t}$	
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, h — постоянная Планка, 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, h — постоянная Планка, λ — длина волны фотонов
Давление фотонов	
$P = \frac{2 \cdot h \cdot N}{S \cdot \Delta t \cdot \lambda}$	$P = \frac{h \cdot N}{S \cdot \Delta t \cdot \lambda}$



Практические задания

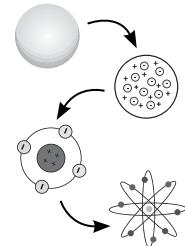
- 8 Явление интерференции электронов можно объяснить, используя представление об электронах как о потоке частиц, обладающих
- 1) электрическим зарядом
 - 2) малыми размерами
 - 3) малой массой
 - 4) волновыми свойствами

Ответ: 4.



ФИЗИКА АТОМА

Первую модель строения атома предложил Д. Томсон в 1904 г. Корпускулы в этой модели распределены внутри положительно заряженного облака с одинаковой по объёму плотностью заряда, как изюминки в пудинге.



ПЛАНЕТАРНАЯ МОДЕЛЬ АТОМА

Планетарная модель атома была предложена в 1911 г. английским физиком Э. Резерфордом.

Результаты эксперимента	Выводы (следствие эксперимента)
<p>1 — золотая фольга, 2 — экран, покрытый сернистым цинком, 3 — радиоактивное вещество</p>	<p>Модель атома Резерфорда</p>
<p>Отклонились на углы $\phi < 1^\circ$ — большинство α-частиц</p>	<p>Большую часть атома занимает пустота</p>
<p>Отклонились на углы $90^\circ < \phi < 180^\circ$ — 0,01 % α-частиц</p>	<p>Альфа-частицы столкнулись с тяжёлым положительно заряженным ядром массой, соизмеримой с массой α-частицы. Размер ядра — 0,01 % размера атома</p>

>>>

Результаты эксперимента	Выводы (следствие эксперимента)
Отклонились на углы $30^\circ < \phi < 90^\circ$ — небольшая часть α -частиц	В центре атома находится положительно заряженное ядро, в котором сосредоточена практически вся масса атома. Радиус ядра равен примерно 10^{-15} м Альфа-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



Практические задания

9

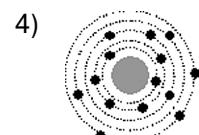
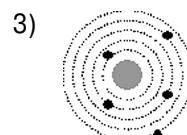
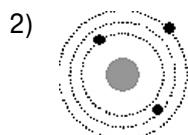
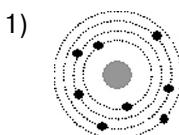
В опыте Резерфорда большая часть α -частиц свободно проходит сквозь фольгу, практически не отклоняясь от прямолинейных траекторий, потому что

- 1) ядро атома имеет положительный заряд
- 2) электроны имеют отрицательный заряд
- 3) ядро атома имеет малые (по сравнению с атомом) размеры
- 4) α -частицы имеют большую (по сравнению с ядрами атомов) массу

Ответ: 3.

10

На рисунке изображены схемы четырёх атомов. Чёрными точками обозначены электроны. Атому ${}_{5}^{10}\text{B}$ соответствует схема



Ответ: 3.

ПОСТУЛАТЫ БОРА

Энергетический уровень — энергия, которой обладает атомный электрон в определённом стационарном состоянии.

Энергия ионизации ΔE_{i1} — минимальная энергия, которую нужно затратить для перевода электрона из основного состояния атома E_1 в свободное состояние:

$$\Delta E_{i1} = |E_1|.$$

Единица измерения энергии в атомной физике — электрон-вольт (**эВ**):

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$



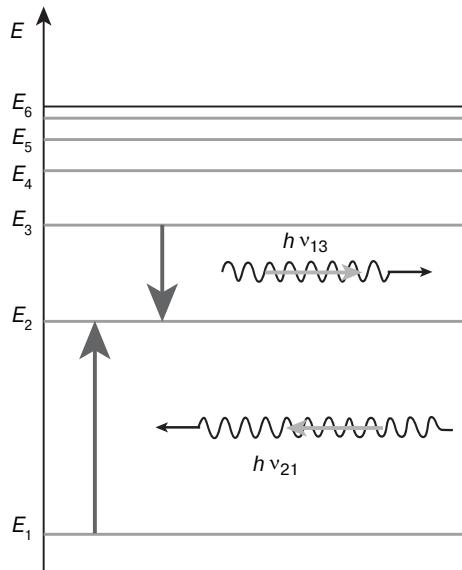
Энергетические уровни атома водорода: E_1 , E_2 , E_3 , E_4 , E_5 , E_6 — значения энергии, соответствующие различным стационарным состояниям атома

Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний). Атомная система может находиться только в особых стационарных или квантовых состояниях, каждому из которых соответствует определённая энергия E_n . В стационарных состояниях атом не излучает.

Основное состояние атома — состояние с минимальной энергией:

$$E_1 \approx -13,6 \text{ эВ.}$$

При $E < 0$ электрон находится внутри атома. Для того чтобы вылететь за пределы атома, необходимо получить энергию, равную энергии стационарного состояния: $E = E_n$. При $E > 0$ — электрон за пределами атома.



Переходы электрона при поглощении и излучении света

Чем больше главное квантовое число n , тем дальше от ядра находится электрон, тем выше его энергетический уровень.

Второй постулат Бора (правило частот). При переходе атома из одного стационарного состояния с энергией E_n в другое стационар-

ное состояние с энергией E_m излучается или поглощается квант, энергия которого равна разности энергий стационарных состояний:

$$\hbar \cdot v_{mn} = \frac{\hbar \cdot c}{\lambda_{mn}} = E_n - E_m.$$

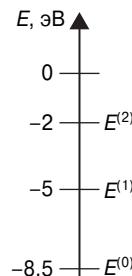
Возбуждённые состояния атома — состояния с $n > 0$.



Практические задания

11

Предположим, что схема энергетических уровней атомов некоторого вещества имеет вид, показанный на рисунке, и атомы находятся в состоянии покоя с энергией $E^{(1)}$. Электрон, движущийся с кинетической энергией 1,5 эВ, столкнулся с одним из таких атомов и отскочил, приобретя некоторую дополнительную энергию. Определите импульс электрона после столкновения. Возможность испускания света атомом при столкновении с электроном пренебречь.

**Дано:**

$$E_{k0} = 1,5 \text{ эВ}$$

$$E_1 = -5 \text{ эВ}$$

$$E_0 = -8,5 \text{ эВ}$$

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$\text{эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

?**Решение:**

Атом, отдав энергию электрону, мог перейти из состояния $E^{(1)}$ в состояние $E^{(0)}$. По второму постулату Бора энергия, приобретённая электроном, равна: $\Delta E = E_1 - E_0$.

Тогда энергия электрона стала равна:

$$E = E_{k0} + \Delta E = E_{k0} + E_1 - E_0,$$

где $E_{\text{кин}} = \frac{m_e \cdot V^2}{2} = \frac{p^2}{2 \cdot m_e}$ — кинетическая энергия электронов.

Тогда $\frac{p^2}{2 \cdot m_e} = E_{k0} + E_1 - E_0$, откуда

$$p_{\max} = \sqrt{2 \cdot m_e \cdot (E_{k0} + E_1 - E_0)}.$$

$$p_{\max} = \sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot (1,5 \text{ эВ} + (-5 \text{ эВ}) - (-8,5 \text{ эВ})) \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}} = \\ = 1,2 \cdot 10^{-24} \text{ кг} \cdot \text{м/с.}$$

Ответ: $p = 1,2 \cdot 10^{-24} \text{ кг} \cdot \text{м/с.}$

- 12** В таблице приведены значения энергии для второго и четвёртого энергетических уровней атома водорода.

Номер уровня	Энергия, 10^{-19} Дж
2	- 5,45
4	- 1,36

Какова энергия фотона, излучаемого атомом при переходе с четвёртого уровня на второй?

Решение:

По второму постулату Бора при переходе атома из одного стационарного состояния с энергией E_4 в другое стационарное состояние с энергией E_2 излучается или поглощается квант, энергия которого равна разности энергий стационарных состояний:

$$h \cdot v_{24} = E_4 - E_2 = - 1,36 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} - (- 5,45 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}) = 4,09 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Ответ: $4,09 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$

ЛИНЕЙЧАТЫЕ СПЕКТРЫ

Линейчатый спектр — спектр излучения, состоящий из отдельных узких спектральных линий различной интенсивности.

Спектр излучения атома водорода определяется всеми возможными частотами:

$$v = R \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right),$$

где v — частота излучения, R — постоянная Ридберга, n и m — главные квантовые числа, причём $n = m+1, m+2$ и т. д.

Спектр составляют ряд серий излучения, каждая из которых образуется при переходах атома в одно из фиксированных нижних энергетических состояний E_1 из всех возмож-

ных верхних энергетических состояний E_n :

$$E_n = \frac{-13,6 \text{ эВ}}{n^2}.$$

Спектральный анализ — метод определения химического состава

и других характеристик вещества по его спектру.

С помощью линейчатых спектров определяют состав удалённых космических объектов, например планет и звёзд.

ЛАЗЕР

Спонтанное излучение — излучение, испускаемое при самопроизвольном переходе атома из возбуждённого состояния в основное.

Индуцированное (вынужденное) излучение — излучение атома, возникающее при его переходе на более низкий энергетический уровень под действием внешнего электромагнитного излучения. При индуцированном излучении частота, фаза, поляризация и направление распространения оказываются такими же, как и у волны, падающей на атом.

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 ($\sim 10^{-3}$ с)

по сравнению с обычным возбуждённым состоянием (10^{-8} с).

■ Основные этапы усиления излучения лазером

Необходимое **условие усиления излучения**: интенсивность индуцированного излучения должна превысить интенсивность поглощённого излучения (в возбуждённом состоянии находится больше частиц, чем в основном).

Этапы усиления излучения:

- «оптическая накачка»: ионы вещества (рубин, хром) переводятся из основного состояния E_1 в возбуждённое E_n ;
- переход ионов на метастабильный энергетический уровень $E_{n-1} < E_n$;
- создание «перезаселённости» энергетического уровня E_{n-1} ;
- индуцированное излучение с «перезаселённого» уровня;
- многократное отражение излучения от зеркальных торцов кристалла — усиление излучения.



Практические задания

13 Нагретый газ углерод $^{15}_6\text{C}$ излучает свет. Этот изотоп испытывает β -распад с периодом полураспада 2,5 с. Как изменится спектр излучения всего газа за 5 с?

- 1) спектр углерода исчезнет и заменится спектром азота $^{15}_7\text{N}$
- 2) спектр станет ярче из-за выделяющейся энергии
- 3) спектр сдвинется из-за уменьшения числа атомов углерода
- 4) спектр углерода станет менее ярким, и добавятся линии азота $^{15}_7\text{N}$

Ответ: 3.

14 Разреженный межзвёздный газ имеет линейчатый спектр излучения с определённым набором длин волн. В спектре излучения звёзд, окружённых этим газом, наблюдаются линии поглощения с тем же набором длин волн. Данное совпадение длин волн объясняется тем, что

- 1) температура межзвёздного газа в обоих случаях одна и та же
- 2) концентрация частиц межзвёздного газа и газа в облаке, окружающем звезду, одна и та же
- 3) химический состав звёзд и межзвёздного газа одинаков
- 4) длины волн излучаемых и поглощаемых фотонов определяются одним и тем же условием: $\frac{hc}{\lambda_{\min}} = |E_n - E_m|$

Ответ: 4.

15 На рисунке приведены спектр поглощения разреженных атомарных паров неизвестного вещества и спектры поглощения атомарных паров известных элементов. Проанализировав спектры, можно утверждать, что неизвестное вещество содержит



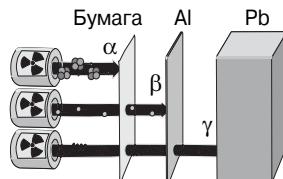
- 1) натрий (Na), водород (H) и другие элементы, но не гелий (He)
- 2) только натрий (Na) и водород (H)
- 3) водород (H), гелий (He) и натрий (Na)
- 4) только водород (H) и гелий (He)

Ответ: 1.



ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

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



НУКЛОННАЯ МОДЕЛЬ ЯДРА ГЕЙЗЕНБЕРГА — ИВАНЕНКО

Атомное ядро, находящееся в центре атома, в 10 000 раз меньше размера самого атома и сосредоточивает 99,9 % массы атома. В состав ядра входят протоны и нейтроны. По современным представлениям протон и нейтрон являются двумя разными состояниями одной и той же частицы — нуклона (от лат. *nucleus* — ядро).

- Протон ${}_1^1p$ (от греч. *protos* — 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.
- Нейtron ${}_0^1n$ (от лат. *neutron* — нейтральный); заряд $q = 0$; масса нейтрона $m_n = 1,6749286 \cdot 10^{-27}$ кг = $1,008664902$ а. е. м.

■ Заряд ядра

Z — **зарядовое число**, число протонов в ядре, соответствует но-

меру элемента в таблице Менделеева.

■ Массовое число ядра

A — **массовое число**, равно сумме масс протонов и нейронов в ядре: $A = Z + N$; N — число нейронов в ядре: $N = A - Z$.

Каждый элемент таблицы Менделеева записывается в виде: ${}_Z^AX$, где X — химический символ элемента.

Рассмотрим атом натрия ${}_{11}^{23}\text{Na}$: он содержит 11 протонов, 12 нейронов и 11 электронов.

■ Изотопы

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.

Водород имеет 3 изотопа: ^1_1H — протий (в ядре нет нейтронов), ^2_1H — дейтерий (в ядре 1 нейtron), ^3_1H — тритий (в ядре 2 нейтрона).



Практические задания

16 Каков заряд ядра $^{11}_5\text{B}$ (в единицах элементарного заряда)?

Ответ: 5.

17 Сколько протонов и сколько нейтронов содержится в ядре $^{55}_{26}\text{Fe}$?

Решение:

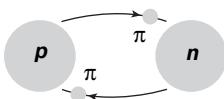
Число протонов в ядре соответствует номеру элемента в таблице Менделеева — 26, число нейтронов в ядре:

$$N = A - Z = 55 - 26 = 29.$$

Ответ: 26 протонов, 29 нейтронов.

ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ НУКЛОНОВ В ЯДРЕ

Между нуклонами в ядре действуют силы неэлектрического происхождения, которые называются ядерными и относятся к сильным взаимодействиям. **Энергия связи ядра** — это 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.

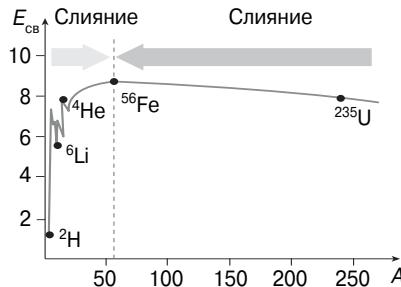


График зависимости удельной энергии связи E_{cb} от массового числа A ядер

Энергия связи ядра связана с массой нуклонов формулой:

$$E_{\text{св}} = \Delta m \cdot c^2,$$

где Δm — дефект масс, $c^2 = 931,5 \frac{\text{МэВ}}{\text{а. е. м.}}$ — эквивалент квадрата скорости света.

Удельные энергии связи нуклонов в ядрах плутония $^{240}_{94}\text{Pu}$, кюрия $^{245}_{96}\text{Cm}$ и америция $^{246}_{95}\text{Am}$ равны 0,21, 0,22, 0,23 МэВ/нуклон соответственно. Из какого ядра труднее выбить нейтрон?

Ответ: труднее выбить нейтрон с большей удельной энергией связи, то есть из ядра $^{246}_{95}\text{Am}$.

ДЕФЕКТ МАССЫ ЯДРА

Сумма масс нуклонов в ядре атома всегда больше массы ядра. Разница между этими величинами называется **дефектом массы** 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 нейронов в ядре, m_p — масса протона, m_n — масса нейтрона, $m_{\text{я}}$ — масса ядра.



Практические задания

18

Найдите энергию связи изотопа кислорода $^{15}_{8}\text{O}$, масса ядра которого $m_{\text{я}}=15,003076$ а. е. м.

Дано:

$$Z = 8$$

$$N = 7$$

$$m_{\text{я}} = 15,003076 \text{ а. е. м.}$$

$$c^2 = 931,5 \frac{\text{МэВ}}{\text{а. е. м.}}$$

$$E_{\text{св}} = ?$$

Решение:

Найдём дефект масс ядра:

$$\Delta m = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n) - m_{\text{я}};$$

$$\Delta m = (8 \cdot 1,007276470 \text{ а. е. м.} + 7 \cdot 1,008664902 \text{ а. е. м.}) - 15,003076 \text{ а. е. м.} = 0,116 \text{ а. е. м.}$$

Вычислим энергию связи:

$$E_{\text{св}} = \Delta m \cdot c^2.$$

$$E_{\text{св}} = 0,116 \text{ а. е. м.} \cdot 931,5 \frac{\text{МэВ}}{\text{а. е. м.}} = 108 \text{ МэВ.}$$

Ответ: $E_{\text{св}} = 108$ МэВ.

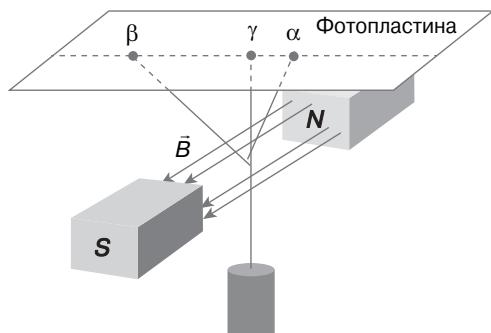
РАДИОАКТИВНОСТЬ

Радиоактивность — явление самопроизвольного превращения одних ядер в другие с испусканием различных частиц. Радиоактивность была открыта в 1896 г. А. Беккерелем.

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.



Радиоактивный препарат

Опыт Резерфорда по исследованию состава радиоактивного излучения:
 S и N — полюса магнитного поля \vec{B} ;
 α , β , γ — точки обнаружения составляющих радиоактивного излучения

Атомы радиоактивных веществ испускают три вида излучений различной физической природы.

Альфа-лучи — поток ядер атомов гелия: $\alpha = {}_2^4\text{He}$; обладают наименьшей проникающей способностью (слой бумаги толщиной $\approx 0,1$ мм для них непроходим), слабо отклоняются в магнитном поле (см. рисунок слева).

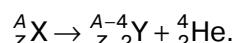
Бета-лучи — поток электронов $\beta = {}_{-1}^0e$, движущихся со скоростями, близкими к скорости света; обладают большей, чем α -лучи, проходимостью (алюминиевая пластина толщиной в несколько миллиметров непроходима), сильно отклоняются в магнитном и электрическом полях.

Гамма-лучи — поток квантов жёсткого рентгеновского излучения (электромагнитные волны) $\gamma = {}_0^0\gamma$; обладают наибольшей проникающей способностью (слой свинца толщиной больше 1 см уменьшает интенсивность в 2 раза), не отклоняются магнитным полем.

■ Альфа-распад

Альфа-распад — спонтанное превращение радиоактивного ядра в новое ядро с испусканием α -частицы.

Уравнение α -распада:



В результате α -распада образуется химический элемент в таблице Менделеева с порядковым номером, уменьшенным на 2 единицы, и массовым числом — на 4 единицы.

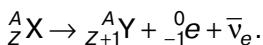
■ Бета-распад

Бета-распад — спонтанное превращение радиоактивного ядра в новое ядро с испусканием электрона или позитрона.

Электронный β -распад

Бета (минус)-распад (электронный β -распад) — спонтанное превращение радиоактивного ядра в новое ядро с испусканием электрона и антинейтрино.

Уравнение электронного β -распада:

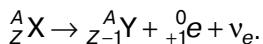


В результате β -распада образуется химический элемент с порядковым номером, увеличенным на одну единицу, и с тем же массовым числом (см. таблицу Менделеева).

Позитронный β -распад

Бета (плюс)-распад (позитронный β -распад) — спонтанное превращение радиоактивного ядра в новое ядро с испусканием позитрона и нейтрино.

Уравнение позитронного β -распада:



В результате позитронного β -распада образуется химический элемент в таблице Менделеева с порядковым номером, уменьшенным на одну единицу, и с тем же массовым числом, при этом один из нейтронов превращается в протон.

■ Гамма-излучение

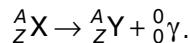
Кинетическая энергия продуктов распада определяется разностью масс материнского ядра и продуктов распада реакции.

Энергия распада — суммарная кинетическая энергия продуктов распада.

Многие реакции, в том числе и α -распад, сопровождаются высвобождением энергии — γ -излучением.

Гамма-излучение — 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 γ -распада:



Гамма-излучение часто сопровождает явления альфа- или бета-распада.

Какие изменения в составе атома химического элемента приводят к его превращению в другой химический элемент?

Ответ: только изменение числа протонов в ядре приведёт к превращению одного химического элемента в другой химический элемент.



Практические задания

19 Примером радиоактивности является

- 1) поглощение фотона атомом
- 2) превращение атома в ион того же химического элемента
- 3) излучение фотона электронной оболочкой атома
- 4) испускание электрона при превращении одного атомного ядра в другое

Ответ: 4.

20 Ядро изотопа $^{216}_{84}\text{Po}$ образовалось после α -распада из ядра

- 1) $^{214}_{86}\text{Hg}$
- 2) $^{212}_{82}\text{Pb}$
- 3) $^{220}_{86}\text{Rn}$
- 4) $^{218}_{86}\text{Rn}$

Решение:

Запишем реакцию α -распада: $^{216+4}_{84+2}X \rightarrow ^{216}_{84}\text{Po} + ^4_2\text{He}$, получим: $^{220}_{86}\text{Rn}$.

Ответ: 3.

21 Ядро какого элемента образуется после двух последовательных α -распадов из ядра $^{252}_{102}\text{No}$?

Решение:

Соответствующая ядерная реакция:



Элемент в таблице Менделеева под номером 98 — это калифорний $^{244}_{98}\text{Cf}$.

Ответ: $^{244}_{98}\text{Cf}$.

22 В образце, содержащем изотоп радия $^{224}_{88}\text{Ra}$, происходят реакции превращения: $^{224}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^{220}_{86}\text{Rn} \rightarrow ^{216}_{84}\text{Po}$.

При этом регистрируются

- | | |
|-------------------------------------|------------------------------------|
| 1) α - и γ -излучение | 3) α - и β -излучение |
| 2) только β -излучение | 4) только γ -излучение |

Решение:

Запишем реакцию: $^{224}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^{220}_{86}\text{Rn} + {}_2^4X$ — имеем α -распад;

$^{220}_{86}\text{Rn} \rightarrow ^{216}_{84}\text{Po} + {}_2^4X$ — имеем α -распад.

Следует учитывать, что γ -излучение сопровождает любую реакцию распада.

Ответ: 1.

ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

Период полураспада $T_{1/2}$ — промежуток времени, за который распадается половина первоначального числа атомов.

Закон радиоактивного распада (закон убывания числа радиоактивных атомов со временем):

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}},$$

где N — количество активных ядер, N_0 — начальное количество активных ядер, $T_{1/2}$ — период полураспада, t — время.

Активность A (или скорость распада), то есть число распадов в единицу времени, согласно закону радиоактивного распада, зависит от времени следующим образом:

$$A = A_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}},$$

где $T_{1/2}$ — период полураспада, A_0 — начальная активность препарата, t — время.

Единица активности — беккерель (Бк).



Практические задания

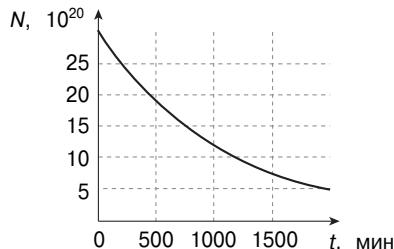
23

Дан график зависимости числа нераспавшихся ядер висмута $^{203}_{83}\text{Bi}$ от времени. Каков период полураспада этого изотопа?

Решение:

В начальный момент времени было $30 \cdot 10^{20}$ активных атомов. Половина частиц — $15 \cdot 10^{20}$ — останется через 750 мин. Это и есть период полураспада: $T_{1/2} = 750$ мин.

Ответ: $T_{1/2} = 750$ мин.



- 24** Активность радиоактивного элемента уменьшилась в 4 раза за 8 суток. Каков период полураспада этого элемента?

Дано:

$$\frac{A}{A_0} = 4$$

$$t = 8 \text{ сут.}$$

$$T_{1/2} — ?$$

Решение:

Из формулы активности препарата $A = A_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$ имеем: $\frac{A}{A_0} = 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} = 4 = 2^2$.

$$\text{Тогда } -\frac{t}{T_{1/2}} = 2, \text{ откуда } T_{1/2} = \frac{t}{2} = \frac{8}{2} = 4 \text{ сут.}$$

Ответ: $T_{1/2} = 4$ сут.

- 25** В свинцовую капсулу поместили 10 ммоль атомов радиоактивного актиния $^{227}_{89}\text{Ac}$. Какое количество данного изотопа актиния останется в капсule через 20 дней? Период полураспада изотопа актиния составляет 10 дней.

Дано:

$$T_{1/2} = 10 \text{ дней}$$

$$t = 20 \text{ дней}$$

$$v_0 = 10^{-2} \text{ моль}$$

$$v — ?$$

Решение:

По закону радиоактивного распада $N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$.

Следует учесть, что $v = \frac{N}{N_A} = \frac{N_0}{N_A} \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} = v_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$.

$$\text{Тогда } v = 10^{-2} \text{ моль} \cdot 2^{-\frac{20}{10}} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ моль} = 2,5 \text{ ммоль.}$$

Ответ: $v = 2,5$ ммоль.

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Ядерные реакции — превращения атомных ядер, вызванные их взаимодействием с частицами или друг с другом.

При этом выполняется:

- 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.

Энергетическим выходом ядерной реакции называется величина

$$Q = (M_A + M_B - M_C - M_D) \cdot c^2 = \Delta M \cdot c^2,$$

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

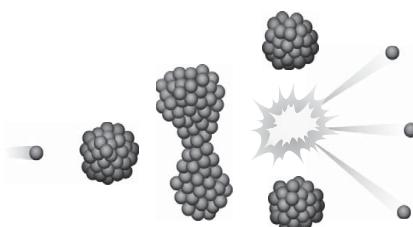
Реакция деления — это процесс, при котором нестабильное ядро делится на два крупных фрагмента сравнимых масс.

■ Цепная реакция деления ядер

Цепная ядерная реакция — реакция деления атомных ядер тя-

жёлых элементов под действием нейтронов. В результате деления ядра, инициированного нейтроном, возникают новые нейтроны, способные вызвать реакции деления других ядер.

При делении ядра урана $^{235}_{92}\text{U}$, которое вызвано столкновением с нейтроном, освобождаются два или три нейтрона. Эти нейтроны могут попасть в другие ядра урана и вызвать их деление. Такой лавинообразный процесс называется цепной реакцией. Цепная ядерная реакция развивается чрезвычайно быстро (порядка 10^{-7} — 10^{-6} с) и сопровождается выделением огромного количества энергии (200 МэВ на каждое делящееся ядро урана).



Цепная реакция деления ядра урана

Коэффициент размножения нейтронов — отношение числа нейтронов в каждом последующем поколении к числу нейтронов в новом поколении: $k = \frac{N}{N_0}$.

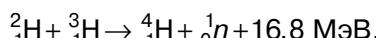
При $k < 1$ деление ядра прекращается; при $k > 1$ происходит взрыв.

Устройство, в котором поддерживается управляемая реакция деления ядер ($k = 1$), называется ядерным (или атомным) реактором.

Термоядерная реакция (реакция синтеза) — процесс образования ядра в результате соединения (слияния) ядер малых атомов. Термо-

ядерная реакция протекает лишь в условиях очень высоких температур ($T \approx 10^6$ К).

✓ Пример термоядерной реакции:



Практические задания

- 26** В результате реакции синтеза ядра дейтерия с ядром ${}_{Y}^{X}\text{Z}$ образуются ядро бора и нейтрон в соответствии с реакцией: ${}_{1}^{2}\text{H} + {}_{Y}^{X}\text{Z} \rightarrow {}_{5}^{10}\text{B} + {}_{0}^{1}n$. Каковы массовое число X и заряд Y (в единицах элементарного заряда) ядра, вступившего в реакцию с дейтерием? Определите элемент Z .

Решение:

В соответствии с законами сохранения зарядового и массового числа

$$\begin{cases} Y = 5 + 0 - 1 = 4 \\ X = 10 + 1 - 2 = 9 \end{cases}$$

имеем 4-й элемент таблицы Менделеева — это бериллий ${}_{4}^{9}\text{Be}$.

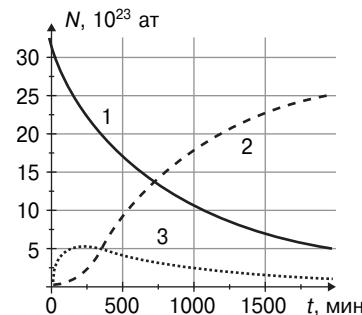
Ответ: ${}_{4}^{9}\text{Be}$.

- 27** Платина ${}_{78}^{200}\text{Pt}$ в результате одного β -распада переходит в радиоактивный изотоп золота ${}_{79}^{200}\text{Au}$, который затем превращается в стабильный изотоп ртути ${}_{80}^{200}\text{Hg}$. На рисунках приведены графики изменения числа атомов с течением времени. Какой из графиков может относиться к изотопу ${}_{79}^{200}\text{Au}$?

Решение:

Число атомов золота сначала возрастает, затем медленно убывает, что соответствует графику 3.

Ответ: 3.



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 иное использование книги или ее части без согласия издателя является незаконным и влечет уголовную, административную и гражданскую ответственность.

Справочное издание
анықтамалық баспа

Для старшего школьного возраста
мектеп жасындағы ерсек балаларға арналған

НАГЛЯДНЫЙ СПРАВОЧНИК ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ОГЭ И ЕГЭ

Попова Ирина Александровна

ФИЗИКА
(орыс тілінде)

Ответственный редактор **А. Жилинская**

Ведущий редактор **Т. Судакова**

Художественный редактор **Е. Брынчик**

Во внутреннем оформлении использованы иллюстрации:

Aha-Soft, AlexanderZam, Andris Torms, Anteromite, Chepko Danil Vitalevich, Designua, Dmitry Polonskiy, DragonStyle, Dzm1try, Elena Medvedeva, Fouad A. Saad, imagedb.com, Jovanovic Dejan, LineTale, MilanB, Mountain Brothers, My-Pro, Nasky, Oleg Erin, Regissercom, Sergey Merkulov, Sybille Yates, Thepphanom Leeprakhon, udaix, vector illustration, wizdata1 / Shutterstock.com

Используется по лицензии от Shutterstock.com

В оформлении обложки использованы иллюстрации:

berdesigns, Palau, garagestock, K.Sorokin, Mjosedesign, Artur Balytskyi / Shutterstock.com

В оформлении титула использована иллюстрация: AstarteJulia / Shutterstock.com

Используется по лицензии от Shutterstock.com

ООО «Издательство «Эксмо»

123308, Россия, Москва, ул. Зорге, д. 1, Тел.: 8 (495) 411-68-86.

Home page: www.eksmo.ru E-mail: info@eksmo.ru

Фирнешт: «ЭКСМО-АКБ Баспасы, 123308, Москва, Ресей, Зорге көшесі, 1 үй.

Тел.: 8 (495) 411-68-86.

Home page: www.eksmo.ru E-mail: info@eksmo.ru.

Тарал белгілі: «Эксмо»

Интернет-магазин: www.book24.ru

Интернет-магазин: www.book24.kz

Интернет-дискинг: www.book24.kz

Импортер в Республику Казахстан ТОО «РДЦ-Алматы».

Казакстан Республикасының импортчысы «РДЦ-Алматы» ЖШС.

Дистрибутор и представитель по приему претензий на продукцию,

в Республике Казахстан: ТОО «РДЦ-Алматы»

Қазақстан Республикасының лицензийтөр және еним бойынша арыз-талаптарды

қабылдаудыңын екілі «РДЦ-Алматы» ЖШС.

Алматы қ., Домбровский күші, 3-а, литер Б, одис 1.

Тел.: 8 (727) 251-59-90/91/92; E-mail: RDC-Almaty@eksmo.kz

Өмімнің жардымының мерзімі шектелмеген.

Сертификация туралы алғары: www.eksmo.ru/certification

Сведения о подтверждении соответствия издания согласно законодательству РФ

о техническом регулировании можно получить на сайте Издательства «Эксмо»

www.eksmo.ru/certification

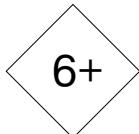
Фирнешт: «ЭКСМО-АКБ Баспасы, 123308, Москва, Ресей. Сертификация жаистырылған

Продукция соответствует требованиям ТР ТС 007/2011

Дата изготовления / Подписано в печать 04.10.2019. Формат 70x90¹/16.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 23,33. Доп. тираж 3000 экз. Заказ

EAC



ISBN 978-5-04-093006-7

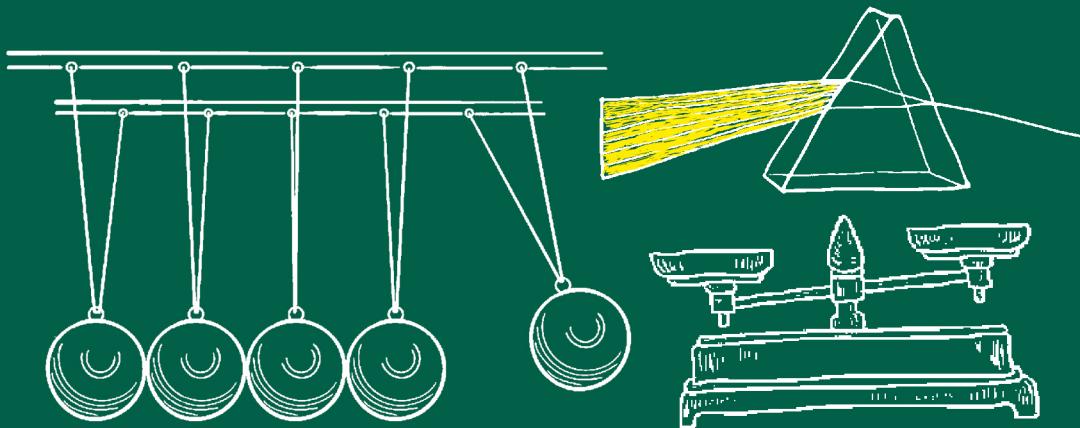


9 785040 930067 >

НАГЛЯДНЫЙ СПРАВОЧНИК для подготовки к ОГЭ и ЕГЭ

ФИЗИКА

! Весь школьный курс в доступном изложении с наглядными примерами и заданиями для тренировки.



С ПОМОЩЬЮ ЭТОЙ КНИГИ ВЫ:

- без проблем усвоите даже сложные для понимания темы;
- проверите и закрепите свои знания;
- сэкономите время и получите отличный результат.

ISBN 978-5-04-093006-7



www.vk.com/eksmo_kids