

ЕДИНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭКЗАМЕН

Н.С. Пурышева, Е.Э. Ратбиль

ФИЗИКА

НОВЫЙ ПОЛНЫЙ СПРАВОЧНИК

ДЛЯ ПОДГОТОВКИ

К ЕГЭ

100
БАЛЛОВ

Н.С. Пурышева
Е.Э. Ратбиль

ФИЗИКА

НОВЫЙ ПОЛНЫЙ СПРАВОЧНИК

**для подготовки
к ЕГЭ**

Москва
Издательство АСТ
2021

УДК 373.5:53
ББК 22.3я721
П88

Пурышева, Наталия Сергеевна.

П88 ЕГЭ. Физика : новый полный справочник для подготовки к ЕГЭ / Н. С. Пурышева, Е. Э. Ратбиль. — Москва : Издательство АСТ, 2021. — 352 с.

ISBN 978-5-17-132977-8

(Новый полный справочник для подготовки к ЕГЭ)

ISBN 978-5-17-132978-5

(Самый полный справочник для подготовки к ЕГЭ)

Новый справочник содержит весь теоретический материал по курсу физики, необходимый для сдачи единого государственного экзамена. Он включает в себя все элементы содержания, проверяемые контрольными измерительными материалами, и помогает обобщить и систематизировать знания и умения школьного курса физики.

Теоретический материал изложен в краткой и доступной форме. Каждая тема сопровождается примерами тестовых заданий. Практические задания соответствуют формату ЕГЭ. В конце пособия приведены ответы к тестам.

Пособие адресовано школьникам, абитуриентам и учителям.

УДК 373.5:53

ББК 22.3я721

ISBN 978-5-17-132977-8

ISBN 978-5-17-132978-5

© Пурышева Н.С., Ратбиль Е.Э., 2020

© ООО «Издательство АСТ», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	8
-------------------	---

МЕХАНИКА

Кинематика	11
-------------------------	----

Механическое движение. Система отсчёта.

Материальная точка. Траектория. Путь. Перемещение.....	11
--	----

Скорость и ускорение материальной точки.....	17
--	----

Равномерное прямолинейное движение.....	21
---	----

Равноускоренное прямолинейное движение.....	23
---	----

<i>Примеры заданий 1</i>	26
--------------------------------	----

Свободное падение. Ускорение свободного падения.

Движение тела, брошенного под углом к горизонту	30
---	----

Движение материальной точки по окружности	34
---	----

<i>Примеры заданий 2</i>	36
--------------------------------	----

Динамика	40
-----------------------	----

Первый закон Ньютона. Инерциальные системы отсчёта	40
--	----

Масса тела. Плотность вещества	43
--------------------------------------	----

Сила. Второй закон Ньютона	46
----------------------------------	----

Третий закон Ньютона для материальных точек	49
---	----

<i>Примеры заданий 3</i>	51
--------------------------------	----

Закон всемирного тяготения. Сила тяжести	53
--	----

Сила упругости. Закон Гука.....	56
---------------------------------	----

Сила трения. Сухое трение.....	60
--------------------------------	----

<i>Примеры заданий 4</i>	63
--------------------------------	----

Статика	65
----------------------	----

Условие равновесия твёрдого тела в ИСО	65
--	----

Закон Паскаля.....	67
--------------------	----

Давление в жидкости, покоящейся относительно ИСО	69
--	----

Закон Архимеда. Условия плавания тел	71
--	----

<i>Примеры заданий 5</i>	72
--------------------------------	----

Законы сохранения	75
--------------------------------	----

Закон сохранения импульса.....	75
--------------------------------	----

Работа силы на малом перемещении	78
--	----

<i>Примеры заданий 6</i>	81
--------------------------------	----

Закон сохранения механической энергии	84
<i>Примеры заданий 7</i>	88
Механические колебания и волны	90
Гармонические колебания. Амплитуда и фаза колебаний.	
Кинематическое описание	90
Механические волны	97
<i>Примеры заданий 8</i>	100

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА

Основы молекулярно-кинетической теории

строения вещества	104
Атомы и молекулы, их характеристики	104
Движение молекул	109
Взаимодействие молекул и атомов.	113
<i>Примеры заданий 9</i>	118
Давление идеального газа	120
Температура газа и средняя кинетическая энергия молекул	123
<i>Примеры заданий 10</i>	127
Уравнение состояния идеального газа.	129
<i>Примеры заданий 11</i>	132
Изопроцессы в разреженном газе с постоянным числом частиц N (с постоянным количеством вещества ν) . . .	135
<i>Примеры заданий 12</i>	140
Насыщенные и ненасыщенные пары.	142
Влажность воздуха	146
<i>Примеры заданий 13</i>	150

Термодинамика	152
Внутренняя энергия макроскопической системы.	152
<i>Примеры заданий 14</i>	163
Изменение агрегатных состояний вещества: испарение и конденсация, кипение	166
<i>Примеры заданий 15</i>	169
Изменение агрегатных состояний вещества: плавление и кристаллизация	172
<i>Примеры заданий 16</i>	175
Работа в термодинамике.	178
Первый закон термодинамики.	181
<i>Примеры заданий 17</i>	184

Второй закон термодинамики	187
Принципы работы тепловых двигателей.....	190
<i>Примеры заданий 18</i>	195

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Электростатика	198
Явление электризации. Электрический заряд и его свойства	198
Закон Кулона	199
Электростатическое поле	199
Конденсаторы	204
<i>Примеры заданий 19</i>	206

Законы постоянного тока	211
Постоянный электрический ток.....	211
Законы постоянного тока	212
<i>Примеры заданий 20</i>	218
<i>Примеры заданий 21</i>	222

Магнитное поле	224
Магнитное взаимодействие	224
<i>Примеры заданий 22</i>	227
Связь электрических и магнитных явлений	232
<i>Примеры заданий 23</i>	235

Электромагнитные колебания и волны	239
Свободные электромагнитные колебания	239
<i>Примеры заданий 24</i>	248

ОПТИКА

Геометрическая оптика.	254
Линзы	260
Глаз. Недостатки зрения	266
Оптические приборы.	268
<i>Примеры заданий 25</i>	272

Волновая оптика	276
Интерференция света	276
Опыт Юнга. Кольца Ньютона	277
Применение интерференции света	279
<i>Примеры заданий 26</i>	283

ОСНОВЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Основы специальной теории относительности (СТО).	286
<i>Примеры заданий 27.</i>	288

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Гипотеза Планка.	290
Законы внешнего фотоэффекта	291
Корпускулярно-волновой дуализм	293
<i>Примеры заданий 28.</i>	294

ФИЗИКА АТОМА

Планетарная модель атома.	298
Постулаты Бора	299
Спектральный анализ.	302
Лазер	302
<i>Примеры заданий 29.</i>	305

Физика атомного ядра	307
Протонно-нейтронная модель ядра	307
Изотопы. Энергия связи ядер. Ядерные силы.	308
Радиоактивность. Закон радиоактивного распада	309
Ядерные реакции	311
<i>Примеры заданий 30.</i>	314

ЭЛЕМЕНТЫ АСТРОНОМИИ

Небесная механика	317
1. Эллипс. Свойства эллипса	317
2. Законы движения планет	317
3. Ускорение свободного падения.	319
4. Космические скорости	319

Строение солнечной системы.	320
1. Характеристики планет Солнечной системы	320
2. Современные представления о Солнечной системе.	321
Малые тела Солнечной системы.	322

Звёзды	325
1. Характеристики звёзд.	325
2. Диаграмма «Спектр — светимость»	327
3. Массы звёзд.	328
4. Внутреннее строение звёзд.	329
5. Эволюция звёзд.	332

Наша Галактика — Млечный Путь	333
Галактики	335
1. Классификация галактик	335
2. Квазары	337
3. Красное смещение	338
Космологическая модель Вселенной	339
Модели возможной эволюции Вселенной	340
<i>Примеры задания 31</i>	342
Приложения	346
Ответы	349

ПРЕДИСЛОВИЕ

Новый справочник содержит весь теоретический материал по курсу физики 10–11 классов и предназначен для подготовки учащихся к единому государственному экзамену (ЕГЭ).

Содержание основных разделов справочника — «Механика», «Молекулярная физика. Термодинамика», «Электродинамика», «Оптика», «Основы специальной теории относительности», «Квантовая физика» соответствует кодификатору элементов содержания и требований к уровню подготовки выпускников общеобразовательных организаций для проведения единого государственного экзамена по физике, на основе которого составлены контрольно-измерительные материалы ЕГЭ.

Теоретическая часть справочника содержит весь необходимый материал для подготовки к ЕГЭ: понятия физических явлений, формулировки законов и формулы, математически описывающие физические закономерности явлений. Чёткость и краткость изложения, а также наглядность учебного материала позволят эффективно подготовиться к единому государственному экзамену.

Практическая часть справочника включает примеры контрольно-измерительных материалов, которые по форме и по содержанию соответствуют реальным формулировкам заданий, предлагаемым на едином государственном экзамене по физике.

Практические задания приводятся в конце каждой темы. Они включают задания базового и повышенного уровней.

Задания базового уровня — это задания с выбором ответа. К каждому заданию с выбором ответа приводятся 4 варианта ответа, из которых верен только один. Такой вид заданий проверяет усвоение элементов знаний всех содержательных блоков курса физики, а также умение применять эти знания к решению простых задач. Помимо этого, поскольку условие задач представляется в виде тек-

ста, таблицы или графика, одновременно контролируются умения работать с информацией физического содержания, представленной в разных формах.

Задания повышенного уровня — это задания либо на установление соответствия между элементами знаний, содержащимися в двух множествах, либо на выбор двух правильных утверждений из пяти приведённых в перечне (множественный выбор). Во втором случае условие задачи представляется в виде текста, таблицы или графика. На эти задания представляется краткий ответ в виде набора цифр.

Задания повышенного уровня сложности направлены на проверку усвоения тех же элементов содержания, что и задания с выбором ответа, а также более сложных элементов содержания курса физики старшей школы. При выполнении заданий этого уровня сложности требуется осуществить большее число учебных действий (операций), чем при выполнении заданий базового уровня. Так, при выполнении одной группы заданий необходимо проанализировать различные группы элементов физических знаний, приведённых в двух множествах, и установить между ними соответствие, например:

- величины и их единицы;
- величины и формулы, которые связывают их с другими величинами;
- явление или закон и его применение в приборах или технических устройствах;
- величины, характеризующие конкретное физическое явление и характер их изменения и т.п.

Выполнение заданий другой группы требует анализа данных, приведённых в таблицах разных физических величин, или анализа графиков зависимостей физических величин и определения правильных утверждений, представляющих собой комбинацию сведений из разных таблиц или графиков.

В конце книги приведены справочные материалы, которые необходимы для решения задач.

Правильность своих ответов учащийся может проверить, воспользовавшись таблицей ответов в конце справочника.

Пособие поможет учащимся выпускных классов и абитуриентам самостоятельно повторить и систематизировать материал школьного курса физики, познакомиться с формой тестовых заданий ЕГЭ и самостоятельно выполнить типовые тренировочные задания.

В связи с возможными изменениями в формате и количестве заданий рекомендуем в процессе подготовки к экзамену обращаться к материалам сайта официального разработчика экзаменационных заданий — Федерального института педагогических измерений: www.fipi.ru.

МЕХАНИКА

КИНЕМАТИКА

Механическое движение. Система отсчёта. Материальная точка. Траектория. Путь. Перемещение

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

Существуют различные виды механического движения. Если все точки тела движутся одинаково и любая прямая, проведённая в теле, при его движении остаётся параллельной самой себе, то такое движение называется **поступательным** (рис. 1).

Точки вращающегося ротора генератора описывают окружности относительно оси этого ротора. Ротор как целое и его точки совершают **вращательное** движение (рис. 2).

Если тело, например груз, прикрепленный к пружине, отклоняется от положения равновесия то в одну, то в другую сторону (то вниз, то вверх), то его движение является **колебательным** (рис. 3).

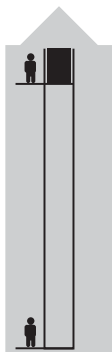


Рис. 1.
Поступательное
движение

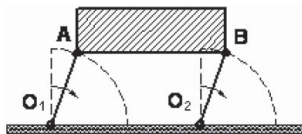


Рис. 2

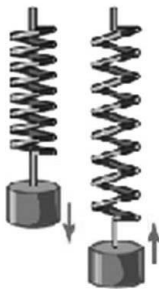


Рис. 3
Колебющийся
груз
на пружине



Рис. 4. Пассажир, сидящий в автобусе, движется относительно деревьев, но покоится относительно автобуса

2. Относительность механического движения. Система отсчёта. Слова «относительно других тел» в определении понятия механического движения означают, что данное тело может покоиться относительно одних тел и двигаться относительно других тел. Поэтому, говоря о том, что тело покоится или движется, необходимо указывать объект, относительно которого рассматривается состояние этого тела. Так, пассажир, сидящий в автомобиле (рис. 4), движущемся относительно дороги, тоже движется относительно неё и относительно встречного автомобиля, но покоится относительно автомобиля, в котором он находится, и автомобиля, движущегося в том же направлении и с той же скоростью. Плот, плывущий по течению реки, неподвижен относительно воды и движется относительно берега. Таким образом, говоря о механическом движении тела, необходимо указывать тело, относительно которого данное тело движется или покоится. Такое тело называют *телом отсчёта*. В приведённом примере с движущимся автомобилем в качестве тела отсчёта может быть выбран какой-либо дом, или дерево, или столб на обочине дороги.

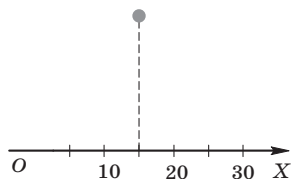


Рис. 5

Для определения положения тела в пространстве вводят **систему координат**, которую связывают с телом отсчёта. При рассмотрении движения тела вдоль прямой линии используют одномерную систему координат, т.е. с телом от-

счёта связывают одну координатную ось, например ось OX (рис. 5).

Если тело движется по криволинейной траектории, то система координат будет уже двумерной, поскольку положение тела характеризуют две координаты X и Y (рис. 6). Таким движением является, например, движение волейбольного или футбольного мяча, стрелы, выпущенной из лука, предмета, выпавшего из окна движущегося автомобиля.

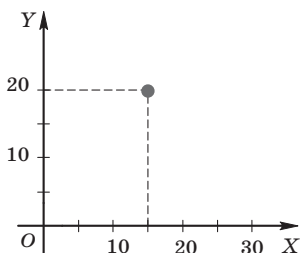


Рис. 6

Если рассматривается движение тела в пространстве, например движение летящего самолёта, то система координат, связанная с телом отсчёта, будет состоять из трёх взаимно перпендикулярных координатных осей (OX , OY и OZ) (рис. 7).

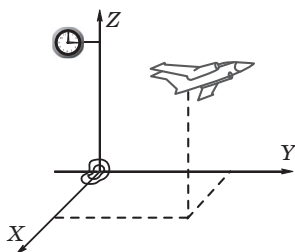


Рис. 7. Трёхмерная система координат

Поскольку при движении тела его положение в пространстве, т.е. его координаты, изменяется с течением времени, то необходим прибор (часы), который позволяет измерять время и определять, какому моменту времени соответствует та или иная координата.

Для определения положения тела в пространстве и изменения этого положения с течением времени необходимы **тело отсчёта**, связанная с ним **система координат** и **способ измерения времени**, т.е. часы, которые все вместе представляют собой **систему отсчёта**.

3. Основная задача механики. Изучить движение тела — это значит определить, как изменяется его положение, т.е. координата, с течением времени. Если известно, как изменяется координата со временем, можно определить положение (координату) тела в любой момент времени.

Основная задача механики состоит в определении положения (координаты) тела в любой момент времени.

Чтобы указать, как изменяется положение тела с течением времени, нужно установить связь между величинами, характеризующими это движение, т.е. найти математическое описание движения или, иными словами, записать уравнение движения тела.

4. Материальная точка. Любое движущееся тело имеет определённые размеры, и его различные части занимают разные положения в пространстве. Возникает вопрос, как в таком случае определить положение тела в пространстве. В целом ряде случаев нет необходимости указывать положение каждой точки тела и для каждой точки записывать уравнение движения. Это относится, например, к поступательному движению тела, поскольку в этом случае все точки тела движутся одинаково.

Движение каждой точки тела не нужно описывать и при решении таких задач, когда размерами тела можно пренебречь. Например, если нас интересует, с какой скоростью теплоход движется от одного города до другого, то рассматривать движение каждой точки теплохода нет необходимости. Если же необходимо определить действующую на него выталкивающую силу, то пренебречь размерами теплохода уже нельзя. Если мы хотим вычислить время движения космического корабля от Земли до космической станции, то корабль можно считать единым целым и представить в виде некоторой точки. Если же рассчитывается режим стыковки корабля со станцией, то, представив корабль в виде точки, решить эту задачу невозможно.

Поэтому для решения ряда задач, связанных с движением тел, вводят понятие **материальной точки**.

Материальной точкой называют тело, размерами которого можно пренебречь в условиях данной задачи.

В приведённых выше примерах материальной точкой можно считать теплоход при расчёте скорости его движения, космический корабль при определении времени его движения.

Материальная точка — это модель реальных объектов, реальных тел. Считая тело материальной точкой, мы отвлекаемся от несущественных для решения конкретной задачи признаков, в частности, от размеров тела.

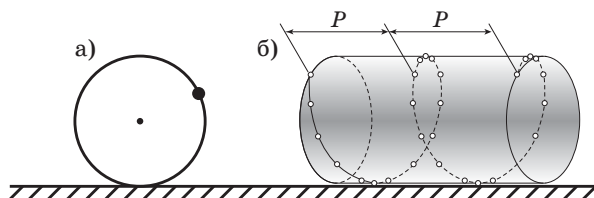


Рис. 8

5. Траектория движения материальной точки. При перемещении тело последовательно проходит точки пространства, соединив которые можно получить линию. **Эта линия, вдоль которой движется тело, называется траекторией.** Траектория может быть *видимой* или *невидимой*. Видимую траекторию описывают автомобиль при движении по шоссе, лыжник, скользя по лыжне, грифель карандаша, которым пишут на листе бумаги. Траектория летящей птицы невидима, невидимой является траектория беспорядочно бегающей собаки.

Траектория движения тела относительна: её форма зависит от выбора системы отсчёта. Так, траекторией точек обода колеса мотоцикла, движущегося по прямой дороге, относительно оси колеса является окружность, а относительно Земли — винтовая линия (рис. 8 а, б).

Зная траекторию точки, её начальное положение и пройденный ею путь за время t , можно найти положение точки в момент времени t (рис. 9). **Физическая величина, равная расстоянию, пройденному телом вдоль траектории, называется путём.**

Путь обозначают буквой l (иногда s), основная единица пути l м: $[l] = 1$ м. Кратная единица пути — километр (1 км = 1000 м);

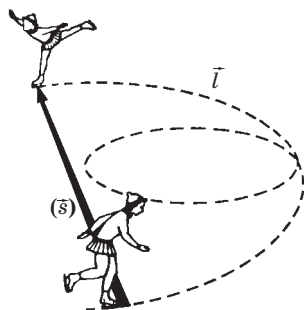


Рис. 9. Траектория и путь

дольные единицы — дециметр (1 дм = 0,1 м), сантиметр (1 см = 0,01 м) и миллиметр (1 мм = 0,001 м).

Путь — величина относительная, значение пути зависит от выбора системы отсчёта. Так, путь пассажира l , переходящего с кормы движущегося теплохода на его нос, равен длине теплохода l_1 в системе отсчёта, связанной с теплоходом. В системе отсчёта, связанной с Землёй, он равен сумме длины теплохода l_1 и пути l_2 , который проплыл теплоход относительно Земли: $l = l_1 + l_2$.

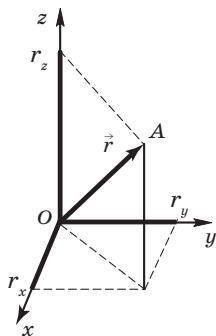


Рис. 10

6. Перемещение. Если траектория материальной точки неизвестна, то её положение в пространстве определяется радиус-вектором. *Радиус-вектор* — вектор, соединяющий начало координат и положение материальной точки в пространстве (рис. 10). Радиус-вектор $\vec{r}(t)$ точки A — OA. С другой стороны, положение материальной точки в пространстве характеризуется координатами $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$, т.е. $\vec{r}(t) = (x(t), y(t), z(t))$.

Если материальная точка находилась в положении 1, её радиус-вектор $\vec{r}_1(t_1)$, положение 2 характеризуется радиус-вектором $\vec{r}_2(t_2)$. **Разность радиус-векторов \vec{r}_2 и \vec{r}_1 называют перемещением точки \vec{r} : $\Delta\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$.**

Проекции перемещения на координатные оси: $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$.

Часто **перемещение** определяют как **вектор, соединяющий начальное положение тела с его конечным положением** (рис. 11). Перемещение — векторная физическая величина, имеет направление и числовое значение, обозначается $\Delta\vec{r}$. Единица перемещения $[\Delta\vec{r}] = 1 \text{ м}$.

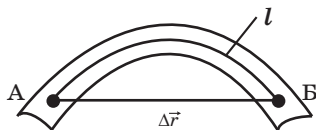


Рис. 11

Зная начальное положение тела, его перемещение (направление и модуль) за некоторый промежуток времени, можно определить положение тела в конце этого промежутка времени.

Перемещение в общем случае не совпадает с траекторией, а модуль перемещения — с пройденным путём. Это совпадение имеет место лишь при движении тела по прямолинейной траектории в одну сторону. Например, если мяч бросили с поверхности Земли вертикально вверх и он достиг высоты 4 м, а затем упал на землю, то его путь равен 8 м, а модуль перемещения равен нулю.

При решении задач пользуются проекциями вектора перемещения. На рисунке 12 изображены система координат и вектор перемещения $\Delta\vec{r}$ в этой системе координат. Координаты начала перемещения x_0, y_0 ; координаты конца перемещения — x_1, y_1 . Проекция вектора перемещения на ось OX равна: $\Delta r_x = x_1 - x_0$. Проекция вектора перемещения на ось OY равна: $\Delta r_y = y_1 - y_0$, $|\Delta\vec{r}|^2 = \Delta r_x^2 + \Delta r_y^2$.

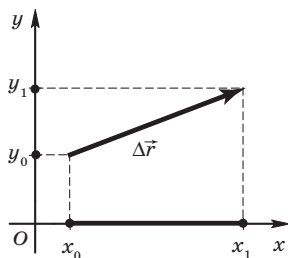


Рис. 12. Вектор перемещения в системе координат XOY

Модуль вектора перемещения равен $|\Delta\vec{r}| = \sqrt{\Delta r_x^2 + \Delta r_y^2}$.

Перемещение так же, как и путь, величина относительная, зависит от выбора системы отсчёта. Перемещение тела относительно неподвижной системы отсчёта $\Delta\vec{r}$ равно сумме перемещения тела относительно движущейся системы отсчёта $\Delta\vec{r}_1$ и перемещения подвижной системы отсчёта относительно неподвижной $\Delta\vec{r} = \Delta\vec{r}_1 + \Delta\vec{r}_2$. Записанное равенство называют **законом сложения перемещений**.

Скорость и ускорение материальной точки

1. Средняя скорость. Скорость — физическая величина, которая характеризует быстроту движения, т.е. быстроту изменения координаты тела.

Реальное механическое движение — это движение с изменяющейся скоростью. Движение, скорость которого с течением времени изменяется, называют **неравномерным движением**. Для характеристики быстроты изменения положения тела с течением времени при не-

равномерном движении вводят величину, называемую *средней скоростью*.

Средней скоростью \vec{v} неравномерного движения называют физическую величину, равную отношению перемещения $\Delta\vec{r}$ тела ко времени Δt , за которое оно произошло:

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

Записанная формула определяет среднюю скорость как векторную величину. В практических целях этой формулой можно воспользоваться для определения модуля средней скорости лишь в том случае, когда тело движется вдоль прямой в одну сторону. Если же нужно определить среднюю скорость движения автомобиля от одного города до другого и обратно, чтобы рассчитать расход бензина, то эту формулу применить нельзя, поскольку перемещение в этом случае равно нулю и средняя скорость тоже равна нулю.

Поэтому на практике при определении средней скорости пользуются величиной, равной отношению пути l ко времени t , за которое этот путь пройден: $v_{\text{ср.}} = \frac{l}{t}$. Эта скорость обычно называется **средней путевой скоростью**.

Важно, что, зная среднюю скорость неравномерного движения на каком-либо участке траектории, нельзя определить положение тела на этой траектории в любой момент времени. Например, если средняя скорость движения автомобиля за 3 часа 40 км/ч, то мы не можем сказать, где он находился через 30 минут, через 1 час, через 1,5 часа и т.д., поскольку он мог первые полчаса двигаться со скоростью 80 км/ч, затем какое-то время стоять, а какое-то время ехать в пробке со скоростью 20 км/ч.

2. Мгновенная скорость. Двигаясь по траектории, тело проходит последовательно все её точки. В каждой точке траектории оно находится в определённые моменты времени и имеет какую-то скорость.

Мгновенной скоростью называют скорость тела в данный момент времени в данной точке траектории.

Предположим, некоторое тело совершает неравномерное движение (рис. 13), его скорость в точке O можно определить следующим образом: выделим на траектории участок AB , внутри которого находится точка O . Перемещение тела на этом участке — $\Delta \vec{r}$ совершено за время t_1 . Средняя скорость движения на этом участке — $\vec{v}_{\text{ср.1}} = \frac{\Delta \vec{r}_1}{t_1}$.

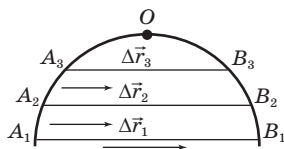


Рис. 13

Уменьшим перемещение тела. Пусть оно равно $\Delta \vec{r}_2$, а время движения — t_2 . Тогда средняя скорость за это время: $\vec{v}_{\text{ср.2}} = \frac{\Delta \vec{r}_2}{t_2}$. Ещё уменьшим перемещение, средняя скорость на этом участке: $\vec{v}_{\text{ср.3}} = \frac{\Delta \vec{r}_3}{t_3}$.

При дальнейшем уменьшении перемещения и соответственно времени движения тела они станут такими маленькими, что прибор, например спидометр, перестанет фиксировать изменение скорости, и движение за этот малый промежуток времени можно считать равномерным. Средняя скорость на этом участке и есть мгновенная скорость тела в точке O .

Таким образом, **мгновенной скоростью называют предел, к которому стремится отношение малого перемещения ($\Delta \vec{r}$) к малому промежутку времени Δt , за которое это перемещение произошло:** $\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$. Поскольку скорость

тела является непрерывной функцией времени движения, то можно говорить о том, что она равна первой производной перемещения по времени: $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d(\Delta \vec{r})}{dt}$.

Единица скорости: $[v] = \frac{[\Delta r]}{[\Delta t]}$; $[v] = \frac{1 \text{ м}}{1 \text{ с}} = 1 \text{ м/с}$.

За единицу скорости принимается 1 м/с — скорость такого равномерного движения, при котором тело за 1 с совершает перемещение 1 м.

3. Относительность скорости. Значение скорости тела зависит от выбора системы отсчёта. Так, скорость пассажира автобуса, перемещающегося от задней двери к передней, будет различной в системе отсчёта, связанной с автобусом, и в системе отсчёта, связанной с домами на улице. Скорость тела в неподвижной системе отсчёта \vec{v} равна сумме его скорости относительно подвижной системы отсчёта \vec{v} и скорости подвижной системы отсчёта относительно неподвижной \vec{v}_2 : $\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$. Это равенство называется **законом сложения скоростей**.

4. Ускорение. При неравномерном движении скорость тела изменяется, при этом изменение скорости может происходить с разной быстротой. Быстрота изменения скорости характеризуется физической величиной, называемой ускорением.

Если в какой-то момент времени t_1 материальная точка имела скорость, равную \vec{v}_1 , а в момент времени t_2 — скорость \vec{v}_2 . За промежуток времени $t = t_2 - t_1$ скорость материальной точки изменилась на $\Delta\vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$. При уменьшении промежутка времени t отношение $\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$ будет стремиться к некоторому постоянному значению.

Предел отношения изменения скорости материальной точки к бесконечно малому промежутку времени, за который это изменение произошло, называют ускорением

a : $\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$. Ускорение равно производной от скорости

по времени: $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$.

Единица ускорения $[a] = [v]/[t]$; $[a] = 1 \text{ м/с}/1 \text{ с} = 1 \text{ м/с}^2$. 1 м/с^2 — это такое ускорение, при котором скорость тела изменяется за 1 с на 1 м/с.

Направление ускорения совпадает с направлением изменения скорости движения.

Значение ускорения материальной точки не зависит от выбора инерциальной системы отсчёта.

Равномерное прямолинейное движение

1. Равномерное прямолинейное движение — движение, при котором тело за **любые равные** промежутки времени совершает одинаковые перемещения.

Равномерное движение — идеализация, поскольку практически невозможно создать такие условия, чтобы движение тела было равномерным в течение достаточно большого промежутка времени. Реальное движение может лишь приближаться к равномерному движению с той или иной степенью точности.

2. Перемещение при равномерном движении. Равномерное движение — это движение с постоянной скоростью.

Если, двигаясь равномерно и прямолинейно, тело за время t совершило перемещение $\Delta \vec{r}$, то скорость его движения \vec{v} равна $\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{t}$.

Зная скорость равномерного движения, можно найти перемещение за любой промежуток времени: $\vec{s} = \vec{v}t$. Вектор скорости и вектор перемещения направлены в одну сторону — в сторону движения тела.

3. Уравнение для координаты равномерного движения. Уравнение зависимости координаты тела от времени при равномерном движении запишем, используя выражение для проекции перемещения на координатную ось Ox (рис. 14). На рисунке x_0 — координата начальной точки перемещения, x — координата конечной точки перемещения. Проекция перемещения равна разности координат конечной и начальной точек: $\Delta r_x = x - x_0$. С другой

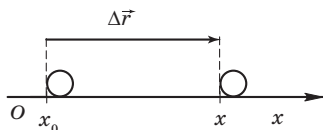


Рис. 14

стороны, проекция перемещения равна проекции скорости,

умноженной на время, т.е. $\Delta r_x = v_x t$. Откуда $x - x_0 = v_x t$ или $x = x_0 + v_x t$. Если начальная координата $x_0 = 0$, то $x = v_x t$.

Полученная формула позволяет определить координату тела при равномерном движении в любой момент времени, если известны начальная координата и проекция скорости движения.

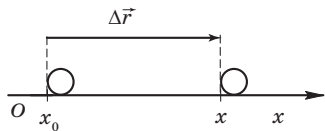


Рис. 15

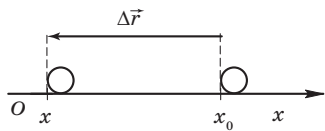


Рис. 16

Проекция скорости может быть как положительной, так и отрицательной. Проекция скорости положительна, если направление движения совпадает с положительным направлением оси ОХ (рис. 15). В этом случае $x > x_0$. Проекция скорости отрицательна, если тело движется против положительного направления оси ОХ (рис. 16). В этом случае $x < x_0$.

4. Графическое представление равномерного движения. Зависимость характеристик равномерного движения от времени можно представить графически.

Предположим, что тело движется из начала координат вдоль положительного направления оси ОХ с постоянной скоростью. Проекция скорости на ось ОХ равна 6 м/с. Уравнение движения в этом случае имеет вид: $x = 6 \text{ м/с} \cdot t$. Графиком такой зависимости является прямая линия, проходящая через начало координат (рис. 17).

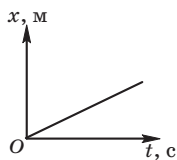


Рис. 17

На рисунке 18 приведён график зависимости координаты от времени, соответствующий данному уравнению движения.

Если в начальный момент времени координата тела $x_0 = 4 \text{ м}$, а проекция его скорости $v_x = 6 \text{ м/с}$, то уравнение движения имеет вид: $x = 4 \text{ м} + 6 \text{ м/с} \cdot t$. Это тоже линейная зависимость координаты от скоро-

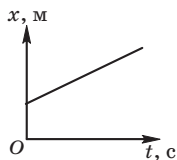


Рис. 18

сти, и её графиком является прямая линия, проходящая через точку, для которой $t = 0$, $x = 4$ м.

В том случае, если проекция скорости отрицательна, уравнение движения имеет вид: $x = 4 \text{ м} - 6 \text{ м/с} \cdot t$. График зависимости координаты такого движения от времени представлен на рисунке 19.

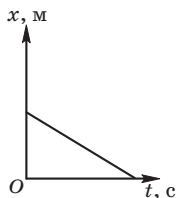


Рис. 19

Таким образом, движение тела может быть описано аналитически, т.е. с помощью уравнения движения (уравнения зависимости координаты тела от времени), и графически, т.е. с помощью графика зависимости координаты тела от времени.

Если $x > x_0$, то $v_x > 0$, если $x < x_0$, то $v_x < 0$.

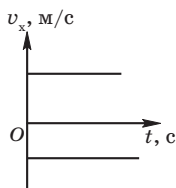


Рис. 20

График зависимости проекции скорости равномерно прямолинейного движения от времени представлен на рисунке 20.

Равноускоренное прямолинейное движение

1. Скорость точки при равноускоренном движении.

Равноускоренным движением называют движение, при котором скорость тела за любые равные промежутки времени изменяется на одно и то же значение.

Равноускоренное движение — это движение с постоянным ускорением.

Если в начальный момент времени $t_0 = 0$ скорость тела равна \vec{v}_0 , а в некоторый момент времени t она стала равной \vec{v} , то изменение скорости за промежуток времени $t - t_0 = t$ равно $\vec{v} - \vec{v}_0$ (рис. 21). Изменение скорости за единицу времени равно: $\frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$. Эта величина и есть ускорение тела, она характеризует быстроту изменения скорости

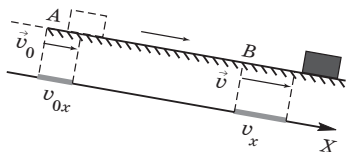


Рис. 21

$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$.

Преобразовав формулу ускорения, можно получить выражение для скорости тела при равноускоренном движении: $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$. Если начальная скорость тела $v_0 = 0$, то $\vec{v} = \vec{a}t$.

Чтобы определить значение скорости равноускоренного движения в любой момент времени, следует записать уравнение для проекции скорости на ось ОХ. Оно имеет вид: $v_x = v_{0x} + a_x t$; если $v_{0x} = 0$, то $v_x = a_x t$.

2. Графики зависимости характеристик равноускоренного движения от времени. Как видно из формулы скорости равноускоренного движения, она линейно зависит от времени. Графиком зависимости модуля скорости от времени является прямая, составляющая некоторый угол с осью абсцисс (осью времени).

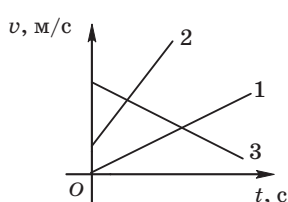


Рис. 22

На рисунке 22 приведены графики зависимости модуля скорости от времени.

График 1 соответствует движению без начальной скорости с ускорением, направленным так же, как и скорость; график 2 — движению с начальной скоростью v_{02} и с ускорением, направленным так же, как и скорость; график 3 — движению с начальной скоростью v_{03} и с ускорением, направленным в сторону, противоположную направлению скорости.

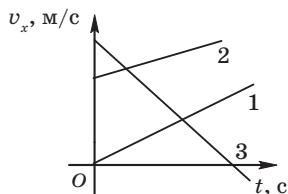


Рис. 23

На рисунке 23 приведены графики зависимости проекции скорости равноускоренного движения от времени.

График 1 соответствует движению без начальной скорости с ускорением, направленным вдоль положительного направления оси Х; график 2 — движению с начальной скоростью v_{02} , с ускорением и скоростью, направленными вдоль положительного направления оси Х; график 3 — движению с начальной скоростью v_{03} ; до момента времени t_0 направление скорости совпадает с положительным направлением оси Х, ускорение направлено в противополо-

ложную сторону. В момент времени t_0 скорость равна нулю, а затем и скорость, и ускорение направлены в сторону, противоположную положительному направлению оси X .

На рисунке 24 приведены графики зависимости проекции ускорения равноускоренного движения от времени.

График 1 соответствует движению, проекция ускорения которого положительна, график 2 — движению, проекция ускорения которого отрицательна.

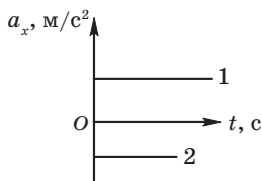


Рис. 24

3. Перемещение точки при равноускоренном движении.

Формулу перемещения тела при равноускоренном движении можно получить, используя график зависимости проекции скорости этого движения от времени (рис. 25).

Выделим на графике малый участок ab и опустим перпендикуляры из точек a и b на ось абсцисс. Если промежуток времени Δt , соответствующий участку cd на оси абсцисс мал, то можно считать, что скорость в течение этого промежутка времени не изменяется и тело движется равномерно. В этом случае фигура $cabd$ мало отличается

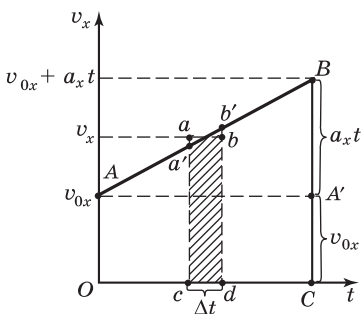


Рис. 25

от прямоугольника и её площадь численно равна проекции перемещения тела за время, соответствующее отрезку cd .

На такие полосы можно разбить всю фигуру $OABC$ и её площадь равна сумме площадей всех полосок. Следовательно, проекция перемещения тела за время t численно равна площади трапеции $OABC$. Площадь трапеции равна произведению полусуммы её оснований на высоту:

$$\Delta r_x = \frac{1}{2}(OA + BC)OC.$$

Как видно из рисунка, $OA = v_{0x}$, $BC = v_x$, $OC = t$. Отсюда следует, что проекция перемещения выражается формулой:

$$\Delta r_x = \frac{1}{2}(v_x + v_{0x})t.$$

Так как $v_x = v_{0x} + a_x t$, то $\Delta r_x = \frac{1}{2}(2v_{0x} + a_x t)t$. Отсюда:

$$\Delta r_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}.$$

Если начальная скорость равна нулю, то формула имеет вид: $\Delta r_x = \frac{at^2}{2}$. Проекция перемещения рав-

на разности координат $\Delta r_x = x - x_0$, поэтому: $x - x_0 = v_{0x}t + \frac{at^2}{2}$,

$$\text{или } x = x_{0x} + v_{0x}t + \frac{at^2}{2}.$$

Полученная формула позволяет определить положение (координату) тела в любой момент времени, если известны начальная скорость, начальная координата и ускорение.

4. Расчёт тормозного пути. На практике часто используют формулу $v_x^2 - v_{0x}^2 = 2a_x \Delta r_x$ или $v^2 - v_0^2 = 2al$.

Если начальная скорость тела равна нулю, то: $v_x^2 = 2a_x \Delta r_x$.

Полученная формула позволяет рассчитать тормозной путь транспортных средств, т.е. путь, который проезжает, например, автомобиль до полной остановки. При некотором ускорении движения, которое зависит от массы автомобиля и силы тяги двигателя, тормозной путь тем больше, чем больше начальная скорость автомобиля.

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ 1

1. Два автомобиля движутся по прямолинейной дороге — один со скоростью \vec{v} , второй — со скоростью $(-3\vec{v})$. Какова скорость второго автомобиля относительно первого?

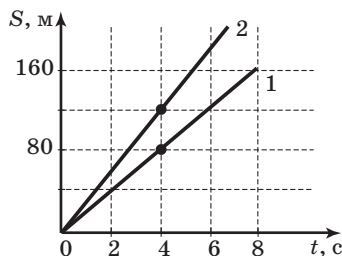
1) \vec{v}

3) $-4\vec{v}$

2) $-2\vec{v}$

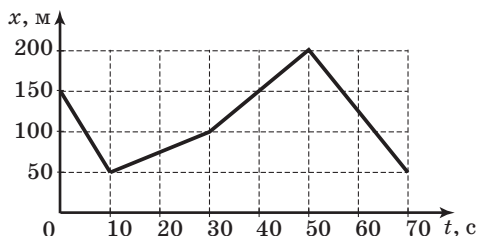
4) $4\vec{v}$

2. На рисунке представлены графики зависимости пройденного пути от времени для двух тел. Скорость второго тела \vec{v}_2 больше скорости первого тела \vec{v}_1 на величину $\Delta \vec{v}$, равную

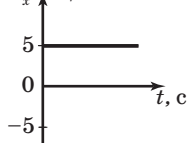


- 1) 10 м/с
2) 20 м/с
3) 25 м/с
4) 40 м/с
3. При прямолинейном равноускоренном движении с нулевой начальной скоростью путь, пройденный телом за третью секунду с начала движения по сравнению с путём за первую секунду,
- 1) больше в 3 раза
2) больше в 4 раза
3) больше в 5 раз
4) больше в 9 раз
4. Зависимость координаты от времени для некоторого тела записывается уравнением $x = 8t - t^2$, где все величины выражены в СИ. В какой момент времени скорость тела равна нулю?
- 1) 8 с
2) 4 с
3) 3 с
4) 0 с
5. Зависимость координаты от времени для некоторого тела записывается уравнением $x = 8t - t^2$, где все величины выражены в СИ. Чему равна координата тела в момент времени, когда его скорость равна нулю?
- 1) 4 м
2) 8 м
3) 16 м
4) 0

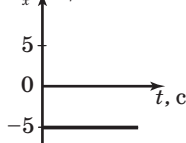
6. На рисунке представлен график зависимости проекции скорости от времени t . Какой из приведённых ниже графиков соответствует зависимости проекции скорости тела v_x в интервале времени от 30 до 50 секунд?



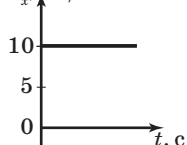
1) v_x , м/с



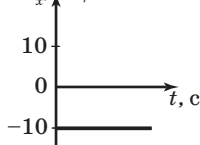
3) v_x , м/с



2) v_x , м/с



4) v_x , м/с



7. Установите соответствие между величинами в левом столбце и зависимостью значения величины от выбора системы отсчёта. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго и запишите выбранные цифры под соответствующими буквами.

А) скорость

1) зависит

Б) ускорение

2) не зависит

В) путь

Ответ:

А	Б	В

8. Тело, имея начальную скорость 4 м/с, движется равноускоренно с ускорением 2 м/с^2 , направление которого совпадает с направлением скорости. Какое из приведённых уравнений описывает зависимость от времени модуля перемещения и модуля скорости тела? Установите соответствие между физическими величинами и формулами их зависимости от времени. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго и запишите выбранные цифры под соответствующими буквами.

- А) уравнение модуля перемещения
Б) уравнение модуля скорости

- 1) $v = 4 + 2t$
2) $v = 4 - 2t$
3) $v = 2 + 4t$
4) $s = 4 + 2t^2$
5) $s = 4t + t^2$

Ответ:

А	Б

9. Ученик исследовал движение бруска по наклонной плоскости и определил, что брусок, начиная движение из состояния покоя, проходит расстояние 30 см с ускорением $0,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

Установите соответствие между физическими величинами, полученными при исследовании движения бруска (см. левый столбец), и уравнениями, выражающими эти зависимости, приведёнными в правом столбце.

К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго столбца и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

ЗАВИСИМОСТИ

- А) зависимость пути, пройденного бруском, от времени
Б) зависимость модуля скорости бруска от пройденного пути

УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ

- 1) $l = At^2$, где $A = 0,4 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$
2) $l = Bt^2$, где $B = 0,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$
3) $v = C\sqrt{l}$, где $C = 1,3 \frac{\sqrt{\text{м}}}{\text{с}^2}$
4) $v = Dl$, где $D = 1,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$

Ответ:

А	Б

Свободное падение. Ускорение свободного падения. Движение тела, брошенного под углом к горизонту

1. Ускорение свободного падения.

Свободное падение — падение тел в безвоздушном пространстве под действием притяжения к Земле. Наблюдения свидетельствуют о том, что скорость свободно падающего



тела увеличивается с течением времени. Поскольку на свободно падающее тело действует единственная сила — сила тяжести, то его ускорение постоянно, т.е. свободное падение — движение равноускоренное.

Опыт показывает, что все свободно падающие тела движутся с одинаковым ускорением. Так, если вертикально расположенную трубку, в которой находятся три тела, имеющие разную массу: перышко, кусочек пробки и дробинку, перевернуть, то эти тела будут падать на дно трубки. При этом, если в трубке есть воздух, то из-за сопротивления воздуха они упадут не одновременно: дробинка упадёт раньше всех, а перышко позже всех тел. Если же воздух из трубки откачать, то тела упадут на дно одновременно (рис. 26).

Рис. 26

Ускорение свободного падения обозначается буквой g , оно имеет одинаковое для всех тел значение при одинаковых условиях. Для широты Москвы оно равно $9,81 \text{ м/с}^2$ или 10 м/с^2 .

Значение ускорения свободного падения зависит от географической широты местности. Это объясняется тем, что сила тяжести, действующая на данное тело на экваторе, меньше, чем сила тяжести, действующая на него, на полюсе. Поэтому ускорение свободного падения на полюсе равно $9,83 \text{ м/с}^2$, а на экваторе — $9,78 \text{ м/с}^2$.

Ускорение свободного падения зависит от высоты тела над поверхностью Земли. Чем выше поднято тело, тем слабее оно притягивается к Земле, тем меньше ускорение свободного падения.

2. Уравнения зависимости характеристик свободного падения тела от времени. Уравнения зависимости от времени модуля скорости, пути и модуля перемещения свободно падающего тела с высоты h (рис. 27) представлены ниже.
 $v = gt$; $l = gt^2/2$; $|\Delta \vec{r}| = gt^2/2$.

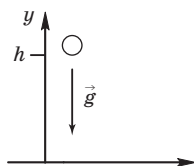


Рис. 27

Уравнения зависимости от времени проекции скорости и координаты свободно падающего тела с некоторой высоты:

$$v_y = g_y t; y = y_0 + g_y t^2/2.$$

Знаки проекций зависят от направления оси координат и начала координат. В соответствии с рисунком $v_y = -gt$; $y = h - gt^2/2$.

3. Графики зависимости характеристик свободного падения тела от времени.

График зависимости модуля скорости от времени при свободном падении приведён на рисунке (рис. 28).

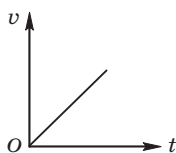


Рис. 28

График зависимости проекции скорости от времени при свободном падении приведены на рисунке (ось Y направлена вертикально вверх) (рис. 29).

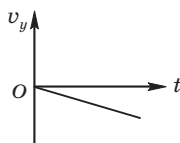


Рис. 29

4. Уравнения движения тела, брошенного вертикально вверх. Тело, брошенное вертикально вверх, тоже движется равноускоренно с ускорением g , которое направлено вертикально вниз. В этом случае, в отличие от свободного падения, скорость и ускорение движения направлены в противоположные стороны (рис. 30).

Уравнения зависимости от времени модуля скорости, пути и модуля перемещения тела, брошенного вертикально вверх с начальной скоростью v_0 :

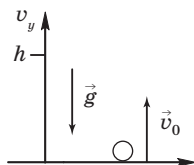


Рис. 30

$$v = v_0 - gt; l = v_0 t - gt^2/2; |\Delta r| = v_0 t - gt^2/2, \text{ при } t \leq t_0,$$

где $t_0 = \frac{v_0}{g}$

Записанная формула зависимости пути от времени может быть использована только при движении тела в одну сторону (в данном случае вверх).

Уравнения зависимости от времени проекции скорости и координаты тела, брошенного вертикально вверх с начальной скоростью v_0 (ось Y направлена вертикально вверх): $v_y = v_{0y} + g_y t$; $y = y_0 + v_{0y} t + g_y t^2 / 2$. Если тело брошено из начала координат, то $y_0 = 0$ и $y = v_0 t - gt^2 / 2$.

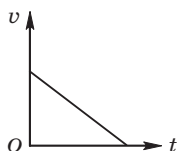


Рис. 31

$$v_y = v_0 - gt.$$

График зависимости модуля скорости от времени при движении тела вертикально вверх приведён на рисунке 31.

5. Движение тела, брошенного под углом к горизонту.

Если тело в поле тяготения Земли брошено под углом α к горизонту (рис. 32), то оно будет двигаться по криволинейной траектории. В отсутствие сопротивления воздуха этой траекторией является парабола.

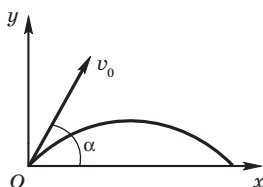


Рис. 32

В данном случае движение тела следует рассматривать в двумерной системе координат. Свяжем систему отсчёта с Землёй, начало координат с поверхностью Земли, ось OX на-

правлена горизонтально, ось OY — вертикально вверх. Пусть начальная скорость тела равна \vec{v}_0 . Проекции начальной скорости: на ось OX — v_{0x} , на ось OY — v_{0y} . При этом $v_{0x} = v_0 \cos \alpha$; $v_{0y} = v_0 \sin \alpha$.

Проекция скорости тела на ось OX с течением времени не изменяется, поскольку силы, действующие на него в горизонтальном направлении, отсутствуют, т.е. в любой момент времени $v_x = v_0 \cos \alpha$. В вертикальном направлении на тело действует постоянная сила тяжести, поэтому проекция скорости на ось OY изменяется в соответствии с законом равноускоренного движения, т.е. $v_y = v_0 \sin \alpha - gt$ (ось OY направлена вверх, ускорение свободного падения направлено вниз). При этом при подъёме тела проекция

его скорости на ось OY будет уменьшаться, в верхней точке траектории она станет равной нулю, а при движении вниз будет увеличиваться.

Уравнения для координат имеют следующий вид: $x = x_0 + v_0 \cos \alpha t$ и $y = y_0 + v_0 \sin \alpha t - gt^2/2$.

Часто бывает необходимо рассчитать максимальную высоту подъёма тела и дальность его полёта. Дальность полёта $l = x - x_0 = v_0 \cos \alpha t$, а максимальная высота подъёма

$$H = y - y_0 = v_0 \sin \alpha t - gt^2/2 \text{ или } H = \frac{(v_0 \sin \alpha)^2}{2g}. \text{ При этом}$$

следует помнить, что время подъёма тела на максимальную высоту равно половине времени его движения в горизонтальном направлении (до падения на землю).

Траекторией движения тела, брошенного под углом к горизонту, является парабола. Выразим время из равенства $x = x_0 + v_0 \cos \alpha t$, предположив, что тело брошено из начала координат: $t = \frac{x}{v_0 \cos \alpha}$. Подставим это выражение

$$\text{в формулу } y = y_0 + v_0 \sin \alpha t - gt^2/2, \text{ считая, } y_0 = 0:$$

$$y = \frac{v_0 \sin \alpha}{v_0 \cos \alpha} \frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} = x \operatorname{tg} \alpha - \frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha}. \text{ Из формулы вид-}$$

но, что координата y пропорциональна квадрату координаты x , следовательно, записанное выше равенство представляет собой уравнение параболы.

6. Движение тела, брошенного горизонтально. Если находящееся на некоторой высоте относительно поверхности Земли тело (например, мяч, лежащий на столе) толкнуть в горизонтальном направлении, то оно, приобретая в этом направлении некоторую скорость v , будет падать на землю (рис. 33).

Рассмотрим движение тела в системе отсчёта, связанной с Землёй. За начало отсчёта координат примем точку на поверхности Земли, ось OX направим горизонтально, ось OY — вертикально вверх. Проекция скорости тела на ось OX оста-

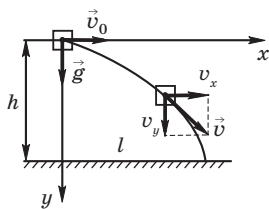


Рис. 33

ётся неизменной и равной начальной скорости, поэтому координата $x = v_0 t$. В вертикальном направлении на тело действует сила тяжести, поэтому проекция скорости на ось OY возрастает: $v_y = gt$. Поскольку начальная координата тела равна y_0 , то значение координаты в любой момент времени вычисляется по формуле: $y = y_0 + gt^2/2$. Траекторией движения тела в этом случае также является парабола. Это можно показать, выразив время движения из формулы $x = v_0 t : t = x/v_0$ и подставив это выражение в формулу $y = y_0 + \frac{gt^2}{2}$. Получим: $y = y_0 + \frac{g}{2v_0^2} x^2$. Это равенство выражает квадратичную зависимость координаты Y от координаты X , откуда следует, что траекторией движения тела, брошенного горизонтально, является парабола.

Движение материальной точки по окружности

1. Характеристики равномерного движения точки по окружности.

Движением тела по окружности называют движение, траекторией которого является окружность. По окружности движется, например, конец стрелки часов, точки лопасти вращающейся турбины, вращающегося вала двигателя и др.

При движении по окружности направление скорости непрерывно изменяется. При этом модуль скорости тела может изменяться, а может оставаться неизменным. Движение, при котором изменяется только направление скорости, а её модуль сохраняется постоянным, называется **равномерным движением тела по окружности**. Под телом в данном случае имеют в виду материальную точку.

Движение тела по окружности характеризуется определёнными величинами. К ним относятся, прежде всего, период и частота обращения. **Период обращения тела по окружности T** — время, в течение которого тело совершает один полный оборот. Единица периода — $[T] = 1 \text{ с}$.

Частота обращения (n) — число полных оборотов тела за одну секунду: $n = N/t$. Единица частоты обращения —

$[n] = 1 \text{ с}^{-1} = 1 \text{ Гц}$ (герц). Один герц — это такая частота, при которой тело совершает один оборот за одну секунду.

Связь между частотой и периодом обращения выражается формулой: $n = 1/T$.

Пусть некоторое тело, движущееся по окружности, за время t переместилось из точки A в точку B (рис. 34). При перемещении тела из точки A в точку B радиус-вектор OA повернётся на угол φ .

Быстроту обращения тела характеризуют **угловая** и **линейная скорости**.

Угловая скорость ω — физическая величина, равная отношению малого угла поворота $\Delta\varphi$ радиус-вектора к малому промежутку времени, за которое этот поворот произошёл: $\omega = \Delta\varphi/\Delta t$. Единица угловой скорости — радиан в секунду, т.е. $[\omega] = 1 \text{ рад/с}$.

За время, равное периоду обращения, угол поворота радиус-вектора равен 2π . Поэтому средняя угловая скорость $\omega = 2\pi/T$. Она рассчитывается по этой же формуле при равномерном движении точки по окружности.

Линейная скорость тела v — скорость, с которой тело движется вдоль траектории. Линейная скорость в общем случае равна отношению длины малой дуги к малому промежутку времени, за который эта дуга пройдена: $v = \Delta l / \Delta t$. Она всегда направлена по касательной к траектории.

При равномерном движении по окружности линейная скорость постоянна по модулю, меняется только по направлению. Она равна отношению пути, пройденному телом вдоль траектории, ко времени, за которое этот путь пройден: $v = l / t$. За один оборот точка проходит путь, равный длине окружности. Поэтому $v = 2\pi R / T$. Связь между линейной и угловой скоростью выражается формулой: $v = \omega R$.

Из этого равенства следует, что, чем дальше от центра окружности расположена точка вращающегося тела, тем больше её линейная скорость.

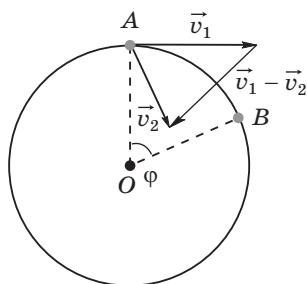


Рис. 34

2. Ускорение точки, движущейся по окружности. Ускорение тела равно отношению изменения его скорости ко времени, за которое оно произошло. В общем случае при движении тела по окружности могут одновременно изменяться направление скорости и её модуль. Обратимся к рисунку 34. Пусть в начальный момент точка, движущаяся по окружности, имела скорость \vec{v}_0 , а в момент времени t — скорость \vec{v} . Разность скоростей при этом равна $\Delta\vec{v} = \vec{v} - \vec{v}_0$. Ускорение \vec{a} направлено так же, как вектор изменения скорости \vec{v} . Это ускорение обусловлено изменением скорости как по модулю, так и по направлению. Вектор ускорения можно разложить на два вектора: один из которых представляет собой тангенциальное (касательное) ускорение, оно характеризует изменение скорости по модулю и направлено по касательной к окружности в данной точке. Другой вектор представляет собой нормальное ускорение, оно характеризует изменение скорости по направлению и направлено к центру окружности. Его называют **центростремительным ускорением**.

Центростремительное ускорение при равномерном движении тела по окружности — физическая величина, равная отношению квадрата линейной скорости к радиусу окружности: $a = \frac{v^2}{R}$. Так как $v = \omega R$, то $a = \omega^2 R$.

При движении тела по окружности его центростремительное ускорение постоянно по модулю и направлено к центру окружности.

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ 2

1. Тело брошено вертикально вверх с начальной скоростью 20 м/с. Каков модуль скорости тела через 0,5 с после начала движения? Сопротивление воздуха не учитывать.
 - 1) 10 м/с
 - 2) 15 м/с
 - 3) 17,5 м/с
 - 4) 20 м/с

2. Тело свободно падает с некоторой высоты с начальной скоростью, равной нулю. Время, за которое тело пройдёт путь L , прямо пропорционально
- | | |
|----------|---------------|
| 1) L^2 | 3) L |
| 2) $1/L$ | 4) \sqrt{L} |
3. Небольшой камень брошен горизонтально со скоростью 5 м/с с высоты 5 м. С какой скоростью упадёт камень на землю?
- | | |
|-----------|-----------|
| 1) 5 м/с | 3) 11 м/с |
| 2) 10 м/с | 4) 15 м/с |
4. Мяч, брошенный под углом 45° к горизонту, упал обратно на землю в 20 м от места бросания. Сколько времени прошло от момента броска до падения мяча на землю, если максимальная высота подъёма мяча равна 5 м?
- | | |
|----------|--------|
| 1) 0,5 с | 3) 2 с |
| 2) 1 с | 4) 4 с |
5. Две материальные точки движутся по окружностям радиусами R_1 и $R_2 = 2R_1$ с одинаковыми по модулю скоростями. Их периоды обращения по окружностям связаны соотношением
- | |
|------------------|
| 1) $T_1 = T_2/2$ |
| 2) $T_1 = T_2$ |
| 3) $T_1 = 2T_2$ |
| 4) $T_1 = 4T_2$ |
6. Диск радиусом 20 см равномерно вращается вокруг своей оси. Скорость точки, находящейся на расстоянии 15 см от центра диска, равна 1,5 м/с. Скорость крайних точек диска равна
- | |
|------------|
| 1) 4 м/с |
| 2) 2 м/с |
| 3) 1,5 м/с |
| 4) 0,2 м/с |

7. В момент $t = 0$ шарик бросили вертикально вверх с начальной скоростью \vec{v}_0 (см. рисунок). Сопротивление воздуха пренебрежимо мало.

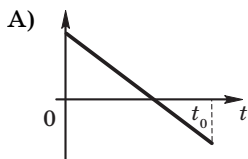


Установите соответствие между графиками и физическими величинами, зависимости которых от времени эти графики могут представлять (t_0 — время полёта).

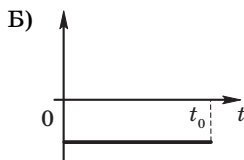
К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

ГРАФИКИ

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ



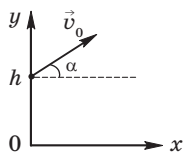
- 1) координата y шарика
- 2) проекция скорости шарика v_y
- 3) проекция ускорения шарика a_y
- 4) модуль силы тяжести, действующий на шарик



Ответ:

А	Б

8. В момент $t = 0$ мячик бросают с начальной скоростью \vec{v}_0 под углом α к горизонту с балкона высотой h (см. рисунок).

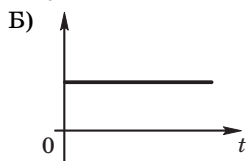
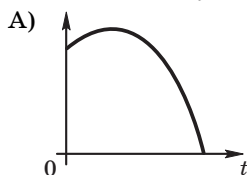


Графики А и Б представляют собой зависимости физических величин, характеризующих движение мячика в процессе полёта, от времени t . Установите соответствие между графиками и физическими величинами, зависимости которых от времени эти графики могут представлять. (Сопротивлением воздуха пренебречь. Потенциальная энергия мячика отсчитывается от уровня $y = 0$.)

К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию из второго столбца и запишите

в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

ГРАФИКИ



ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

- 1) координата x мячика
- 2) проекция скорости мячика на ось x
- 3) кинетическая энергия мячика
- 4) координаты y мячика

Ответ:

А	Б

9. Материальная точка движется с постоянной скоростью по окружности радиуса R . Как изменятся перечисленные в первом столбце физические величины, если скорость точки увеличится?

ГРАФИКИ

- А) Угловая скорость
- Б) Центробежное ускорение
- В) Период обращения по окружности

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

- 1) увеличится
- 2) уменьшится
- 3) не изменится

Ответ:

А	Б	В

ДИНАМИКА

Первый закон Ньютона.

Инерциальные системы отсчёта

1. Первый закон Ньютона. В основе классической механики лежат три закона Ньютона, которые были сформулированы им при обобщении результатов наблюдений и опытов в конце XVII в.

Первый закон, включённый Ньютоном в систему законов, был открыт Галилео Галилеем и назван им законом инерции. Закон инерции формулируется следующим образом: **если на тело не действуют другие тела, то оно либо находится в покое, либо движется равномерно прямолинейно.**

Галилей проделал мысленный эксперимент, который описал в своём научном труде «Диалог о двух главнейших системах мира — птолемеевой и коперниковой».

Рассуждения Галилея сводились к тому, что гладкий массивный шар будет самопроизвольно скатываться вниз по гладкой наклонной плоскости с возрастающей скоростью, и движение это будет продолжаться бесконечно долго в отсутствие сопротивления воздуха и трения шара о наклонную плоскость. Если же шару сообщить некоторую скорость, направленную вверх вдоль наклонной плоскости, то он будет двигаться вверх с уменьшающейся скоростью и в конце концов остановится. Если положить шар на гладкую горизонтальную поверхность, не поднимающуюся и не опускающуюся, и толкнуть его, то шар будет двигаться по этой поверхности сколь угодно долго с неизменной скоростью, поскольку нет причин, которые заставили бы его замедлять или ускорять своё движение.

В итоге Галилей сделал вывод о том, что, **когда на тело не действуют другие тела, оно либо находится в покое, либо движется равномерно прямолинейно.** Это и есть закон инерции.

В природе не существует отдельных изолированных тел. Любое тело окружено другими телами, тела взаимодействуют друг с другом.

Несмотря на то что тела взаимодействуют с другими телами, они могут находиться в покое, а могут двигаться равномерно и прямолинейно. Например, пусть на нити висит груз. Он взаимодействует с Землёй, и со стороны Земли на него действует сила тяжести (F_T), направленная вниз. Кроме того, груз взаимодействует с нитью, и со стороны нити на него действует сила, направленная вертикально вверх (F). При этом груз находится в покое.

Если перерезать нить, то груз будет взаимодействовать только с Землёй и под действием силы тяжести начнёт падать вниз с ускорением.

Следовательно, когда груз покоился, действие Земли и нити компенсировали или уравнивали друг друга. Когда же действовала одна сила тяжести, груз двигался с ускорением. Таким образом, можно сказать, что **тело сохраняет состояние покоя, если действие на него других тел скомпенсировано** (относительно Земли).

Если представить себе, что мимо висящего неподвижно груза движется равномерно и прямолинейно какое-либо тело, например тележка. Относительно системы отсчёта, связанной с этой тележкой, груз будет двигаться с постоянной скоростью, равномерно и прямолинейно. Следовательно, при компенсации действия на тело других тел оно может либо покоиться, либо двигаться равномерно и прямолинейно.

2. Инерциальные системы отсчёта. Возникает вопрос, во всех ли системах отсчёта тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, если на него не действуют другие тела или действие других тел скомпенсировано. Предположим, что в поезде на полу лежит мяч. Пока поезд покоится или движется равномерно и прямолинейно, мяч остаётся в прежнем положении (в покое). Когда поезд начинает набирать скорость, т.е. двигаться с ускорением, направленным в ту же сторону, что и скорость поезда, то мяч покатится в противоположную сторону. Несмотря на то что мяч по-прежнему взаимодействует с Землёй и полом вагона и действующие на него силы ском-

пенсированы, его поведение изменилось: в системе отсчёта, связанной с поездом, мяч приобрёл ускорение.

Таким образом, тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, если на него не действуют другие тела или действие других тел скомпенсировано только в определённых системах отсчёта. С учётом этого первый закон Ньютона формулируется следующим образом:

— существуют такие системы отсчёта, относительно которых поступательно движущееся тело сохраняет свою скорость постоянной, если на него не действуют другие тела или действия других тел компенсируются.

Приведённая формулировка отличается от формулировки первого закона, данной самим Ньютоном, которая звучит так: «Всякое тело продолжает удерживаться в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменять это состояние».

Явление сохранения скорости тела постоянной (в том числе и равной нулю) называют **явлением инерции**. Системы отсчёта, относительно которых тела движутся с постоянной скоростью при компенсации внешних воздействий, называются **инерциальными**.

Возникает вопрос, какие же реальные системы отсчёта можно считать инерциальными. В наших примерах такой системой отсчёта является система отсчёта, связанная с Землёй, и системы отсчёта, движущиеся относительно Земли равномерно и прямолинейно.

Существуют и такие системы отсчёта, которые движутся с ускорением. Системы отсчёта, движущиеся с ускорением относительно инерциальной системы отсчёта, называют **неинерциальными**.

Значение первого закона Ньютона состоит в том, что он устанавливает существование инерциальных систем отсчёта (как таких, относительно которых тела движутся с постоянной скоростью при компенсации внешних воздействий). Именно для таких систем отсчёта справедливы все другие законы Ньютона.

Системы отсчёта, движущиеся с ускорением относительно инерциальной системы отсчёта, например относительно Земли, называют **неинерциальными**.

Масса тела. Плотность вещества

1. Взаимодействие тел. Действие тел друг на друга носит взаимный характер, т.е. имеет место взаимное действие тел или **взаимодействие** тел.

При взаимодействии происходит изменение состояния обоих тел: изменяется скорость обоих тел, т.е. оба тела приобретают ускорение. Это можно наблюдать с помощью простого опыта. Если две тележки, к одной из которых прикреплена пружина, соединить нитью, сжав пружину, а затем пережечь нить, то тележки, первоначально находившиеся в покое, приобретут некоторую скорость и разъедутся (рис. 35).

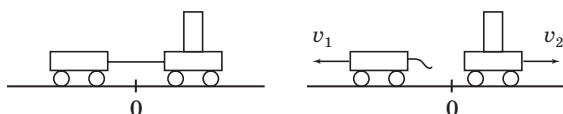


Рис. 35

Обе тележки в результате взаимодействия изменили свою скорость от нуля до некоторого значения, т.е. приобрели ускорение. Именно взаимодействие тел является причиной того, что они приобретают ускорения. Ускорения, которые тележки приобрели при взаимодействии, направлены в противоположные стороны.

2. Отношение ускорений взаимодействующих тел. Отношение модулей ускорений для двух взаимодействующих тел одинаково независимо от условий взаимодействия. Если два одинаковых по размерам цилиндра — алюминиевый и стальной связать нитью, установить на горизонтальный стержень, привести стержень во вращение, то цилиндры расположатся на раз-

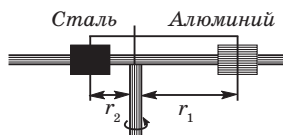


Рис. 36

ных, но определённых расстояниях от оси вращения (рис. 36).

Цилиндры взаимодействуют друг с другом посредством нити и движутся по окружностям радиусами r_1 и r_2 с центростремительными ускорениями, соответственно равными a_1 и a_2 . Ускорение стального цилиндра: $a_1 = \omega^2 r_1$. Ускорение алюминиевого цилиндра: $a_2 = \omega^2 r_2$.

Отношение модулей ускорений цилиндров равно:

$$\frac{a_2}{a_1} = \frac{r_2}{r_1}.$$

Измерение радиусов вращения цилиндров показывает, что их отношение равно 3, следовательно, и отношение ускорений равно 3, т.е. при взаимодействии алюминиевый шар приобретает ускорение в 3 раза большее, чем стальной.

3. Инертность. Изменение длины нити, её толщины, частоты вращения стержня приведёт к тому, что расстояния цилиндров от центра вращения будут другими, но их отношение останется прежним. Следовательно, отношение ускорений двух взаимодействующих тел зависит от самих этих тел.

Поскольку ускорение равно изменению скорости в единицу времени, то скорость тела, имеющего большее ускорение, изменяется при взаимодействии на большую величину. Говорят, что тело, скорость которого при взаимодействии изменилось на меньшую величину, более инертно, чем тело, скорость которого изменилась на меньшую величину. Можно сказать и так: более инертно то тело, которое при взаимодействии приобретает меньшее ускорение.

Свойство тела, состоящее в том, что для изменения скорости ему требуется определённое время, называют инертностью.

Из двух тел, изменяющих скорость на одну и ту же величину, более инертно то, которому для этого требуется большее время. Например, нагруженному грузовому автомобилю требуется для остановки большее время, чем легковому автомобилю, имеющему такую же скорость.

Понятие «инертность» следует отличать от понятия «инерция». Инертность — это свойство тела; а инерция — явление сохранения телом своей скорости в отсутствие действия на него других тел.

4. Масса тела.

Величина, характеризующая инертность тела и являющаяся мерой инертности, называется массой. Более инертное тело имеет большую массу, менее инертное тело имеет меньшую массу.

Если массы взаимодействующих тел m_1 и m_2 , то $\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}$, т.е. отношение модулей ускорений двух взаимодействующих тел равно обратному отношению их масс. В опыте с цилиндрами отношение их масс равно 3.

Чтобы измерить массу некоторого тела, нужно привести его во взаимодействие с другим телом, масса которого $m_{\text{эт}}$ условно принимается за единицу, и измерить ускорения, которые приобретут при взаимодействии данное тело и эталон. Тогда $\frac{m}{m_{\text{эт}}} = \frac{a_{\text{эт}}}{a}$ или $m = \frac{m_{\text{эт}} a_{\text{эт}}}{a}$.

Рассмотренный способ измерения массы используется на практике при определении массы очень больших тел (космических объектов) и очень маленьких тел (молекул, атомов и пр.).

Другим наиболее распространённым способом измерения массы тела является его взвешивание на равноплечных весах.

Единица массы является основной в Международной системе единиц (СИ).

За единицу массы в СИ принят 1 килограмм (1 кг) — это масса эталона, специально изготовленного из сплава платины и иридия цилиндра. Массу 1 кг имеет 1 л чистой воды при 15 °С.

Масса — величина инвариантная, т.е. её значение не зависит от выбора системы отсчёта.

Масса — аддитивна, т.е. масса тела равна сумме масс составляющих его частей:

$$m = m_1 + m_2 + \dots + m_n$$

Масса характеризует не только инертное свойство материи, но и другие свойства, например гравитационное. Мерой этого свойства тела масса выступает при взаимодействии тела с Землёй. Именно это позволяет измерять массу, взвешивая тела на рычажных весах.

5. Плотность вещества.

Плотность вещества ρ — величина, равная отношению массы тела к его объёму: $\rho = \frac{m}{V}$. Единица плотности — $[\rho] = 1 \text{ кг/м}^3$.

Значения плотности веществ указаны в таблицах, в них часто приводят значения плотности вещества в г/см^3 . $1 \text{ г/см}^3 = 1000 \text{ кг/м}^3$.

Сила. Второй закон Ньютона

1. Сила — характеристика взаимодействия тел. Ускорения взаимодействующих тел обратно пропорциональны их массам: $\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}$. Преобразовав это равенство, получаем: $m_1 a_1 = m_2 a_2$. В правой и левой частях равенства стоят одинаковые величины для двух взаимодействующих тел, причём значения ускорений тел не зависят от условий их взаимодействия. Следовательно, можно считать, что произведение массы тела и его ускорения характеризует взаимодействие тел и это произведение равно силе, действующей на тело со стороны другого взаимодействующего с ним тела, т.е.: $F = ma$.

Силой называют физическую величину, характеризующую взаимодействие тел и равную произведению массы тела и его ускорения. Поскольку ускорение векторная величина, а масса скалярная, то сила — векторная величина: $F = ma$.

Единица силы, в отличие от единицы массы, является производной единицей СИ. $[F] = [m][a]$; $[F] = 1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ м/с}^2$. $[F] = 1 \text{ Н}$ (1 ньютон).

Один ньютон — это такая сила, которая телу массой 1 кг сообщает ускорение 1 м/с^2 .

Результат действия силы зависит от её модуля, направления и точки приложения. Например, дверную ручку прикрепляют как можно дальше от петель, на которых она висит, поскольку, чем ближе к петлям подействовать силой, тем труднее дверь открыть.

Прибором для измерения силы служит *динамометр*. В соответствии с законом Гука удлинение пружины прямо пропорционально силе упругости, поэтому по удлинению пружины можно судить о приложенной к пружине силе, которая равна силе упругости.

2. Принцип суперпозиции сил. Обычно на тело действуют несколько сил. Например, на тело, падающее в воздухе, действуют сила тяжести и сила сопротивления воздуха; на груз, висящий на нити, действуют сила тяжести и сила упругости нити.

При этом *действие каждой силы не зависит от действия других, т.е. каждая сила сообщает телу такое ускорение, какое она сообщила бы ему в отсутствие действия других сил*. Это утверждение носит название **принципа независимости действия сил или принципа суперпозиции сил**. Поэтому при расчёте ускорения движения тела все действующие на него силы заменяют одной силой.

Равнодействующей силой называют силу, которая оказывает на тело такое же действие, как и все действующие на него силы вместе.

Равнодействующую силу находят по правилу сложения векторов, она равна геометрической сумме действующих на тело сил.

Если силы, действующие на тело, направлены по одной прямой в одну сторону, то $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$, а модуль равнодействующей равен сумме модулей действующих сил $F = F_1 + F_2$ (рис. 37).

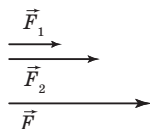


Рис. 37

Если силы, действующие на тело, направлены в разные стороны, то $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$, а модуль равнодействующей равен разности модулей действующих сил, то: $F = |F_1 - F_2|$ (рис. 38).

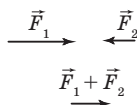


Рис. 38

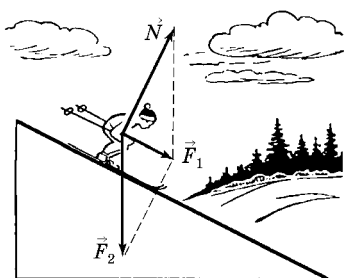


Рис. 39

Если силы направлены под углом друг к другу, то равнодействующая равна диагонали параллелограмма, построенного на действующих на тело силах как на сторонах или стороне треугольника, начало которой совпадает с началом вектора \vec{F}_1 , а конец с концом вектора \vec{F}_2 (рис. 39).

3. Второй закон Ньютона для материальной точки в ИСО. Выражение $\vec{F} = m\vec{a}$ представляет собой определение понятия силы. **Второй закон Ньютона** устанавливает зависимость ускорения одного из взаимодействующих тел от его массы и действующей на него силы.

Если на диск положить брусок массой m , прикрепить к нему пружину, соединённую с осью вращения диска, и привести диск во вращение с некоторой частотой, то пружина растянется на определённую длину. При этом ускорение бруска равно: $a = \omega^2 r$. Если оставить тот же брусок, а частоту вращения диска увеличить в 2 раза, то можно заметить, что удлинение пружины, а следовательно, и её ускорение тоже увеличится в 2 раза. При изменении частоты вращения диска в 3 раза удлинение пружины и ускорение бруска тоже увеличатся в 3 раза. Наблюдения и опыты свидетельствуют о том, что **ускорение, которое приобретает тело при взаимодействии, прямо пропорционально действующей на него силе.**

Если теперь увеличить в 2 раза массу бруска, то для того, чтобы растяжение пружины осталось прежним, необходимо в 2 раза уменьшить скорость вращения диска, т.е. в 2 раза уменьшить ускорение бруска. **Ускорение, которое приобретают тела под действием одинаковой силы, зависит от массы тел, оно обратно пропорционально массе тел.**

Например, грузовому автомобилю требуется большее время, чем легковому, для того чтобы, имея некоторую

одинаковую скорость, остановиться, выключив двигатель. Из этого примера следует, что чем больше масса тела, тем меньшее ускорение оно получает под действием некоторой постоянной силы.

Обобщив результаты рассмотренных опытов, можно сделать вывод о том, что ускорение \vec{a} , с которым движется тело, прямо пропорционально приложенной к телу силе

\vec{F} и обратно пропорционально массе тела m : $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$. На-

правление ускорения тела всегда совпадает с направлением действующей на него силы.

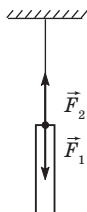
Записанное равенство представляет собой **второй закон Ньютона**.

Если на тело действуют несколько сил, то в формулу второго закона Ньютона будет входить сумма всех сил, т.е. равнодействующая сила.

В механике Ньютона ускорение тел обусловлено только их взаимодействием. Следовательно, второй закон Ньютона справедлив в инерциальных системах отсчёта.

Третий закон Ньютона для материальных точек

1. Силы взаимодействия тел. Действие тел друг на друга носит взаимный характер, т.е. в результате взаимодействия каждое тело приобретает ускорение и, следовательно, на каждое из взаимодействующих тел действует сила. Например, груз, висящий на нити, действует на нить с силой, направленной вертикально вниз, и растягивает её. В свою очередь, нить действует на груз с силой, направленной вертикально вверх (рис. 40).



Измерения показывают, что:

— при взаимодействии тел сила действует как на одно тело, так и на другое;

— модуль силы, действующей на одно тело, равен модулю силы, действующей на другое тело;

— силы, действующие на тела, направлены в противоположные стороны.

2. Третий закон Ньютона. Из соотношения следует $m_1 a_1 = m_2 a_2$.

Поскольку ускорение — величина векторная и ускорения, которые получают тела, направлены в противоположные стороны, то $m_1 \vec{a}_1 = -m_2 \vec{a}_2$. Так как $m_1 \vec{a}_1 = \vec{F}_1$, а $m_2 \vec{a}_2 = \vec{F}_2$, то можно записать: $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$.

Это равенство и выражает третий закон Ньютона: **тела действуют друг на друга с силами, равными по модулю и направленными в противоположные стороны. Эти силы направлены вдоль прямой, соединяющей взаимодействующие тела (материальные точки).**

Третий закон Ньютона говорит о том, что силы всегда появляются парами.

Эти силы часто называют силами *действия* и *противодействия*. При этом безразлично, какую из двух сил назвать силой действия, а какую — силой противодействия.

Важно, что эти силы приложены к разным телам и их нельзя складывать, т.е. нельзя сказать, что силы действия и противодействия уравнивают друг друга.

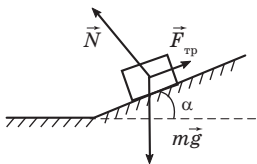
Силы, с которыми взаимодействуют тела, всегда характеризуют одно и то же взаимодействие.

Третий закон Ньютона так же, как первый и второй законы Ньютона, справедлив в инерциальных системах отсчёта.

3. Принцип относительности Галилея. При переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой не изменяются ни ускорение, ни масса тела, ни действующая на него сила. Следовательно, можно утверждать, что **законы механики одинаковы для всех инерциальных систем отсчёта или, что то же самое, все механические явления протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчёта при одинаковых начальных условиях.** Это утверждение называется **принципом относительности Галилея.**

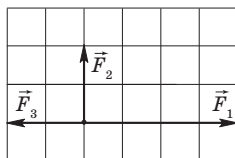
ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ 3

- Систему отсчёта, связанную с Землёй, будем считать инерциальной. Система отсчёта, связанная с автомобилем, тоже будет инерциальной, если автомобиль
 - движется равномерно по прямолинейному участку дороги
 - разгоняется по прямолинейному участку дороги
 - движется равномерно по извилистой дороге
 - по инерции скатывается с горы
- Мяч, неподвижно лежавший на полу вагона движущегося поезда, покатился вправо, если смотреть по ходу поезда. Как изменилось движение поезда?
 - скорость поезда увеличилась
 - скорость поезда уменьшилась
 - поезд повернул вправо
 - поезд повернул влево
- В инерциальной системе отсчёта сила \vec{F} сообщает телу массой m ускорение \vec{a} . Ускорение тела массой $4m$ под действием силы $\frac{1}{2}\vec{F}$ в этой системе отсчёта равно
 - $2\vec{a}$
 - $\frac{1}{4}\vec{a}$
 - $\frac{1}{8}\vec{a}$
 - $4\vec{a}$
- Брусек лежит на шероховатой наклонной опоре (см. рисунок). На него действуют 3 силы: сила тяжести $m\vec{g}$, сила нормальной реакции опоры \vec{N} и сила трения $\vec{F}_{\text{тр}}$. Если брусек покоится, то модуль равнодействующей сил $\vec{F}_{\text{тр}}$ и $m\vec{g}$ равен

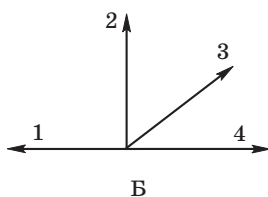
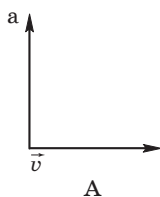


- N
- $N \cos \alpha$
- $N \sin \alpha$
- $m\vec{g} + \vec{F}_{\text{тр}}$

5. На рисунке показаны три силы, действующие на материальную точку. Каков модуль равнодействующей этих сил, если $\vec{F}_3 = 2\text{Н}$?



- 1) $\sqrt{5}\text{Н}$ 2) 4Н 3) $\sqrt{8} \cdot \text{Н}$ 4) 8Н
6. Подъёмный кран поднимает груз с постоянным ускорением. На груз со стороны каната действует сила, равная по величине $8 \cdot 10^3 \text{ Н}$. На канат со стороны груза действует сила,
- 1) равная $8 \cdot 10^3 \text{ Н}$
 2) меньше $8 \cdot 10^3 \text{ Н}$
 3) больше $8 \cdot 10^3 \text{ Н}$
 4) равная силе тяжести, действующей на груз
7. На рисунке А показаны направления скорости и ускорения тела в определённый момент времени. Какая из стрелок на рисунке Б (1–4) соответствует направлению равнодействующей всех сил, действующих на тело?

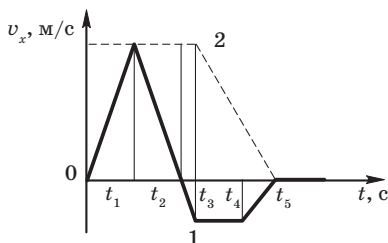


- 1) 1 2) 2 3) 3 4) 4
8. Из приведённых высказываний выберите два верных и запишите их номера
- 1) из двух тел разной массы при действии на них одинаковой силы большее ускорение приобретет тело большей массы

- 2) сила равна произведению массы тела и его ускорения
- 3) направление движения тела всегда совпадает с направлением силы
- 4) сила — причина ускорения тела

--	--

9. Два тела движутся по оси OX . На рисунке представлены графики зависимости проекции скорости движения тел 1 и 2 от времени.



Используя данные графика, выберите из предложенного перечня **два** верных утверждения. Укажите их номера.

- 1) В промежутке времени t_3-t_4 на тело 1 сила не действует.
- 2) В промежутке времени $0-t_3$ на тело 2 действует постоянная сила.
- 3) В промежутке времени $0-t_1$ на тело 1 сила не действует.
- 4) Модуль силы, действующей на тело 1 в промежутки времени $0-t_1$ и t_4-t_5 , одинаков.
- 5) В промежутке времени t_1-t_2 сила сообщает телу 1 отрицательное ускорение.

Закон всемирного тяготения. Сила тяжести

1. Закон всемирного тяготения.

Силы, с которыми все тела притягиваются друг к другу, называют силами всемирного тяготения или гравитационными силами.

Закон всемирного тяготения был установлен Ньютоном, и он утверждает, что: **тела притягиваются друг к другу с силой, модуль которой прямо пропорционален произведению их масс и обратно пропорционален квадрату расстояния между ними.**

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

где m_1 и m_2 — массы тел, r — расстояние между телами, G — постоянная всемирного тяготения или гравитационная постоянная.

Значение гравитационной постоянной установлено опытным путём, оно равно $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$. Смысл её заключается в следующем: два тела, каждое массой 1 кг, находящиеся на расстоянии 1 м друг от друга, взаимодействуют с силой $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н}$.

Значение гравитационной постоянной свидетельствует о том, что силы тяготения между телами малы. Они становятся заметными при больших значениях масс взаимодействующих тел. Например, притяжение шарика к Земле можно наблюдать без специальных приборов, а притяжение Земли к такому же шарiku мы не можем наблюдать непосредственно.

Закон всемирного тяготения справедлив для тел, размерами которых можно пренебречь по сравнению с расстоянием между ними (для материальных точек).

Закон применим также к однородным шарам, в этом случае расстоянием между телами является расстояние между центрами шаров.

2. Сила тяжести. Все тела притягиваются к Земле. Силу притяжения тела к Земле называют силой тяжести (F_T).

По второму закону Ньютона сила равна произведению массы тела и ускорения, с которым оно движется под действием этой силы. Ускорение, с которым движется тело под действием силы тяжести, называется ускорением свободного падения и обозначается буквой g . Ускорение свободного падения не зависит от массы тела. Соответственно, сила тяжести рассчитывается по формуле: $F_T = mg$.

3. Ускорение свободного падения. Закон всемирного тяготения позволяет получить формулу для вычисления значения ускорения свободного падения. С одной стороны, сила тяжести равна $F_T = mg$, с другой стороны, сила притяжения тела к Земле может быть вычислена, исходя из закона всемирного тяготения: $F_T = G \frac{M_3 m}{R^2}$, где M_3 — масса Земли, m — масса тела, R — радиус Земли. Приравнявая правые части записанных равенств, получим: $mg = G \frac{M_3 m}{R^2}$ или $g = G \frac{M_3}{R^2}$.

Полученная формула позволяет вычислить ускорение свободного падения тела, находящегося на поверхности Земли. Она наглядно показывает, что значение ускорения свободного падения зависит от расстояния тела до центра Земли. Именно поэтому значение ускорения свободного падения на экваторе больше, чем на полюсах.

Записанная формула позволяет вычислить ускорение свободного падения на любой планете, подставив вместо массы Земли массу соответствующей планеты, а вместо радиуса Земли радиус планеты.

Если тело находится на высоте h относительно поверхности Земли, то ускорение свободного падения определяется равенством $g = G \frac{M_3}{(R_3 + h)^2}$. Из приведённого равенства понятно, что чем дальше тело находится от центра Земли, тем меньше ускорение свободного падения. Например, на высоте 18 км, на которой летают современные истребители, оно равно $9,72 \text{ м/с}^2$.

4. Первая космическая скорость. Пользуясь законом всемирного тяготения, можно вычислить скорость, которую необходимо сообщить телу для того, чтобы оно стало спутником Земли. Эта скорость называется *первой космической скоростью*.

Центростремительное ускорение a спутнику массой m обеспечивает сила тяготения F_T , которая по второму закону Ньютона равна $F_T = ma$. Сила тяготения $F_T = G \frac{M_3 m}{R^2}$,

центростремительное ускорение равно $a = \frac{v^2}{R}$, где v — линейная скорость спутника, R — радиус Земли. Откуда следует: $G \frac{M_3 m}{R^2} = m \cdot \frac{v^2}{R}$ или $g = \frac{v^2}{R}$.

Отсюда $v = \sqrt{gR}$, т.е. первая космическая скорость равна 7,9 км/с.

Первый в мире искусственный спутник Земли был запущен в СССР в 1957 г.

Сила упругости. Закон Гука

1. Деформация тел. Твёрдые тела под действием силы способны изменять свою форму и (или) объём. Взяв за концы металлическую линейку, можно её согнуть. Если перестать прикладывать силу, то линейка восстановит свою форму. Если сжать пружину (рис. 41), то она сократится, т.е. деформируется. При прекращении действия силы пружина вернётся в первоначальное состояние.

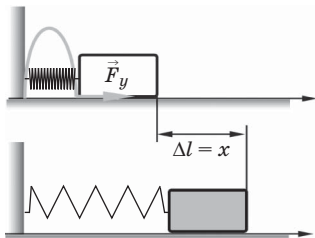


Рис. 41

Изменение формы или объёма тела при действии на него силы называется **деформацией**.

Если длина пружины в недеформированном состоянии l_0 , а после растяжения l , то изменение её длины $\Delta l = l - l_0 = x$, где Δl или x — *удлинение* или *деформация*.

2. Сила упругости. При деформации в теле возникает сила упругости, которая стремится вернуть его в первоначальное состояние.

Сила упругости ($\vec{F}_{\text{упр}}$) — сила, возникающая в теле в результате деформации, стремящаяся вернуть тело в первоначальное состояние и направленная в сторону, противоположную деформации (удлинению).

Так, при растяжении пружины эта сила направлена влево к положению равновесия, при сжатии пружины сила упругости направлена вправо (рис. 42).

Если тело после прекращения действия силы принимает первоначальную форму, то деформация является **упругой**. Если тело после прекращения действия силы не принимает первоначальную форму, то деформация является **неупругой** или **пластической**.

Сила упругости имеет электромагнитную природу. При деформации изменяются расстояния между молекулами и атомами, соответственно, изменяются силы взаимодействия между заряженными частицами,

входящими в состав молекул и атомов: они увеличиваются при сжатии тела, но в большей степени увеличивается сила отталкивания по отношению к силе притяжения, и тело стремится принять первоначальную форму. При растяжении тела уменьшаются и силы притяжения и силы отталкивания, но в большей степени уменьшается сила отталкивания, поэтому равнодействующей является сила притяжения.

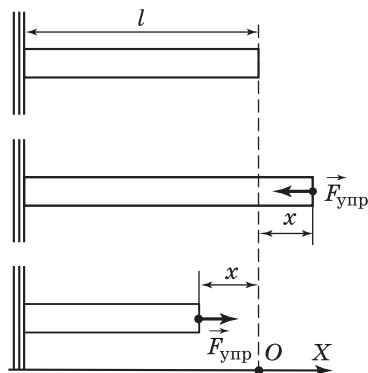


Рис. 42

3. Закон Гука. При малых деформациях сила упругости прямо пропорциональна удлинению. Поскольку сила упругости и деформация направлены в противоположные стороны, то $\vec{F}_{\text{упр}} = -\overline{k\Delta l}$, где k — коэффициент пропорциональности, называемый жёсткостью тела. Жёсткость зависит от размеров тела, его формы, материала, из которого сделано тело.

$$\text{Единица жёсткости } [k] = \frac{[F]}{[\Delta l]}; [k] = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ м}} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

Формула $\vec{F}_{\text{упр}} = -\overline{k\Delta l}$, выражает закон Гука:

Сила упругости, возникающая при деформации тела, прямо пропорциональна удлинению (деформации) тела и направлена в сторону, противоположную деформации.

Важно понимать, что закон Гука справедлив при малых деформациях.

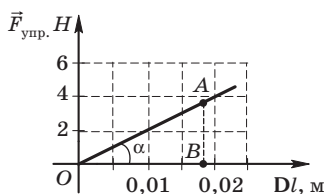


Рис. 43

На рисунке 43 приведён график зависимости модуля силы упругости от деформации. Поскольку эта зависимость линейная, то графиком зависимости является прямая, проходящая через начало координат и составляющая угол α с осью абсцисс.

По графику можно определить жёсткость тела. Например, значению деформации 4 см соответствует сила упругости, равная 8 Н. Разделив 8 Н на 0,04 м, получим $k = 200$ Н/м. В треугольнике AOB жёсткость k равна тангенсу угла α : $k = \operatorname{tg} \alpha$.

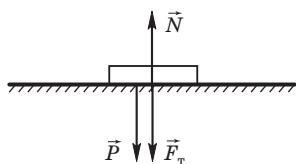


Рис. 44

4. Вес тела. Предположим, что на столе лежит книга (рис. 44). На неё действует сила тяжести \vec{F}_T , направленная вертикально вниз. Книга, взаимодействуя со столом, деформирует его и деформируется сама.

И на книгу, и на стол действует сила упругости, характеризующая их взаимодействие. Сила упругости \vec{N} , действующая на книгу со стороны стола, приложена к книге и направлена вертикально вверх; сила упругости, действующая со стороны книги на стол \vec{P} , приложена к столу и направлена вертикально вниз. Эта сила называется **весом тела**.

Аналогично можно описать взаимодействие гири и нити, на которой она висит: гиря притягивается к Земле и растягивает нить. Груз и нить взаимодействуют между собой. Это взаимодействие характеризуется силой упругости: на нить действует сила упругости со стороны гири

(\vec{P}), направленная вертикально вниз; в свою очередь, нить действует на гирию с силой упругости (\vec{N}), направленной вверх.

Таким образом, **весом тела называют силу, с которой тело, вследствие его притяжения к Земле, действует на опору или подвес.** В отличие от силы тяжести, вес тела приложен не к телу, а к опоре или к подвесу. Вес — это сила упругости.

5. Невесомость. Если тело покоится или движется равномерно и прямолинейно, вес тела численно равен силе тяжести, действующей на него: $\vec{P} = m\vec{g}$.

На тело, движущееся вместе с платформой или подвесом вертикально вниз с ускорением \vec{a} , направленным в сторону движения, действуют сила тяжести \vec{F}_T и сила упругости \vec{N} со стороны опоры или подвеса (рис. 45).

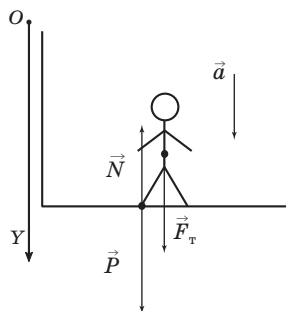


Рис. 45

Второй закон Ньютона для этой ситуации: $m\vec{g} + \vec{N} = m\vec{a}$. В проекциях на координатную ось OY : $mg - N = ma$ или $N = mg - ma$. Поскольку $N = P$, $P = m(g - a)$.

Таким образом, если тело движется вниз вместе с опорой или подвесом с ускорением, направленным так же, как и ускорение свободного падения, то его вес меньше силы тяжести, т.е. меньше веса покоящегося тела. Если ускорение тела равно ускорению свободного падения $a = g$, то тело находится в состоянии невесомости.

В таком состоянии находится космонавт в космическом корабле, прыгун в высоту во время полёта вниз, прыгун с трамплина во время полёта.

6. Перегрузки. На тело, движущееся вместе с платформой или подвесом вертикально вверх с ускорением \vec{a} , направленным в сторону движения, действуют сила тяжести

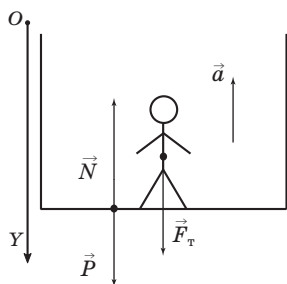


Рис. 46

\vec{F}_t и сила упругости \vec{N} со стороны опоры или подвеса (рис. 46). Вторым законом Ньютона для этой ситуации: $m\vec{g} + \vec{N} = m\vec{a}$. В проекциях на координатную ось OY : $mg - N = -ma$ или $N = mg + ma$. Поскольку $N = P$, $P = m(g + a)$.

Таким образом, если тело движется вверх вместе с опорой или подвесом с ускорением, направленным противоположно ускорению свободного падения, то его вес больше силы тяжести, т.е. больше веса покоящегося тела. Увеличение веса тела при движении с ускорением называют *перегрузкой*. Перегрузки испытывает космонавт в космическом корабле, пилот реактивного самолёта при взлёте и посадке.

Сила трения. Сухое трение

1. Давление твёрдого тела. Тело, лежащее на какой-либо опоре, оказывает на неё давление. Давлением p называют физическую величину, равную отношению силы F , действующей на поверхность перпендикулярно ей, к площади S этой поверхности: $p = \frac{F}{S}$.

За единицу давления принимают 1 паскаль (1 Па). Это такое давление, которое производит сила 1 Н, действующая на поверхность площадью 1 м^2 перпендикулярно этой поверхности: $[p] = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ м}^2} = 1 \text{ Па}$

Часто употребляют термин «сила нормального давления». В этом случае речь идёт о силе, действующей на поверхность перпендикулярно ей. Эту силу обычно обозначают буквой N .

2. Сила трения. Для того чтобы тело (коробку, стоящую на полу, санки, стоящие на снегу и т.п.) сдвинуть с места, к нему нужно приложить силу. При этом при постепенном увеличении силы тело какое-то время будет оставаться

ся в покое, а при определённом значении приложенной силы начнёт перемещаться. Силу, возникающую при непосредственном соприкосновении двух тел, называют **силой трения**. Эта сила всегда направлена вдоль поверхности соприкосновения.

3. Сила трения покоя. На коробку, стоящую на полу, действуют в вертикальной плоскости уравнивающие друг друга сила тяжести \vec{F}_T и сила упругости (реакции опоры), в горизонтальной плоскости действует приложенная к ней сила \vec{F} . Поскольку коробка какое-то время остаётся неподвижной, то это значит, что в горизонтальной плоскости действует ещё одна сила, равная по модулю силе \vec{F} и направленная в противоположную ей сторону. Этой силой является **сила трения покоя**. Чем большая сила прикладывается телу (пока оно не движется), тем больше сила трения покоя.

Сила трения покоя равна по модулю и направлена противоположно силе, приложенной к покоящемуся телу параллельно поверхности его соприкосновения с другим телом.

При некотором значении приложенной к телу силы \vec{F} оно приходит в движение. В момент начала движения коробки сила трения покоя имеет максимальное значение $\vec{F}_{\text{тр. max}}$, которое равно силе трения скольжения. Чем больше сила давления тела на поверхность соприкосновения тел перпендикулярно этой поверхности (сила нормального давления), тем больше максимальная сила трения покоя, т.е. $(F_{\text{тр}})_{\text{max}} = \mu N$, где μ — коэффициент трения.

Максимальная сила трения покоя прямо пропорциональна силе нормального давления.

Сила трения покоя препятствует началу движения тела. С другой стороны, сила трения покоя может быть причиной ускорения движения тела. Так, при ходьбе сила трения покоя $F_{\text{тр}}$, действующая на подошву идущего человека, сообщает ему ускорение. Сила F , равная по модулю силе трения покоя и направленная в противоположную сторону, сообщает ускорение опоре.

4. Сила трения скольжения. При движении тела на него тоже будет действовать сила трения, её называют **силой трения скольжения**. Сила трения скольжения — сила, действующая при скольжении одного тела по поверхности другого и направленная в сторону, противоположную перемещению тела. Она несколько меньше максимальной силы трения покоя и направлена в сторону, противоположную перемещению тела относительно соприкасающегося с ним тела.

Сила трения скольжения прямо пропорциональна силе нормального давления: $F_{\text{тр}} = \mu N$. В этой формуле N — сила нормального давления, т.е. сила, действующая перпендикулярно поверхности соприкасающихся тел; μ — коэффициент трения. Коэффициент трения характеризует поверхности соприкасающихся тел. Он определяется экспериментально и приводится в таблицах.

Причиной трения являются неровности поверхностей. В случае хорошо отшлифованных поверхностей молекулы, находящиеся на поверхностях тел, располагаются близко друг к другу, и силы межмолекулярного взаимодействия достаточно велики.

5. Сила трения качения. Если тело катится по поверхности другого тела, то на него тоже действует сила трения. Это — **сила трения качения**. Она прямо пропорциональна силе нормального давления (реакции опоры) N и обратно пропорциональна радиусу R катящегося тела: $F_{\text{кач}} = \mu \frac{N}{R}$, где μ — коэффициент трения качения.

6. Тормозной путь. Существует целый ряд практических задач, в которых необходим учёт силы трения. Особенно важными являются задачи, связанные с движением транспорта. Хорошо известно, что для избежания аварий следует сохранять определённую дистанцию между автомобилями; в дождливую погоду или в гололедицу она должна быть больше, чем в сухую погоду.

Расстояние, которое проезжает автомобиль при торможении до полной остановки, называют тормозным путём.

Рассчитывается тормозной путь по формуле $l = \frac{v_0^2}{2a}$. Так как $a = \mu \cdot g$, то $l = \frac{v_0^2}{2\mu g}$.

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ 4

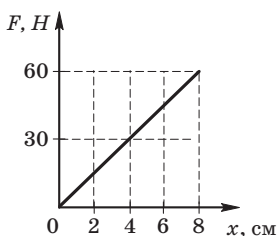
1. Два маленьких шарика массой m каждый находятся на расстоянии r друг от друга и притягиваются с силой F . Какова сила гравитационного притяжения двух других шариков, если масса одного $3m$, масса другого $\frac{m}{3}$, а расстояние между их центрами $3r$?

- 1) $\frac{F}{3}$
- 2) $\frac{F}{9}$
- 3) $3Fs$
- 4) $9F$

2. На каком расстоянии от центра Земли силы притяжения космического корабля к Земле и к Луне уравниваются друг друга? Масса Луны в 81 раз меньше массы земли, а расстояние между их центрами в 60 раз больше радиуса Земли (R_3 — радиус Земли).

- 1) $25R_3$
- 2) $32R_3$
- 3) $50R_3$
- 4) $54R_3$

3. На рисунке представлен график зависимости модуля силы упругости от удлинения пружины. Какова жёсткость пружины?



- 1) 750 Н/м
- 2) 75 Н/м
- 3) 0,13 Н/м
- 4) 15 Н/м

4. Кубик массой 2 кг покоится на гладком горизонтальном столе, сжатый с боков пружинами (см. рисунок). Левая пружина жёсткостью $k_1 = 500$ Н/м сжата на 3 см. С какой силой правая пружина действует на кубик?



- 1) 15 H 3) 250 H
2) 30 H 4) 1500 H

5. При измерении коэффициента трения брусок перемещали по горизонтальной поверхности стола и получили значение силы трения F_1 . Затем на брусок положили груз, масса которого в 2 раза больше массы бруска, и получили значение силы трения F_2 . При этом сила трения F_2

- 1) равна F_1
- 2) в 2 раза больше F_1
- 3) в 3 раза больше F_1
- 4) в 2 раза меньше F_1

6. На горизонтальном полу стоит ящик массой 10 кг. Коэффициент трения между ящиком и полом равен 0,25. К ящику прикладывают горизонтально направленную силу 16 Н, и он остаётся в покое. Какова сила трения между ящиком и полом?

- 1) 0 H 3) 4 H**
- 2) 2,5 H 4) 16 H**

7. Автомобиль, двигаясь по горизонтальной дороге, совершает поворот по дуге окружности. Каков минимальный радиус траектории автомобиля при его скорости 18 м/с и коэффициенте трения автомобильных шин о дорогу 0,4?

- 1) 81 М 3) 45,5 М
2) 9 М 4) 90 М

8. С вершины наклонной плоскости из состояния покоя скользит с ускорением лёгкая коробочка, в которой находится груз массой m . Как изменятся время движения,

ускорение и сила трения, если с той же наклонной плоскости будет скользить та же коробочка с грузом массой $2m$?

Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличится
- 2) уменьшится
- 3) не изменится

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Время движения	Ускорение	Сила трения

9. Установите соответствие между величинами в левом столбце и формулой, её определяющей, в правом столбце. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго и запишите выбранные цифры под соответствующими буквами

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

- А) сила трения
- Б) сила упругости
- В) сила тяготения

ФОРМУЛЫ

- 1) $F = mg$
- 2) $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$
- 3) $F = \mu N$
- 4) $F = -kx$
- 5) $F = ma$

Ответ:

А	Б	В

СТАТИКА

Условие равновесия твёрдого тела в ИСО

1. **Равновесие твёрдого тела.** Материальная точка — одна из моделей механики. Другой моделью является абсолютно твёрдое тело. Абсолютно твёрдое тело — тело, не

испытывающее деформаций. Условием равновесия материальной точки является равенство нулю равнодействующей всех сил: $\sum \vec{F} = 0$.

Твёрдое тело может участвовать как в поступательном, так и во вращательном движении вокруг неподвижной оси или опоры. Условием равновесия твёрдого тела, совершающего поступательное движение, так же, как и в случае поступательного движения точки, является равенство нулю равнодействующей сил. Однако этого условия недостаточно для равновесия вращающегося твёрдого тела.

Простейшим примером твёрдого тела, совершающего вращательное движение вокруг неподвижной оси, является рычаг (рис. 47).

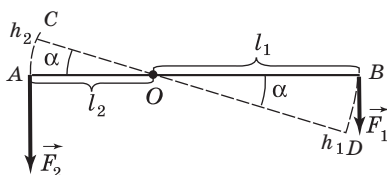


Рис. 47

Предположим, на рычаг, который может вращаться вокруг точки O , действуют силы \vec{F}_1 и \vec{F}_2 (рис. 47). Кратчайшее расстояние между точкой опоры и линией, вдоль которой действует сила, называется плечом силы. На рисунке 47 OA (l_1) — плечо силы \vec{F}_1 , OB (l_2) — плечо силы \vec{F}_2 .

При равновесии рычага выполняется равенство: $\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}$

или $F_1 l_1 = F_2 l_2$.

2. Момент силы. Если на вращающееся тело действует несколько сил, то условие равновесия имеет более сложный вид. Для его записи используют понятие момента силы. **Моментом силы называют произведение силы и плеча: $M = Fl$.**

Представим, что моменты M_1 и M_2 сил F_1 и F_2 вращают тело против часовой стрелки, моменты M_3 и M_4 сил F_3 и F_4 вращают тело по часовой стрелке. **При равновесии твёрдо-**

го тела сумма моментов сил, вращающих его по часовой стрелке, равна сумме моментов сил, вращающих тело против часовой стрелки: $M_1 + M_2 = M_3 + M_4$ или $\sum M = 0$.

Закон Паскаля

1. Передача давления жидкостью и газом. Закон Паскаля.

Опыт показывает, что давление, производимое на жидкость или газ, передаётся по всем направлениям. Если шар с отверстиями, соединённый с трубкой, внутри которой находится поршень, наполнить водой, а затем нажать на поршень, то можно заметить, что вода брызнет из всех отверстий. При этом струйки вытекающей воды будут примерно одинаковыми (рис. 48).

Это говорит о том, что давление, которое мы создаём, действуя на воду, передаётся водой по всем направлениям одинаково. Тот же эффект можно наблюдать, если шар заполнить дымом. Дым тоже будет передавать производимое на него давление по всем направлениям одинаково.

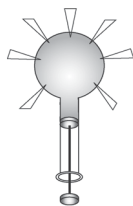


Рис. 48

То, что газы и жидкости передают давление по всем направлениям, объясняется подвижностью их молекул. Подвижность молекул проявляется в том, что частицы жидкостей и газов могут свободно перемещаться друг относительно друга по разным направлениям. Благодаря подвижности молекул давление, которое оказывает поршень на ближайший к нему слой, передаётся последующим слоям. Молекулы газа и жидкости движутся хаотически, поэтому и их действие распределяется равномерно по всему объёму шара. Таким образом, **давление, производимое на жидкость или газ, передаётся по всем направлениям без изменения в каждую точку жидкости или газа.**

Это утверждение называется **законом Паскаля**.

2. Гидравлическая машина. Закон Паскаля находит применение в гидравлических машинах.

Основной частью любой гидравлической машины являются два соединённых между собой цилиндра разного

диаметра (рис. 49). Цилиндры заполнены жидкостью, чаще всего маслом, и в них помещены поршни.

Пусть на большой поршень площадью действует сила S_1 . Эта сила будет оказывать на поршень давление p_1 : $p_1 = F_1/S_1$.

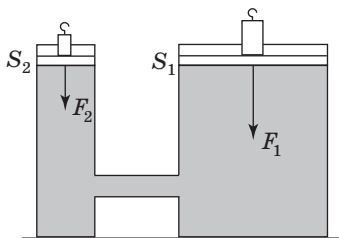


Рис. 49

Это давление p_1 будет передаваться жидкости, находящейся под большим поршнем. Согласно закону Паскаля, давление, производимое на жидкость или газ, передаётся по всем направлениям без изменения. Следовательно, давление будет передаваться жидкости, находящейся под меньшим поршнем и на меньший поршень со стороны жидкости будет действовать давление $p_2 = p_1$. Соответственно, на меньший поршень со стороны жидкости будет действовать сила $F_2 = p_2 S_2$, направленная вверх. Откуда $p_2 = F_2/S_2$.

Чтобы жидкость и поршни находились в равновесии, на меньший поршень следует подействовать силой, равной по модулю силе F_2 , направленной вертикально вниз. Для этого можно, например, положить на поршень груз.

Так как $p_1 = p_2$, то $F_1/S_1 = F_2/S_2$ или $F_1/F_2 = S_1/S_2$.

Таким образом, *гидравлическая машина даёт выигрыш в силе* во столько раз, во сколько раз площадь большего поршня больше площади меньшего поршня.

Это означает, что с помощью некоторой силы, приложенной к малому поршню гидравлической машины, можно уравновесить существенно большую силу, приложенную к большому поршню.

Гидравлическая машина так же, как и любой простой механизм, даёт выигрыш в силе, но не даёт выигрыша в работе.

Давление в жидкости, покоящейся относительно ИСО

1. Давление жидкости на дно и стенки сосуда. Поскольку на жидкости действует сила тяжести, то они оказывают давление на дно сосуда. Об этом свидетельствует прогиб плёнки, затягивающей дно трубки, в которую налита вода (рис. 50).

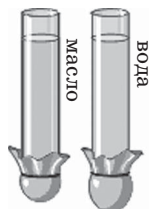


Рис. 50

Это происходит потому, что на воду действует сила тяжести, и каждый слой воды давит на слои воды, лежащие ниже, и соответственно на дно сосуда.

Давление производится жидкостью не только на дно сосуда, оно существует внутри жидкости на любой её глубине. При этом производимое давление передаётся по закону Паскаля по всем направлениям одинаково. Следовательно, давление столба жидкости на уровне AA_1 направлено и вниз, и вверх, и вправо, и влево, по всем другим направлениям, и значение его одинаково (рис. 51).

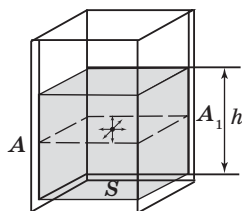


Рис. 51

2. Формула давления жидкости на дно и стенки сосуда. Давление жидкости на дно сосуда тем больше, чем больше высота столба жидкости, и тем больше, чем больше плотность жидкости.

Сила F , с которой жидкость давит на дно, равна её весу P . Вес жидкости P равен произведению её массы m и ускорения свободного падения g : $F = P = mg$.

Масса жидкости m равна произведению её плотности ρ и объёма V : $m = \rho V$, где $V = Sh$. Тогда $F = mg = \rho Vg = \rho Shg$.

Разделив вес жидкости (силу, с которой она давит на дно сосуда) на площадь дна, получим давление жидкости p : $p = F/S$ или $p = \rho gSh/S$, т.е.

$$p = \rho gh$$

Давление жидкости на дно и стенки сосуда равно произведению плотности жидкости, ускорения свободного падения и высоты столба жидкости.

3. Сообщающиеся сосуды. Два и более сосуда, соединённых между собой у дна, называются сообщающимися сосудами.

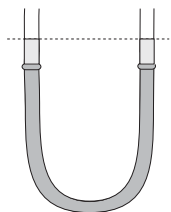


Рис. 52

Если две стеклянные трубки соединить резиновой трубкой (рис. 52), то получатся сообщающиеся сосуды.

Экспериментируя с этими трубками, можно сделать вывод:

В сообщающихся сосудах поверхности однородной жидкости всегда устанавливаются на одном уровне.

Это верно при условии, что давление на поверхность жидкости одинаково. При использовании сообщающихся сосудов в качестве жидкостного манометра именно по разности уровней жидкости в трубках можно судить о значении давления.

Объяснить то, что в сообщающихся сосудах однородная жидкость устанавливается на одном уровне, можно следующим образом. Жидкость в сосудах не перемещается, следовательно, её давления в сосудах на одном уровне, в том числе и на дно, одинаковы.

Если в одну трубку налить воду, а в другую масло, плотность которого меньше плотности воды, то уровень воды будет ниже, чем уровень масла в другой трубке (рис. 53).

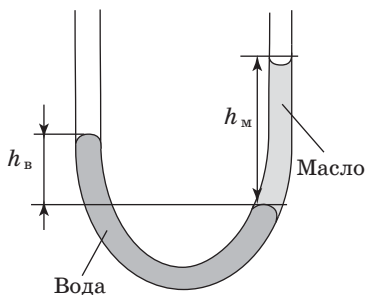


Рис. 53

Это объясняется тем, что давление жидкости на дно сосуда зависит от высоты столба жидкости и от её плотности. При одинаковом давлении чем больше плотность жидкости, тем меньше высота её столба. Поскольку плотность масла меньше плотности воды, то столб масла выше столба воды.

Таким образом, жидкости, имеющие разную плотность, устанавливаются в сообщающихся сосудах на разных уровнях; во сколько раз плотность одной жидкости больше плотности другой, во столько раз меньше высота её столба.

Закон Архимеда. Условия плавания тел

1. Выталкивающая сила. Если подвешенный к пружине динамометра грузик опустить в сосуд с водой, то можно заметить, что показание динамометра уменьшится.

Точно так же можно изменить показания динамометра, если подействовать на грузик рукой снизу вверх. Следовательно, когда грузик опустили в воду, на него, помимо силы тяжести и силы упругости пружины динамометра, стала действовать сила, направленная вверх. Эту силу называют *выталкивающей* или *архимедовой силой*.

Выталкивающая сила возникает за счёт разности давления воды на нижнюю поверхность тела и давления на его верхнюю поверхность, поскольку давление жидкости зависит от высоты её столба.

2. Закон Архимеда. Сила давления F_1 , действующая на верхнюю поверхность тела, направлена вниз, сила давления F_2 , действующая на нижнюю поверхность тела, направлена вверх. Так как F_2 больше F_1 , то результирующая этих двух сил, являющаяся выталкивающей силой, будет направлена вверх.

Выталкивающая сила тем больше, чем больше плотность жидкости, в которую погружено тело, и чем больше объём тела, погружённого в жидкость.

Опыт показывает, что выталкивающая сила F может быть вычислена по формуле:

$\vec{F} = -\rho V \vec{g}$, где ρ плотность жидкости, в которую погружено тело, V — объём погружённой части тела.

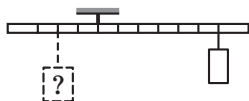
Выталкивающая сила равна произведению плотности жидкости, ускорения свободного падения и объёма погружённой части тела.

Этот закон называют **законом Архимеда**.

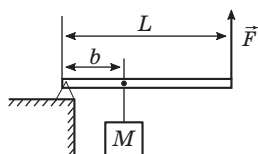
В воздухе так же, как и в любом другом газе, на тело действует выталкивающая сила. Она имеет ту же природу, что и выталкивающая сила, действующая на тело в жидкости. Её происхождение обусловлено разностью давлений на нижнюю и верхнюю грани тела. Однако, поскольку плотность газа намного меньше плотности жидкости, выталкивающая сила, действующая на тело, в газе меньше, чем в жидкости. Часто при решении задач пренебрегают выталкивающей силой, действующей на тело в воздухе, и считают, что вес покоящегося тела в воздухе равен по модулю действующей на него силе тяжести.

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ 5

1. Тело массой 0,3 кг подвешено к правому плечу невесомого рычага (см. рисунок). Груз какой массы надо подвесить ко второму делению левого плеча рычага для достижения равновесия?

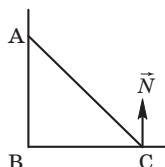


- | | |
|-----------|-----------|
| 1) 0,1 кг | 3) 0,9 кг |
| 2) 0,3 кг | 4) 1,8 кг |
2. Груз удерживают на месте с помощью рычага, приложив вертикально направленную силу 400 Н (см. рисунок). Рычаг состоит из шарнира и однородного стержня массой 20 кг и длиной 4 м. Расстояние от оси шарнира до точки подвеса груза равно 1 м. Масса груза равна



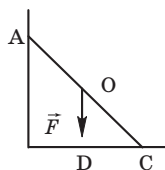
- 1) 80 кг 3) 120 кг
2) 100 кг 4) 160 кг

3. На рисунке схематически изображена лестница AC, опирающаяся на стену. Каков момент силы реакции опоры N , действующей на лестницу, относительно точки C?



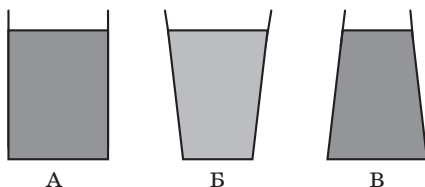
- 1) $N \cdot OC$ 3) $N \cdot AC$
2) 0 4) $N \cdot BC$

4. На рисунке схематически изображена лестница AC, опирающаяся на стену. Каков момент силы тяжести F , действующей на лестницу, относительно точки C?



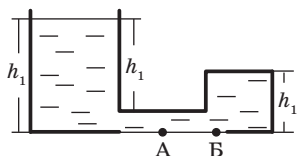
- 1) $F \cdot OC$ 3) $F \cdot OD$
2) $F \cdot AC$ 4) $F \cdot DC$

5. В сосуды различной формы налита одна и та же жидкость. Высота уровня жидкости во всех сосудах одинакова. В каком из сосудов давление на дно наименьшее?



- 1) в сосуде А
2) в сосуде Б
3) в сосуде В
4) во всех сосудах одинаковое

6. Стекланный сосуд, правое колено которого запаяно, заполнен жидкостью плотностью (см. рисунок). Давление, оказываемое жидкостью на дно сосуда в точке Б, равно



- 1) $\rho g h_3$
- 2) $\rho g h_1$
- 3) $\rho g h(h_1 - h_2)$
- 4) $\rho g h_2$

7. При исследовании зависимости выталкивающей силы, действующей на тело, полностью погружённое в воду, от глубины погружения ученик уменьшил глубину положения тела под водой в 3 раза. При этом выталкивающая сила

- 1) увеличилась в 3 раза
- 2) уменьшилась в 3 раза
- 3) не изменилась
- 4) уменьшилась в 9 раз

8. Теплоход переходит из солёного моря в устье реки. При этом архимедова сила, действующая на теплоход,

- 1) увеличится
- 2) уменьшится или увеличится в зависимости от размера теплохода
- 3) не изменится
- 4) уменьшится

9. Пластмассовый шарик, опущенный в жидкость на дно сосуда, начинает подниматься вверх. Как по мере движения шарика в жидкости изменяются выталкивающая сила, действующая на него, вес шарика, давление жидкости? Установите соответствие между физическими величинами и характером их изменения.

Запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

- А) выталкивающая сила
- Б) вес
- В) давление жидкости

ХАРАКТЕР ИЗМЕНЕНИЯ ВЕЛИЧИН

- 1) увеличивается
- 2) уменьшается
- 3) не изменяется

Ответ:

А	Б	В

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

Закон сохранения импульса

1. Импульс силы. Опыты и наблюдения свидетельствуют о том, что результат действия силы (взаимодействия) зависит от времени её действия. Так, если к штативу на нити подвесить тяжёлую гирю, к которой привязана ещё одна нить снизу, и резко дёрнуть нижнюю нить, то она оборвётся, а верхняя нить останется целой. Если же теперь медленно потянуть нижнюю нить, то оборвётся верхняя нить. Поэтому для характеристики действия силы вводят величину, называемую **импульсом силы**.

Импульсом силы называют векторную величину, равную произведению силы и времени её действия ($\vec{F}t$). ***Импульс силы, является мерой действия силы за некоторый промежуток времени.***

Единица импульса силы $[Ft] = 1 \text{ Н} \cdot \text{с}$.

2. Импульс материальной точки. С другой стороны, результат действия силы зависит и от характеристик тела, на которое эта сила действует. Так, летящий с некоторой скоростью футбольный мяч, ударяясь о пустую картонную коробку, сдвинет её с места, а, ударяясь о такую же коробку, заполненную металлическими предметами, скорее всего, отскочит от неё, а коробка при этом останется неподвижной.

Пуля, летящая со скоростью 2 м/с, при попадании в деревянную стенку в лучшем случае оставит на ней вмятину,

а пуля, летящая со скоростью 200 м/с, стенку пробьёт. Таким образом, результат действия силы зависит от массы и скорости взаимодействующих тел.

Величину, равную произведению массы тела и его скорости, называют импульсом тела.

$\vec{p} = m\vec{v}$ — импульс тела (или просто импульс).

Единица импульса $[p] = 1 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$.

Импульс — величина векторная, поскольку масса — величина скалярная, а скорость — векторная.

Импульс — величина относительная, его значение зависит от выбора системы отсчёта, поскольку относительной величиной является скорость.

3. Изменение импульса материальной точки.

Импульс силы и изменение импульса тела связаны между собой.

Запишем второй закон Ньютона: $\vec{F} = m\vec{a}$.

Подставим в формулу выражение для ускорения $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$, $\vec{F} = \frac{m(\vec{v} - \vec{v}_0)}{t}$ или $\vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0$.

В левой части равенства стоит импульс силы; в правой части — разность конечного и начального импульсов тела, т.е. изменение импульса тела. $\vec{F}t = \Delta(m\vec{v})$.

Таким образом, **импульс силы равен изменению импульса тела.**

Это иная формулировка второго закона Ньютона. Именно в таком виде сформулировал свой закон Ньютон.

4. Замкнутая система тел. Взаимодействующие между собой тела образуют систему тел. Между телами системы действуют силы взаимодействия: на одно тело — \vec{F}_1 , на другое тело — сила \vec{F}_2 . При этом сила \vec{F}_1 равна силе \vec{F}_2 и направлена противоположно ей: $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$ (рис. 54).

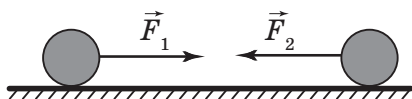


Рис. 54

Силы, с которыми тела системы взаимодействуют между собой, называют внутренними силами.

Помимо внутренних сил, на тела системы действуют внешние силы. Так взаимодействующие тела притягиваются к Земле. Сила тяготения является в данном случае внешней силой. Если тела движутся, то на них действует сила сопротивления воздуха, сила трения. Они тоже являются внешними силами по отношению к системе, которая в данном случае состоит из двух тел. Ни Земля, ни воздух в эту систему тел не входят.

Внешними силами называются силы, которые действуют на тела системы со стороны других тел.

Систему тел, взаимодействующих между собой и не взаимодействующих с другими телами, называют замкнутой системой тел. В замкнутой системе действуют только внутренние силы, внешние силы на неё не действуют.

5. Закон сохранения импульса. Предположим, что m_1 — масса, а \vec{v}_{01} — скорость до взаимодействия, \vec{v}_1 — скорость после взаимодействия одного из двух взаимодействующих тел, составляющих замкнутую систему. Масса второго тела m_2 , его скорость до взаимодействия \vec{v}_{02} , после взаимодействия \vec{v}_2 . Для этих тел справедливо равенство:

$$m_1\vec{v}_{01} + m_1\vec{v}_{02} = m_2\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2.$$

В левой части равенства стоит сумма импульсов тел до взаимодействия, в правой части — сумма импульсов тел после взаимодействия. Как видно, импульс каждого тела при взаимодействии изменился, а сумма импульсов осталась неизменной.

Геометрическая сумма импульсов тел, входящих в замкнутую систему, остаётся постоянной при любых взаимодействиях тел этой системы между собой.

В этом состоит закон сохранения импульса.

«Замкнутая система» — это идеализация. В реальном мире нет таких систем, на которые не действовали бы внешние силы. Однако в ряде случаев реальные системы взаимодействующих тел можно рассматривать как замкнутые. Это возможно, когда внутренние силы много больше

внешних сил, или когда время взаимодействия мало, или когда внешние силы уравнивают друг друга. Кроме того, в ряде случаев равна нулю проекция внешних сил на какое-либо направление. В этом случае закон сохранения импульса выполняется для проекций импульсов взаимодействующих тел на это направление.

Работа силы на малом перемещении

1. Механическая работа.

Механическая работа A — физическая величина, равная скалярному произведению вектора силы, действующей на тело, и вектора его перемещения: $A = \vec{F} \Delta \vec{r}$ или $A = \vec{F} \vec{S}$. Работа — скалярная величина, характеризуется числовым значением и единицей.

За единицу работы принимают 1 джоуль (1 Дж). Это такая работа, которую совершает сила 1 Н на пути 1 м.

$$[A] = [F] [s]; [A] = 1 \text{ Н} \cdot 1 \text{ м} = 1 \text{ Дж}.$$

Если сила, действующая на тело, составляет некоторый угол α с перемещением, то проекция силы F на ось X равна F_x , α проекция перемещения s_x и $A = F_x s_x$ (рис. 55).

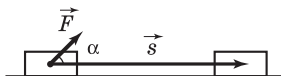


Рис. 55

Поскольку $F_x = F \cdot \cos \alpha$, то $A = F s \cdot \cos \alpha$.

Таким образом, **работа постоянной силы равна произведению модулей векторов силы и перемещения и косинуса угла между этими векторами.**

Если сила $F = 0$ или перемещение $s = 0$, то механическая работа равна нулю $A = 0$. Работа равна нулю, если вектор силы перпендикулярен вектору перемещения, т.е. $\cos 90^\circ = 0$. Так, нулю равна работа силы, сообщающей телу центростремительное ускорение при его равномерном движении по окружности, так как эта сила перпендикулярна направлению движения тела в любой точке траектории.

Работа силы может быть как положительной, так и отрицательной. Работа положительная $A > 0$, если угол $90^\circ > \alpha \geq 0^\circ$; если угол $180^\circ \geq \alpha > 90^\circ$, то работа отрицательная $A < 0$.

Если угол $\alpha = 0^\circ$, то $\cos \alpha = 1$, $A = Fs$. Если угол $\alpha = 180^\circ$, то $\cos \alpha = -1$, $A = -Fs$.

2. Графическое представление работы. На рисунке изображён график зависимости силы тяжести от высоты тела относительно поверхности Земли (рис. 56). Графически работа силы тяжести равна площади фигуры (прямоугольника), ограниченного графиком, координатными осями и перпендикуляром, восстановленным к оси абсцисс в точке h .

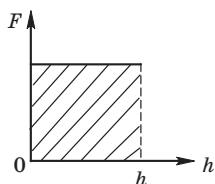


Рис. 56

Графиком зависимости силы упругости от удлинения пружины является прямая, проходящая через начало координат (рис. 57). По аналогии с работой силы тяжести работа силы упругости равна площади треугольника, ограниченного графиком, координатными осями и перпендикуляром, восстановленным к оси абсцисс в точке x . $A = Fx / 2 = \frac{kx \cdot x}{2}$.

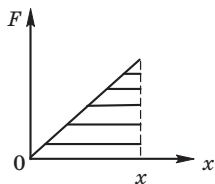


Рис. 57

$$A = \frac{kx^2}{2}.$$

3. Работа силы тяжести. Работа силы тяжести не зависит от формы траектории, по которой перемещается тело; она зависит от начального и конечного положений тела. Пусть тело сначала перемещается из точки A в точку B по траектории AB (рис. 58). Работа силы тяжести в этом случае $A_{AB} = mgh$.

Пусть теперь тело движется из точки A в точку B сначала вдоль наклонной плоскости AC , затем вдоль основания наклонной плоскости BC . Работа силы тяжести при перемещении по BC равна нулю. Работа силы тяжести при перемещении по AC равна произведению проекции силы

тяжести на наклонную плоскость $mg \sin \alpha$ и длины наклонной плоскости, т.е. $A_{AC} = mg \sin \alpha \cdot l$. Произведение $l \cdot \sin \alpha = h$. Тогда $A_{AC} = mgh$.

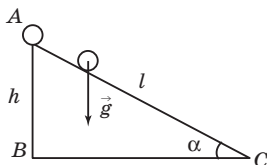


Рис. 58

Таким образом, работа силы тяжести при перемещении тела по двум различным траекториям не зависит от формы траектории, а зависит от начального и конечного положений тела.

Работа силы упругости также не зависит от формы траектории.

Силы, работа которых не зависит от формы траектории и по замкнутой траектории равна нулю, называют консервативными. К консервативным силам относятся сила тяжести и сила упругости.

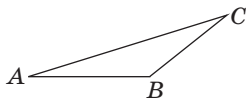


Рис. 59

Силы, работа которых зависит от формы пути, называют неконсервативными. Неконсервативной является сила трения. Если тело перемещается из точки A в точку B (рис. 59) сначала по прямой, а затем по ломаной линии ACB, то в первом случае работа силы трения $A_{AB} = -Fl_{AB}$, а во втором $A_{ABC} = A_{AC} + A_{CB}$, $A_{ABC} = -Fl_{AC} - Fl_{CB}$.

Следовательно, работа A_{AB} не равна работе A_{ABC} .

4. Механическая мощность.

Мощностью называется физическая величина, равная отношению работы к промежутку времени, за который она совершена. Мощность характеризует быстроту совершения работы.

Мощность обозначается буквой N .

$$N = A/t.$$

Единица мощности: $[N] = [A]/[t]$. $[N] = 1 \text{ Дж}/1 \text{ с} = 1 \text{ Дж/с}$. Эта единица называется ватт (Вт). Один ватт — такая мощность, при которой работа 1 Дж совершается за 1 с.

Мощность, развиваемая двигателем, равна: $N = A/t$, $A = F \cdot S$, откуда $N = FS/t$. Отношение перемещения ко времени представляет собой скорость движения: $S/t = v$. Откуда $N = Fv$.

Из полученной формулы видно, что при постоянной силе сопротивления скорость движения прямо пропорциональна мощности двигателя.

5. Коэффициент полезного действия. В различных машинах и механизмах происходит преобразование механической энергии. За счёт энергии при её преобразовании совершается работа. При этом на совершение полезной работы расходуется только часть энергии. Некоторая часть энергии тратится на совершение работы против сил трения. Таким образом, любая машина характеризуется величиной, показывающей, какая часть передаваемой ей энергии используется полезно. Эта величина называется коэффициентом полезного действия (КПД).

Коэффициентом полезного действия называют величину, равную отношению полезной работы (A_n) ко всей совершённой работе (A_c):

$\eta = A_n/A_c$. Выражают КПД в процентах.

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ 6

1. Навстречу друг другу летят шарики из пластилина. Моменту их импульсов равны соответственно $5 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$ и $3 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$. Столкнувшись, шарики слипаются. Импульс слипшихся шариков равен

- 1) $8 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$
- 2) $4 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$
- 3) $2 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$
- 4) $\sqrt{34} \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$

10. С вершины наклонной плоскости из состояния покоя скользит с ускорением лёгкая коробочка, в которой находится груз массой m . Как изменятся время движения, ускорение и модуль работы силы трения, если с той же наклонной плоскости будет скользить та же коробочка с грузом массой $2m$?

Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличится
- 2) уменьшится
- 3) не изменится

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Сила реакции опоры	Ускорение	Модуль работы силы трения

Закон сохранения механической энергии

1. Механическая энергия. Поднятый на некоторую высоту молот, падая на сваю, забивает её в землю, совершая при этом некоторую работу. Во время падения он совершает работу по преодолению сопротивления воздуха, а после касания земли — работу по преодолению силы сопротивления почвы, поскольку обладает энергией. Таким образом, тело может совершить работу, если оно обладает энергией, благодаря которой эту работу совершает. При совершении работы изменяется состояние тела и изменяется его энергия.

Энергию обозначают буквой E . Единица энергии — $[E] = 1$ Дж.

В приведённом примере работу совершает движущийся молот. Другими примерами совершения работы движущимися телами могут служить: сжатие поршнем газа в цилиндре, пробой мишени движущимся снарядом и т.п. Во всех этих примерах движущиеся тела обладают энергией.

2. Кинетическая энергия материальной точки.

Энергия, которой обладает движущееся тело, называется **кинетической энергией**. Приведём вывод формулы кинетической энергии.

Работа силы F по определению равна: $A = Fs$. По второму закону Ньютона сила $\vec{F} = m\vec{a}$. Подставив это выражение в формулу работы, получим $A = mas$. Так как $2s = v_2^2 - v_1^2$, то $A = m(v_2^2 - v_1^2)/2$ или $A = mv_2^2/2 - mv_1^2/2$. В этой формуле выражение $mv_1^2/2$ характеризует первое состояние тела, $mv_2^2/2$ — второе состояние тела. Величина $mv^2/2 = E_k$ — называется кинетической энергией тела.

$mv_1^2/2 = E_{k1}$ — кинетическая энергия тела в первом состоянии, $mv_2^2/2 = E_{k2}$ — кинетическая энергия тела во втором состоянии. Таким образом, работа силы равна изменению кинетической энергии тела: $A = E_{k2} - E_{k1}$ или $A = \Delta E_k$. Это утверждение — **теорема о кинетической энергии**.

Если сила совершает положительную работу, то кинетическая энергия тела увеличивается, если работа силы отрицательная, то кинетическая энергия тела уменьшается.

3. Потенциальная энергия тела в однородном поле тяжести.

Потенциальной энергией называют энергию взаимодействия тел или частей тела, зависящую от их взаимного положения.

Поскольку тела взаимодействуют с Землёй, то они обладают потенциальной энергией взаимодействия с Землёй.

Если тело массой m падает с высоты h_1 до высоты h_2 , то работа силы тяжести F_T на участке $h = h_1 - h_2$ равна:

$A = F_T h = mgh = mg(h_1 - h_2)$
или $A = mgh_1 - mgh_2$. (рис. 60)

В полученной формуле mgh_1 характеризует начальное поло-

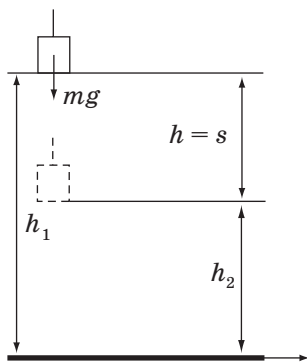


Рис. 60

жение (состояние) тела, mgh_2 характеризует конечное положение (состояние) тела. Величина $mgh_1 = E_{п1}$ — потенциальная энергия тела в начальном состоянии; величина $mgh_2 = E_{п2}$ — потенциальная энергия тела в конечном состоянии.

Можно записать $A = E_{п1} - E_{п2}$ или $A = -(E_{п2} - E_{п1})$, или $A = \Delta E_{п}$.

Таким образом, работа силы тяжести равна изменению потенциальной энергии тела. Знак «—» означает, что при движении тела вниз и, соответственно, при совершении силой тяжести положительной работы потенциальная энергия тела уменьшается. Если тело поднимается вверх, то работа силы тяжести отрицательна, а потенциальная энергия тела увеличивается.

Если тело находится на некоторой высоте h относительно поверхности Земли, то его потенциальная энергия в данном состоянии равна $E_{п} = mgh$. Значение потенциальной энергии зависит от того, относительно какого уровня она отсчитывается. Уровень, на котором потенциальная энергия равна нулю, называют нулевым уровнем.

В отличие от кинетической энергии потенциальной энергией обладают покоящиеся тела. Поскольку потенциальная энергия — это энергия взаимодействия, то она относится не к одному телу, а к системе взаимодействующих тел. В данном случае эту систему составляют Земля и поднятое над ней тело.

4. Потенциальная энергия упруго деформированного тела. Предположим, что левый конец пружины закреплён, а к правому её концу прикреплён груз (рис. 61).

Если пружину сжать, сместив правый её конец на x_1 , то в пружине возникнет сила упругости $F_{упр1}$, направленная вправо.

Если теперь предоставить пружину самой себе, то её правый конец переместится, удлинение пружины будет равно x_2 , а сила упругости $F_{упр2}$.

Работа силы упругости равна

$$A = F_{сп}(x_1 - x_2) = \frac{k(x_1 + x_2)(x_1 - x_2)}{2} = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}.$$

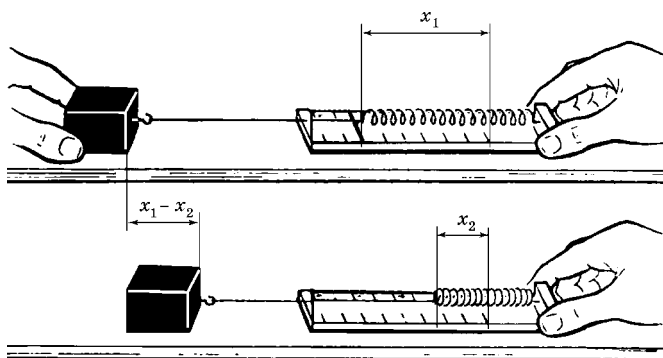


Рис. 61

$\frac{kx_1^2}{2} = E_{n1}$ — потенциальная энергия пружины в начальном состоянии, $\frac{kx_2^2}{2} = E_{n2}$ — потенциальная энергия пружины в конечном состоянии. Работа силы упругости равна изменению потенциальной энергии пружины.

Можно записать $A = E_{n1} - E_{n2}$ или $A = -(E_{n2} - E_{n1})$, или $A = -\Delta E_n$.

Знак «-» показывает, что при растяжении и сжатии пружины сила упругости совершает отрицательную работу, потенциальная энергия пружины увеличивается, а при движении пружины к положению равновесия сила упругости совершает положительную работу, а потенциальная энергия уменьшается.

Если пружина деформирована и её витки смещены относительно положения равновесия на расстояние x , то потенциальная энергия пружины в данном состоянии равна $E_n = kx^2/2$.

5. Закон сохранения полной механической энергии. Полная механическая энергия E тела — физическая величина, равная сумме его потенциальной E_n и кинетической E_k энергии: $E = E_n + E_k$.

Пусть тело падает вертикально вниз и в точке A находится на высоте h_1 относительно поверхности Земли и имеет скорость \vec{v}_1

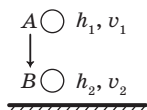


Рис. 62

(рис. 62). В точке B высота тела h_2 и скорость \vec{v}_2 . Соответственно в точке A тело обладает потенциальной энергией $E_{п1}$ и кинетической энергией $E_{к1}$, а в точке B — потенциальной энергией $E_{п2}$ и кинетической энергией $E_{к2}$.

При перемещении тела из точки A в точку B сила тяжести совершает работу, равную A . Как было показано, $A = -(E_{п2} - E_{п1})$, а также $A = E_{к2} - E_{к1}$. Приравняв правые части этих равенств, получаем: $-(E_{п2} - E_{п1}) = E_{к2} - E_{к1}$, откуда $E_{к1} + E_{п1} = E_{п2} + E_{к2}$ или $E_1 = E_2$.

Это равенство выражает закон сохранения механической энергии: **полная механическая энергия замкнутой системы тел, между которыми действуют консервативные силы (силы тяготения или упругости), сохраняется.**

В реальных системах действуют силы трения, которые не являются консервативными, поэтому в таких системах полная механическая энергия не сохраняется, она превращается во внутреннюю энергию.

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ 7

1. Шарик массой 120 г начинает падать с высоты 5 м из состояния покоя. Какова его кинетическая энергия перед касанием поверхности Земли, если сопротивление воздуха пренебрежимо мало.
 - 1) 12 Дж
 - 2) 6 Дж
 - 3) 1,2 Дж
 - 4) 0,6 Дж
2. Скорость тела массой 2 кг, движущегося вдоль оси X , изменяется по закону: $v_x(t) = v_{0x} + a_x t$, где $v_{0x} = 10$ м/с, $a_x = -2$ м/с². Кинетическая энергия тела в момент времени $t = 2$ с равна
 - 1) 36 Дж
 - 2) 100 Дж
 - 3) 144 Дж
 - 4) 4 Дж

3. Скорость автомобиля массой $m = 10^3$ Н увеличилась от 10 м/с до 20 м/с. Работа равнодействующей всех сил равна
- 1) $1,5 \cdot 10^5$ Дж 3) $2,5 \cdot 10^5$ Дж
 2) $2 \cdot 10^5$ Дж 4) $3 \cdot 10^5$ Дж
4. Тело массой 2 кг, брошенное с поверхности Земли вертикально вверх со скоростью 4 м/с, упало обратно на Землю. Какой потенциальной энергией обладало тело относительно поверхности Земли в верхней точке траектории? Сопротивлением воздуха пренебречь.
- 1) 8 Дж 3) 32 Дж
 2) 16 Дж 4) 80 Дж
5. Тело массой 1 кг, брошенное вертикально вверх с поверхности Земли, достигло максимальной высоты 20 м. Какую по модулю скорость имело тело на высоте 10 м? Сопротивлением воздуха пренебречь.
- 1) 7 м/с 3) 14,1 м/с
 2) 10 м/с 4) 20 м/с
6. Первая пружина имеет жёсткость 20 Н/м, вторая — 40 Н/м. Обе пружины растянуты на 1 см. Отношение потенциальных энергий пружин E_2/E_1 равно
- 1) 1 3) $\sqrt{3}$
 2) 2 4) 4
7. При растяжении пружины на 0,1 м в ней возникает сила упругости, равная 2,5 Н. Определите потенциальную энергию этой пружины при растяжении на 0,08 м.
- 1) 0,04 Дж 3) 25 Дж
 2) 0,16 Дж 4) 0,08 Дж
8. Камень брошен вверх под углом к горизонту. Сопротивление воздуха пренебрежимо мало. Как меняются с набором высоты потенциальная энергия камня в поле тяжести, его полная механическая энергия и ускорение камня?

Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличивается 3) не изменяется
2) уменьшается

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Потенциальная энергия камня	Полная механическая энергия камня	Ускорение камня

9. Горизонтально расположенную пружину с прикреплённым к ней грузом растянули, подействовав на неё некоторой силой, а затем отпустили. Груз начал двигаться к положению равновесия. Как при этом изменяются потенциальная энергия пружины, кинетическая энергия груза и ускорение груза?

Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличивается 3) не изменяется
2) уменьшается

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Потенциальная энергия пружины	Кинетическая энергия груза	Ускорение груза

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Гармонические колебания. Амплитуда и фаза колебаний. Кинематическое описание

1. Свободные механические колебания. Механические колебания — точно или приблизительно повторяющееся движение, при котором тело смещается относительно положения равновесия, отклоняясь от него то в одну, то в другую сторону.

Механические колебания возникают и существуют в колебательных системах. К таким колебательным системам относятся математический и пружинный маятники.

Колебательная система — **математический маятник** — представляет собой тело, подвешенное на нити, размеры которого много меньше длины нити. Кроме того, нить математического маятника нерастяжима и не имеет массы, вся масса такого маятника сосредоточена в подвешенном к нити грузе.

В положении равновесия (рис. 63) на маятник действуют противоположно направленные сила тяжести (\vec{F}_T) и сила упругости (\vec{F}_y). Их равнодействующая равна нулю.

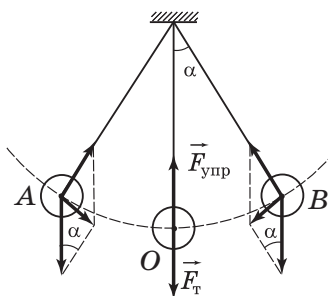


Рис. 63

При отклонении маятника от положения равновесия вправо эти две силы направлены под углом друг к другу и их равнодействующая \vec{F} уже не равна нулю. Под действием равнодействующей силы \vec{F} маятник начнёт двигаться к положению равновесия. Поскольку груз обладает инертностью, то он пройдёт положение равновесия и отклонится от него в другую сторону. Дойдя до крайнего левого положения, маятник под действием равнодействующей сил тяжести и упругости начнёт двигаться к положению равновесия. Пройдя его, он опять отклонится вправо. Процесс будет повторяться. Таким образом, в процессе колебаний изменяются смещение, скорость, действующая на него сила, ускорение маятника. При этом ускорение маятника прямо пропорционально его смещению и направ-

лено в противоположную сторону. Для математического маятника это равенство имеет вид: $a_x = -\frac{g}{l} \cdot x$, где l — длина нити маятника.

Колебательная система — **пружинный маятник** — это груз, прикреплённый к пружине (рис. 64).

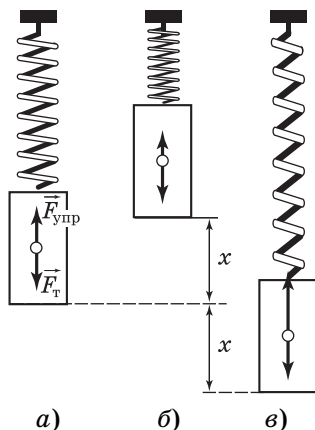


Рис. 64

Считают, что масса пружины маятника мала по сравнению с массой груза, деформацией тела пренебрегают по сравнению с деформацией пружины. Кроме того, полагают, что деформация пружины подчиняется закону Гука ($\vec{F}_{\text{упр.}} = -k\vec{x}$).

В состоянии равновесия пружина не деформирована, и на груз в горизонтальном направлении силы не действуют.

При выведении груза из состояния равновесия на него будет действовать сила упругости пружины F_y , прямо пропорциональная её удлинению и направленная к положению равновесия. Под действием этой силы груз начнёт двигаться к положению равновесия.

Благодаря инертности груз пройдёт положение равновесия. Пружина сожмётся, и в ней опять возникнет сила упругости. Дойдя до крайнего левого положения, груз остановится, а затем под действием силы упругости начнёт возвращаться в положение равновесия. Пройдя его, он отклонится вправо, и процесс повторится. Пружинный

маятник будет совершать свободные колебания относительно положения равновесия.

Колебания, которые маятник совершает за счёт однократно переданной ему энергии, называются свободными.

В соответствии со вторым законом Ньютона $F_x = ma_x$. С другой стороны, $F_x = -kx$. Откуда $ma_x = -kx$, $a_x = -\frac{k}{m} \cdot x$. Таким образом, ускорение колебаний пружинного маятника так же, как и математического, прямо пропорционально его смещению с обратным знаком. Такие колебания называются **гармоническими**.

2. Характеристики механических колебаний. Отклонение маятника от положения равновесия называется смещением (x), а максимальное отклонение — амплитудой колебаний (A или x_0).

Движение маятника от точки A до точки B и обратно до точки A называется **полным колебанием** (рис. 63). Время, за которое маятник совершает одно полное колебание, называется **периодом колебаний**. Период обозначают буквой T и измеряют в секундах.

Если маятник совершил за 4 с 8 полных колебаний, то его период равен 0,5 с.

Величину, обратную периоду, называют частотой колебаний. Частоту обозначают буквой ν . По определению $\nu = 1/T$. Единица частоты 1 герц (Гц).

Один герц — это частота таких колебаний, при которых за 1 секунду совершается одно полное колебание: $1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$.

Если частота колебаний 5 Гц, то это означает, что за 1 секунду совершается 5 полных колебаний. Период таких колебаний равен: $T = 0,2 \text{ с}$.

Период колебаний математического и пружинного маятников зависит от характеристик этих систем.

Формула периода колебаний математического маятника: $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, где l — длина нити маятника, g — ускорение свободного падения.

Формула периода колебаний пружинного маятника имеет вид: $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$, где m — масса груза, k — коэффициент жёсткости пружины.

Как следует из полученных формул, частота колебаний зависит от параметров колебательной системы. Эта частота называется частотой собственных колебаний маятника.

3. Зависимость характеристик колебательного движения от времени.

Основной задачей механики является определение положения тела, т.е. его координаты, в любой момент времени. Эта задача может быть решена, если известно уравнение, выражающее зависимость координаты тела от времени. Для гармонического колебания это уравнение имеет вид: $x = x_0 \cos \omega_0 t$ или $x = x_0 \sin \omega_0 t$, в зависимости от того, какой была координата (смещение) маятника в начальный момент времени. В том случае, если маятник в начальный момент времени был отклонён от положения равновесия (начальная координата не равна нулю), изменение координаты происходит по закону косинуса; если он начал двигаться из положения равновесия ($x_0 = 0$), то изменение координаты (смещения) подчиняется закону синуса.

В записанном уравнении координаты ω_0 — *циклическая частота собственных колебаний*. Циклическая частота колебаний равна числу колебаний за 2π секунд:

$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$. Циклическая частота так же, как и период колебаний маятника, зависит от параметров колебательной системы: $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$ и $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$.

Поскольку скорость равна производной от координаты по времени, то если $x = x_0 \cos \omega_0 t$,

$$v_x = -x_0 \omega_0 \sin \omega_0 t = -x_0 \cos \left(\omega_0 t - \frac{\pi}{2} \right);$$

амплитуда скорости равна $v_0 = x_0 \omega_0$.

Ускорение равно производной от скорости по времени: $a_x = -\omega_0^2 x_0 \cos \omega_0 t$. Амплитуда ускорения равна $a_0 = x_0 \omega_0^2$.

Величина, стоящая под знаком синуса или косинуса, называется фазой колебаний и обозначается буквой φ : $\varphi = \omega_0 t$. При определённом значении фазы колебаний смещение, скорость и ускорение имеют вполне определённое значение. Таким образом, фаза колебаний характеризует состояние колебательной системы в любой момент времени.

Если в начальный момент времени ($t = 0$) фаза не была равна нулю, а имела некоторое начальное значение φ_0 , то уравнение для координаты будет иметь вид: $x = x_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$. Соответствующим образом будут записаны и уравнения для скорости и ускорения.

4. Превращение энергии в колебательной системе.

При выведении маятника из положения равновесия ему сообщают потенциальную энергию. За счёт этой энергии происходит движение маятника к положению равновесия. В процессе движения потенциальная энергия переходит в кинетическую. В положении равновесия потенциальная энергия маятника равна нулю, а его кинетическая энергия максимальна. При движении маятника влево кинетическая энергия переходит в потенциальную; в крайнем левом положении кинетическая энергия равна нулю, а потенциальная — максимальна. В отсутствие трения полная механическая энергия маятника сохраняется.

5. Вынужденные колебания. При наличии сопротивления воздуха сообщённая маятнику энергия расходуется на совершение работы против силы трения, энергия маятника постоянно уменьшается, и колебания со временем прекращаются. Такие колебания называются затухающими.

Реальные свободные колебания маятника всегда затухающие.

Для получения незатухающих колебаний необходимо компенсировать потери энергии. Это можно сделать, действуя на маятник с некоторой периодической силой. В этом случае колебания происходят под действием внешней силы и становятся вынужденными. Работа этой силы и восполняет потери энергии, вызванные трением.

Вынужденные колебания — это колебания, происходящие под действием внешней, периодически изменяющейся силы. Частота вынужденных колебаний равна частоте изменения действующей на тело силы. Частота вынужденных колебаний равна частоте изменения внешней силы.

6. Резонанс. Если подвесить к верёвке, прикреплённой к стойке, несколько маятников разной длины и привести в колебание один из них, то и другие маятники начнут колебаться. Частота их колебаний будет равна частоте колебаний маятника, возбудившего колебания. При этом с наибольшей амплитудой будет колебаться маятник, длина которого равна длине этого маятника. Следовательно, наибольшую амплитуду колебаний имеет маятник, собственная частота колебаний которого совпадает с частотой вынуждающей силы. Явление, которое наблюдается в этом случае, называется **резонансом**.

Резонанс — явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний тела, наступающего при равенстве частоты изменения внешней силы и частоты собственных колебаний тела.

На рисунке 65 приведён график зависимости амплитуды колебаний от частоты внешней силы.

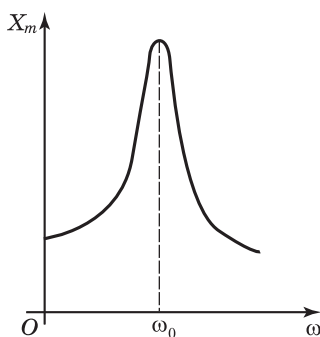


Рис. 65

На оси X отмечена собственная частота колебаний маятника ω_0 . Из графика видно, что по мере увеличения частоты внешней силы амплитуда колебаний достигает

максимума, а затем при дальнейшем увеличении частоты внешней силы она уменьшается.

Явление резонанса необходимо учитывать в практике. Известны случаи, когда вследствие резонанса разваливался на части самолёт в воздухе, ломались гребные винты у судов, рушились железнодорожные рельсы. Во всех этих случаях с резонансом приходится бороться, изменяя либо собственную частоту системы, либо частоту силы, вызывающей колебания.

Механические волны

1. Условия распространения колебаний в среде.

Механической волной называется процесс распространения механических колебаний в среде. Для возникновения и распространения колебаний необходимо наличие источника колебаний и среды, частицы которой взаимодействуют между собой с силами упругости.

2. Поперечные и продольные волны. Если закрепить конец шнура, слегка натянуть его и сместить свободный конец шнура вверх, а затем вниз, т.е. привести его в колебания, то по шнуру «побежит» волна (рис. 66, поперечная волна).

При этом каждая точка шнура будет совершать вынужденные колебания с частотой внешней силы, но с некоторым опозданием. Анализируя распространение колебаний по шнуру, можно заметить, что волна «бежит» в горизонтальном направлении, а колебания частицы совершают в вертикальном направлении.

Волны, направление распространения которых перпендикулярно направлению колебаний частиц среды, называются поперечными.

Поперечные волны представляют собой чередование горбов и впадин.

Если закрепить один конец длинной пружины, а по другому ударить, то возникшее на конце

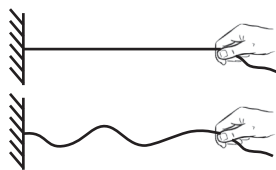


Рис. 66

пружины сгущение витков «побежит» по ней. В этом случае волна представляет собой распространение сгущений и разрежений. Частицы среды при этом совершают колебания вдоль направления распространения волны. Такие волны называют *продольными*.

Продольные волны — это такие, направление распространения которых совпадает с направлением колебаний частиц среды.

Продольные волны представляют собой чередование сгущений и разрежений.

Распространение продольных волн связано с изменением объёма тела. Они могут распространяться как в твёрдых, так и в жидких и газообразных телах, поскольку во всех этих телах при изменении объёма возникают силы упругости.

Распространение поперечных волн связано, главным образом, с изменением формы тела. В газах и жидкостях при изменении формы силы упругости не возникают, поэтому поперечные волны в них распространяться не могут. Поперечные волны распространяются только в твёрдых телах.

Волновое движение имеет следующие особенности:

- механические волны образуются благодаря инертности частиц среды и взаимодействию между ними, проявляющемуся в существовании сил упругости;

- каждая частица среды совершает вынужденные колебания такие же, что и первая частица, приведённая в колебания, частота которых равна частоте внешней силы. Период колебаний всех частиц одинаков;

- колебание каждой частицы происходит с запаздыванием, которое обусловлено её инертностью; это запаздывание тем больше, чем дальше находится частица от источника колебаний;

- вместе с волной не переносится вещество, переносится энергия.

3. Длина и скорость волны. Расстояние между двумя ближайшими горбами или впадинами поперечной волны, а также между двумя ближайшими сгущениями или разрежениями продольной волны называется длиной волны.

Длина волны обозначается буквой λ и измеряется в метрах.

На расстояние, равное длине волны, волна распространяется за время, равное периоду колебаний.

Скоростью волны считается скорость перемещения гребня или впадины в поперечной волне, сгущения или разрежения в продольной волне.

За время, равное периоду колебаний (T), гребень или впадина перемещается на расстояние, равное длине волны (λ). Следовательно, скорость волны (v) равна: $v = \frac{\lambda}{T}$.

Поскольку $T = \frac{1}{\nu}$, то формулу для скорости можно записать иначе: $v = \lambda \nu$.

Скорость волны равна произведению длины волны и частоты колебаний.

4. Звуковые волны. Колебания, происходящие с частотой от 16 Гц до 20000 Гц, являются звуковыми колебаниями.

Колебания, частота которых меньше 16 Гц, называются инфразвуком, а колебания, частота которых больше 20 000 Гц, называются ультразвуком.

Для возникновения и распространения звуковых колебаний так же, как и любых механических колебаний, необходимы источник колебаний и упругая среда.

Скорость звука можно определить, если известны расстояние от источника звука S и время распространения звука t : $v = \frac{S}{t}$. Скорость звука неодинакова в разных средах и зависит от температуры среды.

Физиологическим характеристикам звука (громкости, высоте тона) соответствуют физические характеристики. Громкость звука определяется амплитудой колебаний. Чем она больше, тем громче звук. Звук тем выше, чем больше частота колебаний.

Ещё одной характеристикой звука является тембр, его своеобразная окраска. Тембр определяется набором частот, из которых состоит тот или иной звук.

5. Свойства звуковых волн. Механические волны обладают всеми свойствами, присущими волновому движению. Они подчиняются закону отражения: угол отражения β равен углу падения α ($\beta = \alpha$).

Типичными свойствами волнового движения являются интерференция и дифракция. **Интерференция волн** — сложение волн, в результате которого наблюдается устойчивая во времени картина усиления или ослабления амплитуды колебаний частиц волны (интенсивности волны) в различных точках пространства.

Устойчивая интерференционная картина образуется в том случае, если волны **когерентны** (излучаются когерентными источниками), т.е. имеют одинаковую частоту и неизменную во времени разность фаз.

Предположим, что волны излучаются двумя когерентными источниками. От источника до точки А они проходят разные расстояния. Разность этих расстояний d называется **разностью хода волн**. В зависимости от того, чему равна разность хода волн, и получается либо усиление, либо ослабление интенсивности волны.

Если разность хода волн равна целому числу длин волн, то наблюдается усиление интенсивности волны (максимум интенсивности): $d = 2n \frac{\lambda}{2}$.

Если разность хода волн равна нечётному числу половолн, то наблюдается ослабление интенсивности волны (минимум интенсивности): $d = (2n + 1)\lambda/2$.

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ 8

1. Частота собственных колебаний математического маятника равна 0,6 Гц. Какой станет частота таких колебаний, если массу груза уменьшить в 4 раза?
 - 1) увеличится в 4 раза
 - 2) уменьшится в 4 раза
 - 3) увеличится в 2 раза
 - 4) не изменится

2. В таблице представлены данные о положении шарика, колеблющегося вдоль оси Ox , в различные моменты времени.

$t, \text{ с}$	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
$X, \text{ мм}$	0	2	5	10	13	15	13	10	5
$t, \text{ с}$	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	
$X, \text{ мм}$	2	0	-2	-5	-10	-13	-15	-13	

Какова амплитуда колебаний шарика?

- 1) 7,5 мм
 - 2) 13 мм
 - 3) 15 мм
 - 4) 30 мм
3. Тело, подвешенное на пружине, совершает гармонические колебания с частотой ν . С какой частотой изменяется кинетическая энергия тела?
- 1) $\nu/2$
 - 2) 2ν
 - 3) ν
 - 4) ν^2
4. Зависимость смещения гармонически колеблющегося тела от времени имеет вид: $x = 10\cos\omega t$. Скорость этих колебаний изменяется в соответствии с уравнением
- 1) $v = 10\cos\omega t$
 - 2) $v = 50\cos\omega t$
 - 3) $v = -10\omega\sin\omega t$
 - 4) $v = -50\sin\omega t$
5. Волна частотой 5 Гц распространяется в среде со скоростью 12 м/с. Длина волны равна
- 1) 0,4 м
 - 2) 2,4 м
 - 3) 12 м
 - 4) 60 м

6. Частота колебаний струны равна 500 Гц. Скорость звука в воздухе равна 340 м/с. Чему равна длина звуковой волны?

- 1) 68 м
- 2) 340 м
- 3) 170 м
- 4) 0,68 м

7. 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 340 м/с?

- 1) 850 м
- 2) 425 м
- 3) 3400 м
- 4) 1700 м

8. Груз массой m , подвешенный к пружине, совершает колебания с периодом T и амплитудой x_0 . Что произойдёт с периодом, максимальной потенциальной энергией пружины и частотой, если при неизменной амплитуде уменьшить массу груза?

Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличивается
- 2) уменьшается
- 3) не изменяется

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Период колебаний	Частота колебаний	Максимальная потенциальная энергия пружины

9. Массивный шарик, подвешенный к потолку на упругой пружине, совершает вертикальные гармонические колебания. Как ведёт себя модуль и каково направление векторов скорости и ускорения шарика в тот момент,

когда шарик проходит положение равновесия, двигаясь вниз?

Установите соответствие между физическими величинами и их значением.

Запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

**ФИЗИЧЕСКИЕ
ВЕЛИЧИНЫ**

- А) скорость шарика
Б) ускорение шарика

**ЗНАЧЕНИЯ
ВЕЛИЧИН**

- 1) достигает максимума, вверх
2) достигает максимума, вниз
3) равняется нулю

Ответ:

А	Б

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА

Атомы и молекулы, их характеристики

1. Термодинамический и статистический методы изучения тепловых явлений. Молекулярная физика изучает законы, которым подчиняется поведение систем, состоящих из большого числа частиц. Такие системы называют **макроскопическими системами** или **макроскопическими телами**. Примерами макроскопических систем могут служить газ в баллоне, жидкость в сосуде, твёрдое тело.

В основе молекулярной физики лежат две теории: термодинамика и молекулярно-кинетическая теория строения вещества, которые используют разные, но взаимно дополняющие друг друга методы изучения тепловых явлений и тепловых свойств тел и веществ: **термодинамический и статистический**.

Описание состояния и свойств макроскопической системы с помощью макроскопических параметров, которые часто называют **термодинамическими**, является задачей термодинамического метода. Он опирается на непосредственные данные наблюдений и опытов и изучает явления и свойства макроскопических систем, связанные с превращением энергии, не рассматривая их внутреннее строение.

Поскольку свойства макроскопической системы зависят от их внутреннего строения, характера движения и взаимодействия входящих в неё частиц, использование лишь термодинамического метода изучения систем не позволяет эти свойства объяснить.

При использовании **статистического метода** исходят из того, что все вещества состоят из непрерывно хаотически движущихся частиц. При этом строят модель вну-

тренного строения вещества и предсказывают свойства системы, вытекающие из построенной модели. Математическую основу статистического метода составляет теория вероятности.

При использовании статистического метода анализа свойств макроскопических систем оперируют **средними значениями величин**. Так, характеризуя концентрацию молекул в сосуде, имеют в виду среднее число частиц в единице объёма. Манометр показывает среднее значение давления газа на стенки сосуда, так как он не может реагировать на быстрые изменения импульса, сообщаемого стенкам отдельными молекулами. Устанавливая связь между температурой тела и скоростью движения его молекул, учитывают среднюю скорость и среднюю кинетическую энергию движения частиц.

То, что состояние частиц макроскопической системы в определённые моменты времени носит случайный характер, не означает, что их движение не подчиняется каким-либо законам. В отличие от динамических законов оно описывается законами, называемыми **статистическими**.

Хотя скорости и энергии частиц в некоторый момент времени различны и случайны, имеет место вполне определённое распределение частиц по скоростям и энергиям: у большинства частиц значение скорости близко к некоторому значению, называемому наиболее вероятным; средние значения скорости и энергии движения частиц связаны с температурой системы.

2. Основные положения молекулярно-кинетической теории строения вещества.

В основе молекулярно-кинетической теории строения вещества лежат следующие положения.

1. Все вещества состоят из частиц (молекул, атомов, ионов), между которыми есть промежутки. Молекула — мельчайшая частица вещества, сохраняющая его химические свойства.

2. Частицы вещества находятся в непрерывном хаотическом движении.

3. Частицы вещества взаимодействуют между собой: между ними действуют силы притяжения и отталкивания.

Эти положения являются обобщением большого числа экспериментальных фактов.

3. Экспериментальные доказательства существования молекул и атомов. Идея атомистического строения вещества была высказана в V в. до н.э. древнегреческими философами Левкиппом и Демокритом.

Значительный вклад в развитие учения о строении вещества внёс российский учёный М.В. Ломоносов (1711–1765). Он считал, что все тела состоят из «элементов» (атомов) — наименьших, неделимых частиц. В свою очередь, «элементы» входят в состав более крупных частиц — «корпускул» (молекул).

Имеются и другие косвенные подтверждения первого положения молекулярно-кинетической теории строения вещества. К ним относится, в частности, явление диффузии.

Косвенным подтверждением этого положения является результат опыта по смешиванию воды и спирта. Если длинную узкую стеклянную трубку до середины заполнить водой и сверху налить спирт, а затем перемешать жидкости, то объём смеси окажется меньше суммы первоначальных объёмов воды и спирта. Это может быть объяснено лишь тем, что молекулы спирта проникли в промежутки между молекулами воды, молекулы воды — в промежутки между молекулами спирта. Другим косвенным подтверждением того, что тела состоят из частиц, между которыми есть промежутки, служит явление диффузии.

В настоящее время крупные молекулы органических соединений можно наблюдать непосредственно с помощью электронного или ионного микроскопа.

4. Размеры и масса молекул. Атомы всех химических элементов имеют размеры одного порядка величины (10^{-10} м). Простейшие молекулы, состоящие из нескольких атомов, сравнимы с размерами атома — порядка 10^{-10} м.

Размеры молекул органических соединений 10^{-9} м, крупные молекулы белковых соединений достигают размеров 10^{-8} – 10^{-7} м. Наибольшие размеры имеет молекула дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК) клеток млекопитающих. Так, у человека вытянутая молекула ДНК имеет размеры порядка 1,5–3,2 см.

Масса молекул очень мала. Например, масса молекулы кислорода составляет $5,3 \cdot 10^{-26}$ кг, молекулы водорода — $3,3 \cdot 10^{-27}$ кг.

При расчётах часто пользуются понятием **относительной молекулярной массы** M_r , которой называют величину, равную отношению массы молекулы m_0 к $1/12$ массы атома углерода m_{0c} :

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12}m_{0c}}.$$

5. Количество вещества. При сравнении массы тел, состоящих из разных веществ, по значениям их массы нельзя сделать вывод о соотношении числа содержащихся в них молекул, поскольку масса молекул и атомов различных веществ неодинакова. В частности, 1 кг свинца и 1 кг железа содержат разное число атомов.

Поэтому вводят величину, позволяющую характеризовать массу тел, состоящих из разных веществ, по числу содержащихся в них молекул. Такой физической величиной является **количество вещества**.

Количеством вещества (ν) называют величину, равную отношению числа молекул или атомов N в данном теле к числу N_A атомов в 0,012 кг углерода.

Знание количества вещества и числа молекул в 0,012 кг углерода позволяет определить число молекул в теле. Единицей количества вещества является **1 моль**.

Один моль — количество вещества, содержащее столько молекул (атомов), сколько их содержится в 0,012 кг углерода C_{12} .

Если взято количество вещества меди 5 моль, то это означает, что число молекул в данном количестве вещества в 5 раз больше, чем в 0,012 кг углерода.

6. Молярная масса.

Молярной массой (M) называют массу количества вещества 1 моль.

Молярную массу находят, умножая относительную молекулярную массу M_r на 10^{-3} кг/моль:

$$M = M_r \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль.}$$

Молярная масса воды, таким образом, равна $18 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, поскольку её относительная молекулярная масса 18. Зная молярную массу M вещества и количество вещества ν , можно определить массу вещества m :

$$m = M\nu.$$

7. Концентрация молекул. Постоянная Авогадро. Поскольку молекулы имеют малые размеры, их число в любом макроскопическом теле очень велико.

Число молекул в единице объёма называют **концентрацией**. Концентрация n вычисляется по формуле: $n = \frac{N}{V}$, где N — число молекул в теле, V — его объём.

Концентрацию молекул в теле можно определить, зная плотность вещества и массу молекулы этого вещества. Если плотность воды ρ составляет 1000 кг/м^3 , а масса молекулы воды $m_0 = 3 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$, то концентрация молекул воды равна: $n = \rho/m_0 = 1000 \text{ кг/м}^3 : 3 \cdot 10^{-26} \text{ кг} = 0,3 \cdot 10^{29} \text{ м}^{-3}$.

Концентрация молекул любого газа при нормальных условиях (нормальном атмосферном давлении и температуре 20°C) одинакова и равна приведённому для водорода значению. Это число называется **постоянной Ломмидта (L)**.

Поскольку 1 моль — это количество вещества, содержащее такое же число молекул, что и $0,012 \text{ кг}$ углерода C^{12} , то, следовательно, 1 моль любого вещества содержит одинаковое число молекул (атомов). Это число называют **постоянной Авогадро**.

Постоянная Авогадро N_A — число молекул или атомов в количестве вещества один моль.

Поскольку в одном моле любого вещества содержится одинаковое число молекул, то при одинаковых условиях 1 моль любого газа занимает одинаковый объём.

Объём, занимаемый количеством вещества любого газа 1 моль при нормальном атмосферном давлении, равен $0,0224 \text{ м}^3$.

Постоянная Авогадро, являющаяся универсальной физической постоянной, равна $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$.

Движение молекул

1. Диффузия. Частицы вещества (молекулы, атомы, ионы) находятся в непрерывном хаотическом движении, называемом *тепловым*.

Слово «непрерывное» означает, что движение частиц вещества никогда не прекращается. Слово «хаотическое» означает, что нельзя выделить какое-то преимущественное направление, в котором двигалось бы большинство молекул, направление движения каждой молекулы постоянно меняется.

Одним из доказательств движения молекул служит явление диффузии.

Диффузия — это явление проникновения молекул одного вещества в промежутки между молекулами другого вещества.

Диффузия происходит во всех веществах: и в твёрдых, и в жидких, и в газообразных. Однако скорость диффузии в них различна: поскольку промежутки между молекулами газов сравнительно большие, то и скорость диффузии в них самая большая. В жидкостях диффузия происходит медленнее, чем в газах, поскольку молекулы жидкостей располагаются ближе друг к другу.

Ещё медленнее протекает диффузия в твёрдых телах. Если плотно прижать друг к другу пластины из золота и свинца и поместить их в печь, имеющую достаточно высокую температуру, то через год с помощью микроскопа можно будет обнаружить взаимное проникновение молекул этих веществ в межмолекулярные промежутки.

Скорость диффузии возрастает с повышением температуры. Так, если опустить на дно двух стаканов кристаллики марганцево-кислого калия (перманганат калия) и один

стакан поставить в холодильник, а другой оставить в тёплом месте, то можно заметить, что вода быстрее окрасится в стакане, который находится в комнате.

2. Броуновское движение. Одним из доказательств того, что молекулы движутся, является броуновское движение. Английский ботаник Р. Броун в 1827 г., наблюдая в микроскоп взвешенные в воде частички цветочной пыльцы, заметил, что эти частички совершают беспорядочное движение, описывая при этом сложные зигзагообразные траектории (рис. 67).

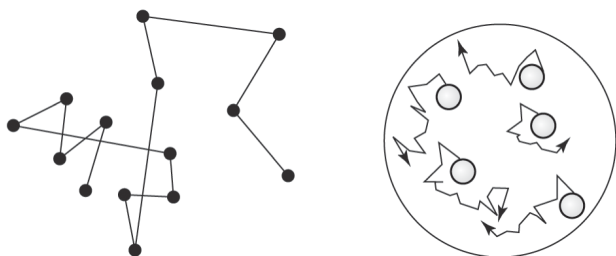


Рис. 67

Подобное движение можно наблюдать, если растереть тушь или краску до мелких крупинок и размешать краску в воде. Рассматривая полученную смесь в микроскоп, можно заметить, что крупинки краски непрерывно движутся. В солнечный день можно наблюдать в комнате в солнечном луче беспорядочное движение пылинок, взвешенных в воздухе. Приведённые примеры — примеры **броуновского движения**.

Броуновское движение — это хаотическое движение мелких твёрдых частиц в жидкости или газе.

Причиной броуновского движения частиц является хаотическое движение молекул среды, в которой эти частицы находятся.

В каждый момент времени число молекул, ударяющихся о частицу с разных сторон, неодинаково, различны значения и направления их скоростей, следовательно, импульсы, передаваемые частице с разных сторон, не ком-

пенсируют друг другу, и на частицу действует результирующая сила, не равная нулю. Частица движется в сторону действия этой силы. В следующий момент времени нескомпенсированный импульс заставляет частицу двигаться в другую сторону.

Создание теории броуновского движения, её экспериментальное подтверждение завершили победу молекулярно-кинетической теории строения вещества.

3. Определение скорости движения молекул. Участвуя в непрерывном хаотическом движении, молекулы постоянно сталкиваются между собой, при этом число сталкивающихся частиц в каждый момент времени различно. Поэтому импульсы и скорости частиц постоянно изменяются, и в тот или иной момент времени их значения у разных молекул различны.

Впервые скорости движения молекул газа были измерены в 1920 г. немецким физиком О. Штерном (1888–1969). Проведённый им эксперимент показал, что как «медленных», так и «быстрых» атомов немного. Большая часть из них имеет скорости, близкие к некоторому значению, называемому **наиболее вероятной скоростью**.

При изменении условий опыта, например температуры вещества, получают иные значения скоростей, но характер распределения атомов и молекул не меняется. Отсюда следует, что распределение молекул по скоростям подчиняется определённому закону.

Теоретически закон распределения молекул по скоростям установил английский физик Дж. К. Максвелл (1831–1839) в 1859 г., т.е. задолго до опытов О. Штерна.

Кривая распределения молекул по скоростям изображена на рисунке 68.

По оси абсцисс отложены значения скоростей молекул, по оси ординат — доля моле-

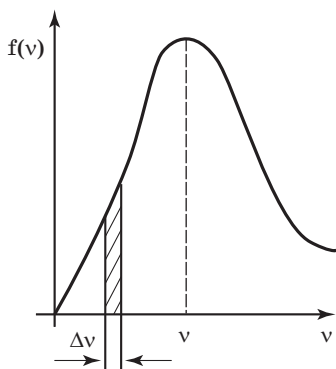


Рис. 68

кул $\Delta N/N$, обладающих скоростями, значения которых лежат в интервале Δv (0–100, 100–200 м/с и т.д.), отнесённая к ширине интервала скоростей (Δv), т.е. $\frac{\Delta N}{N\Delta v}$. Причём доля молекул, значения скоростей которых лежат в интервале от v до Δv , численно равна площади прямоугольника, построенного на интервале Δv как на стороне, т.е.

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta N}{N\Delta v} \Delta v.$$

Построив на каждом интервале скоростей соответствующие прямоугольники, получим изображение распределения молекул по скоростям. Если уменьшить интервалы скоростей, то ломаная линия приблизится к плавной кривой. Значение скорости, которому соответствует максимум кривой, есть наивероятнейшая скорость.

При повышении температуры максимум кривой смещается в область больших значений скорости, при понижении температуры — в область меньших.

Таким образом, из опытов по определению скоростей молекул и из теории Максвелла вытекают следующие выводы.

1. Распределение молекул по скоростям подчиняется определённым закономерностям; оно постоянно во времени при неизменных внешних условиях.

2. Значения скоростей большинства молекул близки к некоторому значению, называемому наиболее вероятным.

3. При повышении температуры скорость движения молекул возрастает, максимум кривой распределения смещается в область больших значений скоростей.

4. Средний квадрат скорости. Помимо наиболее вероятной скорости, движение молекул характеризуется **средним значением квадрата скорости**. Пусть модули скоростей отдельных молекул v_1, v_2, \dots, v_N , тогда среднее значение квадрата скорости равно сумме квадратов скоростей отдельных молекул, делённой на число молекул N , и определяется по формуле:

$$\overline{v^2} = \frac{v_1^2 + v_1^2 + \dots + v_N^2}{N}.$$

Если некоторая молекула имеет модуль скорости v , то проекция скорости на координатные оси равны соответственно v_x , v_y , v_z .

Квадрат модуля скорости равен сумме квадратов его проекций: $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$ (рис. 69).

Соответственно, такое же соотношение существует между средним значением квадрата скорости и средним значением квадратов проекций скорости: $\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}$.

Молекулы движутся хаотически, поэтому направления OX , OY и OZ равноправны, т.е. можно считать, что среднее значение квадратов проекций

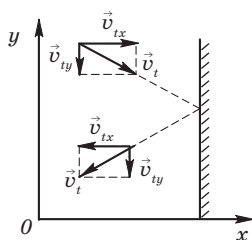


Рис. 69

скорости равны друг другу: $\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}$. Откуда $\overline{v^2} = 3\overline{v_x^2}$ или $\overline{v_x^2} = \frac{\overline{v^2}}{3}$, т.е. средний квадрат проекции скорости на координатную ось равен одной третьей среднего квадрата самой скорости.

Выше говорилось о том, что чем больше скорость движения молекул, тем выше температура тела. Правильнее говорить о среднем квадрате скорости, т.е. чем больше средний квадрат скорости хаотического движения молекул, тем выше температура тела.

Взаимодействие молекул и атомов

1. Силы взаимодействия между молекулами и атомами. Хорошо известно, что жидкости и твёрдые тела не распадаются на отдельные молекулы, хотя молекулы разделены промежутками и беспорядочно движутся; трудно сломать палку, растянуть или сжать твёрдое тело. Сломав палку, нельзя восстановить её первоначальный вид. Причиной этого является то, что *молекулы и атомы взаимодействуют между собой.*

Рассмотрим опыт.

Если опустить на поверхность воды в сосуде стеклянную пластину, прикрепив к ней предварительно динамометр, то понадобится некоторое усилие, чтобы оторвать пластину от воды. Об этом будет свидетельствовать растяжение пружины динамометра. Это происходит потому, что между молекулами **действуют силы притяжения**.

Тела, несмотря на то что между молекулами есть промежутики, трудно сжать. Это связано с тем, что наряду с силами притяжения между молекулами **действуют силы отталкивания**. Если бы их не было, молекулы и атомы слиплись бы друг с другом, а этого не происходит.

2. Природа межмолекулярного взаимодействия. Межмолекулярное взаимодействие имеет электромагнитную природу.

Атом состоит из положительно заряженного ядра и отрицательно заряженных электронов. В обычном состоянии атом и молекула электрически нейтральны. Ядра и электроны соседних атомов взаимодействуют между собой. При этом электроны одного из атомов будут притягивать ядра другого, а электроны этих атомов, так же как и их ядра, будут отталкиваться друг от друга. Таким образом, *электромагнитное межмолекулярное взаимодействие проявляется в притяжении и отталкивании*.

На расстоянии больше трёх диаметров атома сила взаимодействия между ними практически равна нулю. На расстоянии порядка двух-трёх диаметров атома заметна лишь сила притяжения, сила отталкивания практически равна нулю.

При дальнейшем сближении атомов начнёт возрастать как сила притяжения, так и сила отталкивания. При этом сила отталкивания будет возрастать быстрее, чем сила притяжения, и на некотором расстоянии r_0 сила притяжения станет равной силе отталкивания. Это происходит на расстоянии, примерно равном сумме радиусов атомов. При дальнейшем уменьшении расстояния между атомами сила отталкивания будет преобладать над силой притяжения.

В этом случае определяющую роль играет отталкивание электронных оболочек и ядер атомов.

На рисунке 70 изображён график зависимости сил отталкивания и притяжения от расстояния между атомами.

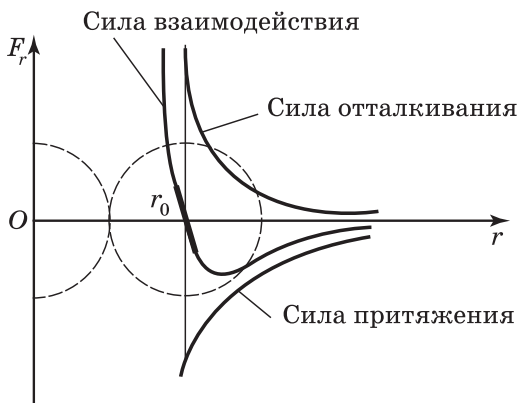


Рис. 70

Принято считать силы отталкивания положительными, а силы притяжения — отрицательными. По графику видно, что при $r \rightarrow 0$ сила взаимодействия стремится к нулю ($F \rightarrow 0$), при $r > r_0$ равнодействующей силой является сила притяжения, причём сначала её модуль возрастает, а затем уменьшается. На расстоянии $r = r_0$ равнодействующая сила равна нулю, при $r < r_0$ равнодействующей становится сила отталкивания, модуль её при уменьшении расстояния возрастает.

Таким образом, взаимодействие между молекулами и атомами носит следующий характер.

1. Начинает проявляться на расстояниях порядка 2–3 диаметров молекул.

2. Одновременно действуют и силы притяжения, и силы отталкивания.

3. Существует некоторое расстояние r_0 , равное примерно радиусу молекулы, на котором силы притяжения равны силам отталкивания.

4. На расстояниях $r > r_0$ силы притяжения больше сил отталкивания, поэтому равнодействующей сил межмоле-

кулярного взаимодействия является сила притяжения, а на расстояниях $r < r_0$ равнодействующей является сила отталкивания.

3. Потенциальная энергия взаимодействия молекул.

Молекулы так же, как и любые взаимодействующие тела, обладают потенциальной энергией. По графику зависимости силы взаимодействия между молекулами от расстояния между ними можно построить график зависимости потенциальной энергии взаимодействия атомов и молекул от расстояния между ними (рис. 71).

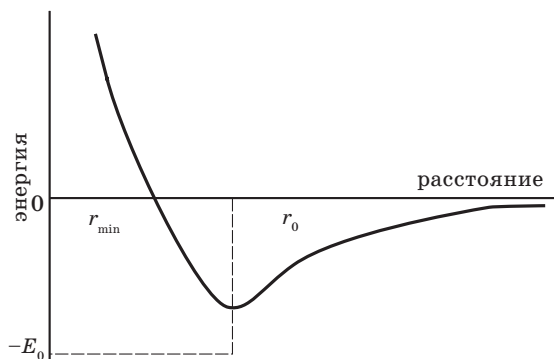


Рис. 71

При бесконечно большом расстоянии между частицами ($r \rightarrow \infty$) потенциальная энергия их взаимодействия стремится к нулю. При уменьшении расстояния между молекулами от бесконечности до r_0 преобладает сила притяжения, которая совершает положительную работу (молекулы сближаются). Соответственно кинетическая энергия молекул увеличивается, а потенциальная уменьшается (в замкнутой системе в отсутствие трения изменение кинетической энергии равно изменению потенциальной энергии с обратным знаком).

Наименьшее значение потенциальная энергия имеет на расстоянии r_0 , на котором равнодействующая сил взаимодействия между молекулами равна нулю. В этом случае взаимодействующие молекулы находятся в состоянии устой-

чивого равновесия, которому и соответствует минимальное значение потенциальной энергии. Потенциальная энергия в состоянии равновесия характеризует прочность связи частиц. Её значение показывает, какую работу нужно совершить, чтобы «разорвать» силы связи между частицами.

При дальнейшем уменьшении расстояния между молекулами ($r < r_0$) потенциальная энергия возрастает, поскольку равнодействующей сил взаимодействия между молекулами является сила отталкивания, которая совершает отрицательную работу, что ведёт к уменьшению кинетической энергии и увеличению потенциальной.

4. Строение газов, жидкостей и твёрдых тел. От соотношения между средней кинетической энергией движения частиц вещества и потенциальной энергией их взаимодействия зависит то, в каком агрегатном состоянии находится это вещество. Так, если потенциальная энергия взаимодействия молекул много больше их средней кинетической энергии, вещество существует в твёрдом состоянии. Если средняя кинетическая энергия движения частиц и потенциальная энергия их взаимодействия сравнимы, то вещество находится в жидком состоянии. Если потенциальная энергия взаимодействия молекул много меньше средней кинетической энергии их движения, то вещество находится в газообразном состоянии.

Разные свойства газов, жидкостей и твёрдых тел определяются различиями в их внутреннем строении. Поскольку газы занимают весь предоставленный им объём, то очевидно, что силы притяжения между молекулами газов малы и они находятся на сравнительно больших расстояниях друг от друга. Эти расстояния в десятки раз больше расстояний между молекулами жидкости. Соответственно, молекулы газов движутся прямолинейно до столкновений с другими молекулами. В результате столкновений молекулы изменяют направление движения и движутся прямолинейно до другого столкновения.

Молекулы твёрдых тел находятся близко друг к другу, при небольшом сжатии между ними резко возрастают силы отталкивания.

Поэтому твёрдые тела трудно сжать, они сохраняют форму и объём. Атомы и молекулы большинства твёрдых тел расположены в определённом порядке и образуют кристаллическую решётку. В узлах кристаллической решётки находятся молекулы и атомы, которые совершают относительно узлов колебательное движение.

В жидкостях молекулы расположены достаточно близко друг к другу. Поэтому жидкости имеют свой объём и плохо сжимаемы. Однако жидкости не имеют своей формы; это означает, что силы притяжения между молекулами жидкости меньше, чем между молекулами твёрдого тела. Молекулы жидкости совершают колебательное движение относительно положения равновесия, однако с течением времени эти положения равновесия смещаются в пространстве.

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ 9

1. Наименьшая упорядоченность в расположении частиц характерна для
 - 1) газов
 - 3) кристаллических тел
 - 2) жидкостей
 - 4) аморфных тел
2. Одним из подтверждений положения молекулярно-кинетической теории строения вещества о том, что частицы вещества хаотично движутся, может служить то, что
 - А. Испарение жидкости происходит при любой температуре.
 - Б. Давление столба жидкости зависит от его высоты.
 - В. Погружённые в жидкость тела выталкиваются из неё.Какие утверждения верны?
 - 1) только А
 - 2) только Б
 - 3) только А и Б
 - 4) только Б и В

3. Укажите пару веществ, скорость диффузии которых наименьшая при прочих равных условиях:
- 1) раствор медного купороса и вода
 - 2) пары эфира и воздух
 - 3) свинцовая и медная пластины
 - 4) вода и спирт
4. В каком агрегатном состоянии находится вещество, если оно не имеет собственных формы и объёма?
- 1) только в жидком
 - 2) только в газообразном
 - 3) в жидком или газообразном
 - 4) только в твёрдом
5. Резиновый шнур растянули. Как изменились силы взаимодействия молекул вещества?
- 1) уменьшились только силы притяжения
 - 2) уменьшились только силы отталкивания
 - 3) и силы притяжения, и силы отталкивания уменьшились, но силы притяжения стали больше сил отталкивания
 - 4) и силы притяжения, и силы отталкивания уменьшились, но силы отталкивания стали больше сил притяжения
6. Какие частицы находятся в узлах кристаллической решётки металла?
- 1) нейтральные атомы
 - 2) электроны
 - 3) отрицательные ионы
 - 4) положительные ионы
7. Число молекул в одном моле воды по сравнению с числом молекул в одном моле водорода
- 1) такое же
 - 2) больше в 9 раз
 - 3) меньше в 9 раз
 - 4) больше в 16 раз
8. Какова масса 25 моль углекислого газа?
- 1) 0,1 кг
 - 2) 1,1 кг
 - 3) 0,3 кг
 - 4) 3 кг

9. Из приведённых ниже утверждений выберите два верных утверждения и запишите их номера

- 1) молекулы вещества в твёрдом состоянии неподвижны
- 2) между частицами не действуют гравитационные силы
- 3) в любом агрегатном состоянии вещество не является сплошным
- 4) тела не рассыпаются, потому что силы притяжения между частицами вещества всегда больше сил отталкивания
- 5) молекулы вещества в газообразном состоянии движутся поступательно

Ответ:

--	--

10. Установите соответствие между записанными в первом столбце макроскопическими системами и их свойствами. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго и запишите в таблицу выбранные цифры.

МАКРОСКОПИЧЕСКАЯ
СИСТЕМА

СВОЙСТВА

- А) Жидкость
Б) Газ

- 1) текучесть
- 2) упругость
- 3) твёрдость
- 4) отсутствие собственного объёма

Ответ:

А	Б

Давление идеального газа

1. Идеальный газ. При построении простейшей модели газа пренебрегают размерами молекул по сравнению с размерами сосуда, в котором он находится, и считают молекулы газа материальными точками.

Кроме того, при построении модели газа учитывают, что расстояния между молекулами газа значительно больше, чем между молекулами жидкости, и силами притяжения

между молекулами газа при небольших давлениях можно пренебречь. При столкновениях молекул между ними действуют силы отталкивания. Поскольку время столкновения между молекулами значительно меньше времени их движения между столкновениями, можно считать, что большую часть времени молекулы движутся, не взаимодействуя между собой.

Газ, молекулы которого представляют собой материальные точки и не взаимодействуют между собой, называют идеальным газом.

Идеальный газ — модель, которая так же, как и любая другая модель, имеет определённые границы применимости. В частности, эта модель неприменима при низких температурах и высоких давлениях, т.е. при этих условиях газ уже нельзя считать идеальным.

2. Давление газа. Молекулы газа, непрерывно двигаясь, бомбардируют стенки сосуда, оказывая давление на них. При ударе о покоящуюся стенку молекула передаёт ей импульс. При этом импульс самой молекулы изменяется.

Давление — параметр макроскопический, т.е. характеризующий макроскопическую систему в целом. Его значение зависит от микроскопических параметров: от массы молекул и скорости их движения. В разные моменты времени о стенки сосуда ударяется разное число молекул, поэтому давление на стенки будет всё время меняться (рис. 72).

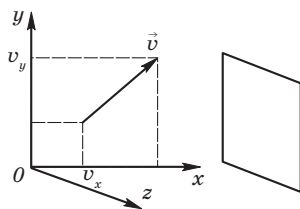


Рис. 72

3. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа. Давление газа на стенку сосуда создаётся ударами о неё молекул газа, при которых происходит изменение импульсов молекул и стенки. Очевидно, давление газа на стенки сосуда тем больше, чем больший импульс передают молекулы стенке, а импульс молекулы, как известно, зависит от массы молекулы m и от скорости

её движения v . Поскольку макроскопическое тело состоит из большого числа молекул и они имеют разные скорости, то в формулу давления входит средний квадрат скорости молекул $\overline{v^2}$.

Кроме того, чем больше молекул ударяется о стенку сосуда, тем большее давление оказывает газ на неё. Поэтому в формулу давления газа входит концентрация молекул n , равная числу молекул газа, содержащихся в единице объёма.

Следовательно, формула давления идеального газа имеет вид:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2}, \text{ где } \overline{v^2} \text{ — средний квадрат скорости теп-}$$

лового движения молекул. Множитель $\frac{1}{3}$ означает, что все направления движения молекул равноправны и если выбраны три координатные оси, то вдоль каждой из них в среднем движется одинаковое число молекул, и проекции среднего квадрата скорости на координатные оси одинаковы.

Таким образом, давление идеального газа на стенки сосуда прямо пропорционально массе молекул газа, их концентрации и среднему квадрату скорости их теплового движения.

4. Связь между давлением и средней кинетической энергией идеального газа. Полученную формулу можно

переписать в другом виде: $p = \frac{2}{3} \frac{n m_0 \overline{v^2}}{2}$, где $\frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \overline{E_k}$ — средняя кинетическая энергия молекул газа.

Можно записать:

$$p = \frac{2}{3} n \overline{E_k}$$

Давление идеального газа прямо пропорционально средней кинетической энергии теплового движения его молекул и числу молекул в единице объёма.

Это уравнение называют **основным уравнением молекулярно-кинетической теории идеального газа**.

Полученная формула связывает макроскопический параметр состояния газа — давление с микроскопическими параметрами состояния — массой молекул и средним квадратом скорости (средней кинетической энергией) их теплового движения.

Температура газа и средняя кинетическая энергия молекул

1. Тепловое равновесие. Две макроскопические системы: кусок льда, принесённый в комнату зимой, и воздух в комнате имеют разную температуру. Через некоторое время в результате теплообмена между льдом и воздухом в комнате температура льда повысится, а воздуха в комнате несколько понизится. Лёд растает, образовавшаяся из него вода нагреется, и температура воды станет равной температуре воздуха в комнате, т.е. между водой и воздухом в комнате установится **тепловое** или **термодинамическое** равновесие. Эти две макроскопические системы в данном случае представляют собой **термодинамическую систему**.

Термодинамическая система — совокупность макроскопических систем, которые могут обмениваться энергией между собой и с внешними телами.

Если в дальнейшем никаких внешних воздействий на термодинамическую систему оказано не будет, т.е. если не будут включены новые нагревательные приборы, если не откроют окно и т.п., то состояние равновесия термодинамической системы (вода — воздух) не нарушится. Система в данном случае является **теплоизолированной**.

Термодинамическая система называется **теплоизолированной**, если она не участвует в теплообмене с окружающими телами.

Таким образом, теплоизолированная термодинамическая система с течением времени всегда приходит в равновесное состояние и самопроизвольно выйти из него не может. Это утверждение составляет сущность закона термодинамического равновесия.

Состояние системы может быть равновесным и неравновесным. **Равновесное состояние** характеризуется неизменностью всех термодинамических параметров состояния изолированной системы во времени. Если система находится в неравновесном состоянии, то предоставленная самой себе с течением времени она придёт в равновесное состояние.

2. Температура. Термодинамика изучает процессы, происходящие с макроскопическими системами, и их свойства, связанные с превращением энергии. Состояние макроскопической системы описывается такими параметрами, как объём, давление, температура.

Среди параметров, характеризующих состояние термодинамической системы, температура является особым параметром. **Температура — параметр, характеризующий состояние термодинамического равновесия, её значение во всех частях равновесной системы одинаково.**

Это свойство отличает температуру от других параметров состояния, например объёма или давления. Их значения в состоянии теплового равновесия со временем также не изменяются, но в отличие от температуры не являются одинаковыми во всех частях равновесной системы.

3. Измерение температуры. Сложность измерения температуры заключается в том, что её нельзя сравнить с эталоном, как, например массу или длину. Поэтому для измерения температуры используют зависимость от неё физических свойств тел: объёма, давления, электрического сопротивления и т.п. Исторически впервые для измерения температуры была использована зависимость объёма жидкости от температуры.

Современная шкала Цельсия была предложена в 1742 г. При градуировке этой шкалы используют две реперные точки: температуру таяния льда, которой приписывают 0°C , и температуру кипения воды, принятую за 100°C . Интервал между ними делится на 100 равных частей, и одна сотая этого интервала принимается за 1°C . В качестве термометрического тела в зависимости от назначения термометра используются спирт, ртуть и т.п.

Построенная таким образом шкала является достаточно удобной для практических целей, однако, она имеет ряд недостатков. Во-первых, реперные точки выбраны произвольно, так же как произвольным является и деление интервала между ними на 100 частей. Во-вторых, при построении шкалы полагают, что объём тела при изменении температуры изменяется равномерно на всём температурном интервале, однако это не так и для разных термометрических тел отклонение от равномерности различно. От этих недостатков свободна термодинамическая шкала температур.

4. Термодинамическая температурная шкала. Термодинамическая (абсолютная) шкала температур имеет одну реперную точку — тройную точку воды. Это такая температура, при которой вода, лёд и пар существуют одновременно. Осуществить такое состояние возможно при строго определённом давлении. Температура тройной точки воды составляет $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$, а давление, при котором она существует, — 609 Па .

За ноль термодинамической шкалы температур принимается температура $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Эта температура называется **абсолютным нулём температур**. Интервал между абсолютным нулём и тройной точкой воды делится на 273,16 частей и $1/273,16$ часть этого интервала представляет собой один кельвин (1 К), т.е. единицу температуры по термодинамической шкале. Обозначается температура по термодинамической шкале буквой T .

Термодинамическая шкала может градуироваться и в градусах Цельсия. $1\text{ }^{\circ}\text{C} = 1\text{ К}$.

Сравнение шкал Цельсия и термодинамической можно провести по рисунку 73.



Рис. 73

Из рисунка видно, что абсолютному нулю соответствуют $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$, температуре таяния льда — $273,15\text{ К}$, а температуре кипения воды — $373,15\text{ К}$.

Соотношение между значениями температуры по шкале Цельсия и по термодинамической шкале выражается формулами:

$$T\text{ К} = t\text{ }^{\circ}\text{C} + 273,15; t\text{ }^{\circ}\text{C} = 273,15 - T\text{ К}.$$

Часто величиной $0,15$ пренебрегают, так как она мала по сравнению с 273 , и при решении задач за абсолютный нуль принимают $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$.

5. Абсолютный нуль. Средняя кинетическая энергия теплового движения молекул связана с температурой тела. Действительно, при переходе термодинамической системы к состоянию термодинамического равновесия происходит выравнивание температуры тел системы и средней кинетической энергии входящих в их состав частиц. Таким образом, средняя кинетическая энергия молекул и температура тела связаны между собой: средняя кинетическая энергия движения молекул тела прямо пропорциональна его термодинамической температуре:

$$\overline{E} \sim T \text{ или } \overline{E}_k = \frac{3}{2} \cdot kT.$$

Коэффициент пропорциональности k называется **постоянной Больцмана**. Он равен $k = 1,38 \cdot 10^{-23}\text{ Дж/К}$. Постоянная Больцмана показывает, какую энергию нужно сообщить идеальному газу, чтобы повысить его температуру на 1 К .

Из записанного равенства следует, что чем меньше температура тела, тем меньше скорость теплового движения составляющих его частиц. Очевидно при термодинамической температуре, равной нулю, в ноль обращается и средняя кинетическая энергия, и средняя скорость теплового движения частиц.

Абсолютный нуль — это такая температура, при которой прекращается тепловое движение частиц, составляющих тело.

Состояние с температурой, равной абсолютному нулю, не может быть осуществлено, поскольку тепловое движение молекул невозможно прекратить.

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ 10

1. Модель идеального газа предполагает, что
 - А. Размерами молекул можно пренебречь по сравнению с размерами сосуда
 - Б. Взаимодействием молекул можно пренебречь
 - В. Молекулы не сталкиваются друг с другом при движении

1) А, Б и В	3) А и В
2) А и Б	4) Б и В
2. Сравните давление P_1 водорода и давление P_2 кислорода, если концентрация газов и их среднеквадратичные скорости одинаковы.
 - 1) $P_2 = 16P_1$
 - 2) $P_2 = 4P_1$
 - 3) $P_2 = 8P_1$
 - 4) $P_2 = P_1$
3. Как изменится давление газа, если концентрация его молекул увеличится в 3 раза, а средняя квадратичная скорость движения молекул уменьшится в 3 раза?
 - 1) уменьшится в 3 раза
 - 2) увеличится в 3 раза
 - 3) не изменится
 - 4) уменьшится в 6 раз
4. Газ находится в сосуде под поршнем. Как изменится давление газа в результате уменьшения его объёма в 3 раза и увеличения средней кинетической энергии его молекул в 2 раза?

1) уменьшится в 6 раз	3) увеличится в 1,5 раза
2) увеличится в 6 раз	4) уменьшится в 1,5 раза

5. Молекулы каких газов — кислорода, водорода или азота, находящихся в воздухе комнаты, — движутся быстрее?

- 1) водорода
- 2) кислорода
- 3) азота
- 4) скорости всех газов одинаковы

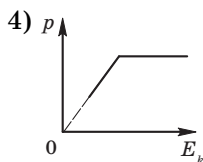
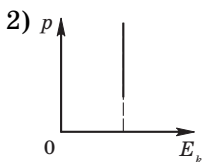
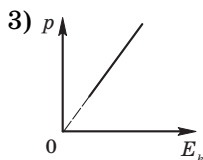
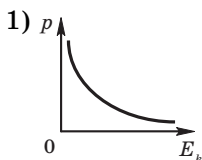
6. Как изменится средняя кинетическая энергия молекул идеального газа при уменьшении абсолютной температуры в 4 раза?

- 1) уменьшится в 16 раз
- 2) уменьшится в 4 раза
- 3) уменьшится в 2 раза
- 4) не изменится

7. Воздух в комнате состоит из смеси газов: водорода, кислорода, азота, водяных паров, углекислого газа и др. Какие из физических параметров этих газов обязательно одинаковы при тепловом равновесии?

- 1) температура
- 2) давление
- 3) концентрация
- 4) средний квадрат скорости теплового движения молекул

8. На рисунке приведены графики зависимости давления газа от средней кинетической энергии. Какой график соответствует зависимости давления идеального газа на стенки сосуда от средней кинетической энергии поступательного движения его молекул при постоянном объёме?



9. Установите соответствие между записанными в первом столбце физическими величинами и формулами, по которым их можно рассчитать. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго и запишите в таблицу выбранные цифры.

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

- А) основное уравнение МКТ идеального газа
Б) средняя кинетическая энергия теплового движения молекул

ФОРМУЛЫ

- 1) $p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2}$
2) $p = nkT$
3) $p = \frac{2}{3} n \overline{E_k}$
4) $\overline{E_n} = \frac{3}{2} kT$
5) $pV = \frac{m}{M} RT$

Ответ:

А	Б

10. В сосуде содержится газ. Из-за утечки масса газа в сосуде уменьшается.

Как изменяются при этом давление и температура газа в сосуде?

Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличивается
2) уменьшается
3) не изменяется

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Давление газа	Температура газа

Уравнение состояния идеального газа

1. Уравнение состояния идеального газа. Состояние макроскопической системы характеризуется термодинамическими параметрами, к которым относятся объём V ,

давление p , температура T . При изменении состояния газа изменяются его параметры. Уравнение, которое описывает изменение состояния газа и устанавливает связь между параметрами его начального и конечного состояний, называют **уравнением состояния идеального газа**.

Мы получили уравнение, связывающее давление газа с его температурой и концентрацией молекул. Подставим выражение для средней кинетической энергии молекул $\overline{E_k} = 3/2 kT$ в основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа $p = \frac{2}{3} n \overline{E_k}$, получим: $p = nkT$.

Учитывая, что $n = \frac{N}{V}$, получим:

$$p = \frac{Nk}{V}T \text{ или } pV = NkT$$

Это уравнение называют **уравнением состояния идеального газа**.

2. Уравнение Менделеева — Клапейрона. Число молекул N равно произведению постоянной Авогадро N_A и количества вещества ν , которое, в свою очередь, равно массе газа m , делённой на его молярную массу M , т.е.:

$$N = N_A \nu = \frac{N_A m}{M}, \quad N = N_A \cdot \nu. \text{ Подставив это выражение}$$

в формулу $pV = NkT$, получим:

$$pV = \frac{m}{M} N_A kT$$

Произведение постоянной Больцмана k и постоянной Авогадро N_A называют универсальной газовой постоянной и обозначают R .

R — величина, постоянная для всех газов.

$$R = kN_A = 8,31 \text{ Дж/моль К.}$$

Универсальная газовая постоянная показывает, какую энергию необходимо сообщить 1 моль идеального газа для изменения его температуры на 1 К.

Подставив выражение для R в уравнение $pV = \frac{m}{M} N_A kT$, запишем:

$$pV = \frac{m}{M}RT$$

Это уравнение называют **уравнением Менделеева — Клапейрона**. Оно связывает параметры какого-либо состояния газа произвольной массы и представляет собой уравнение состояния идеального газа.

3. Уравнение Клапейрона. Предположим, что газ переходит из состояния 1, которое характеризуется параметрами p_1, V_1, T_1 , в состояние 2, которое характеризуется параметрами p_2, V_2, T_2 . При этом масса газа и его химический состав остаются неизменными. Запишем уравнение Менделеева — Клапейрона для первого и для второго состояний газа:

$$p_1 V_1 = \frac{m}{M}RT_1, \quad p_2 V_2 = \frac{m}{M}RT_2.$$

Разделим первое уравнение на второе. Получим:

$$\frac{p_1 V_1}{p_1 V} = \frac{T_1}{T_2} \quad \text{или} \quad \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad \text{или} \quad \frac{pV}{T} = \text{const.}$$

Полученное уравнение также является **уравнением состояния идеального газа**. Его называют **уравнением Клапейрона**. Это уравнение связывает параметры двух состояний газа при неизменной массе газа и его химическом составе и читается следующим образом: *произведение давления газа данной массы и его объёма, делённое на термодинамическую температуру, есть величина постоянная*.

4. Внутренняя энергия идеального газа. Поскольку молекулы идеального газа не взаимодействуют, то внутренняя энергия идеального газа равна кинетической энергии теплового движения его молекул:

$$U = E_k \quad \text{или} \quad U = N \overline{E_k}.$$

Подставив в эту формулу выражение для средней кинетической энергии молекул

$\overline{E_k} = \frac{3}{2}kT$ и выражение для числа молекул газа $N = \frac{N_A m}{M}$, запишем:

$$U = \frac{N_A m}{M} \frac{3}{2} kT.$$

Заменяя $N_A k = R$, получим:

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT.$$

Эта формула позволяет рассчитать внутреннюю энергию одноатомного идеального газа.

5. Закон Дальтона для смеси разреженных газов. Предположим, что в сосуде объёмом V находится смесь нескольких разреженных газов. При этом $N_1, N_2 \dots N_n$ — число молекул каждого газа, а $p_1, p_2 \dots p_n$ — давление каждого газа, называемое **парциальным**.

Парциальным называют давление, которое производит каждый газ, входящий в смесь.

Для каждого газа можно записать уравнение состояния: $p_1 V = N_1 kT$; $p_2 V = N_2 kT \dots p_n V = N_n kT$.

Сложив почленно левые и правые части этих уравнений, получим $(p_1 + p_2 + \dots + p_n)V = (N_1 + N_2 + \dots + N_n)kT$. При этом сумма числа молекул каждого газа смеси равна общему числу молекул N смеси газа в сосуде.

Разделив обе части равенства на V , получим $p_1 + p_2 + \dots + p_n = \frac{N}{V} \cdot kT$. Так как $\frac{N}{V} \cdot kT$ равно давлению p смеси газов, то:

$$p_1 + p_2 + \dots + p_n = p.$$

Таким образом, давление смеси газов равно сумме парциальных давлений каждого из газов.

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ 11

1. В сосуде неизменного объёма находится идеальный газ в количестве 2 моль. Как надо изменить абсолютную температуру сосуда с газом при добавлении в сосуд од-

ного моля газа, чтобы давление газа на стенки сосуда увеличилось в 3 раза?

- 1) уменьшить в 3 раза
- 2) уменьшить в 2 раза
- 3) увеличить в 3 раза
- 4) увеличить в 2 раза

2. Температура водорода, взятого в количестве 3 моль, находящегося в закрытом сосуде, равна T_1 . Какова температура кислорода, взятого в количестве 3 моль, находящегося в сосуде того же объёма и при том же давлении?

- | | |
|-----------|-------------|
| 1) T_1 | 3) $24T_1$ |
| 2) $8T_1$ | 4) $1/8T_1$ |

3. В резервуаре находятся 20 кг азота при температуре 300 К и давлении 10^5 Па. Чему равен объём резервуара?

- 1) $17,8 \text{ м}^3$
- 2) $1,8 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$
- 3) $35,6 \text{ м}^3$
- 4) $1,8 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$

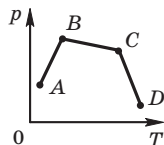
4. Идеальный газ в сосуде сжали, увеличив концентрацию молекул газа в 5 раз. Давление газа при этом возросло в 2 раза. Следовательно, абсолютная температура газа

- 1) увеличилась в 2,5 раза
- 2) увеличилась в 2 раза
- 3) увеличилась в 10 раз
- 4) уменьшилась в 2,5 раза

5. При сжатии идеального газа его объём уменьшился в 2 раза, а температура газа увеличилась в 2 раза. Как изменилось при этом давление газа?

- 1) увеличилось в 2 раза
- 2) уменьшилось в 2 раза
- 3) увеличилось в 4 раза
- 4) не изменилось

6. В сосуде, закрытом поршнем, находится идеальный газ. График зависимости давления газа от его температуры представлен на рисунке. Какому состоянию газа соответствует наименьшее значение объёма?



- 1) А 2) В 3) С 4) В
7. Внутренняя энергия идеального газа равна
- 1) нулю
 - 2) сумме кинетической энергии теплового движения молекул газа и потенциальной энергии их взаимодействия
 - 3) только кинетической энергии теплового движения молекул газа
 - 4) только потенциальной энергии взаимодействия молекул газа
8. Температуру идеального газа увеличили в 9 раз. Внутренняя энергия идеального газа
- 1) не изменилась
 - 2) увеличилась в 3 раза
 - 3) увеличилась в 9 раз
 - 4) увеличилась в 81 раз
9. Установите соответствие между записными в первом столбце физическими величинами и формулами, по которым их можно рассчитать. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго и запишите в таблицу выбранные цифры.

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

- А) уравнение Менделеева — Клапейрона
Б) уравнение Клапейрона

ФОРМУЛЫ

- 1) $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$
- 2) $p = nkT$
- 3) $p = \frac{2}{3} n \overline{E_k}$
- 4) $U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT$
- 5) $pV = \frac{m}{M} RT$

Ответ:

А	Б

10. Выберите из приведённых ниже высказываний два верных и запишите их номера.

- 1) внутренняя энергия идеального газа зависит только от его температуры
- 2) уравнение Клапейрона выражает связь между параметрами двух состояний газа данной массы
- 3) парциальное давление — это давление смеси газов
- 4) уравнение Менделеева — Клапейрона выражает связь между параметрами определённого состояния газа
- 5) универсальная газовая постоянная показывает, какую энергию нужно сообщить идеальному газу для повышения его температуры на 1 К

Ответ:

А	Б

**Изопроцессы в разреженном газе
с постоянным числом частиц N
(с постоянным количеством вещества ν)**

1. Изопроцессы. Состояние идеального газа может изменяться таким образом, что, помимо массы, неизменным будет оставаться один из макроскопических параметров состояния. Например, если внести с улицы в тёплое помещение пустой плотно закрытый сосуд с жёсткими стенками, то через некоторое время он нагреется. Состояние воздуха в сосуде изменится, однако его масса и объём останутся неизменными, изменяться будут только два параметра состояния: давление и температура. В этом и других подобных случаях уравнение состояния можно упростить и, полагая один из макроскопических параметров неизменным, получить связь между меняющимися параметрами. Законы, выражающие эту связь, называются **газовыми законами**.

Процессы, протекающие при неизменном значении одного из макроскопических параметров состояния газа, называют **изопроцессами** (от греческого слова «изос» — равный, одинаковый).

2. Изотермический процесс. *Изотермическим называют процесс изменения состояния термодинамической системы, происходящий при постоянной температуре.*

При неизменной температуре $T_1 = T_2$ уравнение Клапейрона $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ принимает вид:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \text{ или } pV = \text{const.}$$

Эти равенства читаются следующим образом: **давление газа данной массы при неизменной температуре обратно пропорционально его объёму или произведение давления газа данной массы и его объёма при неизменной температуре есть величина постоянная.**

Этот закон носит название **закона Бойля — Мариотта**.

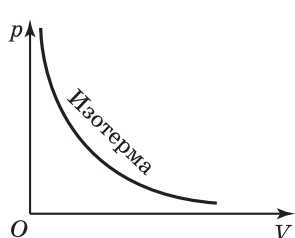


Рис. 74

Графиком зависимости давления газа от его объёма при постоянной температуре является гиперболой (рис. 74). Этот график носит название **изотермы**.

Зависимость давления газа данной массы от его объёма при постоянной температуре с точки зрения молекулярно-кинетических представлений объясняется тем, что давление газа на стенки сосуда зависит от концентрации молекул, а при уменьшении объёма концентрация молекул газа возрастает, следовательно, увеличивается его давление.

Закон Бойля — Мариотта применим к идеальному газу, т.е. имеет те же границы применимости, что и эта модель.

3. Изобарный процесс. *Процесс изменения состояния газа, происходящий при неизменном давлении, называют изобарным.*

При неизменном давлении $p_1 = p_2$ уравнение Клапейрона: $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ принимает вид: $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$ или $\frac{V}{T} = \text{const.}$

Эти выражения читаются так: **объём газа данной массы при постоянном давлении прямо пропорционален его термодинамической температуре, или частное от деления объёма**

ма газа данной массы на его термодинамическую температуру при неизменном давлении есть величина постоянная.

Этот закон носит название закона Гей-Люссака.

Закон Гей-Люссака можно записать иначе. Предположим, что газ переводится из состояния при нормальных условиях (p_0 — нормальное атмосферное давление, $T_0=273,15$ К, V_0 — соответствующий объём) в состояние с параметрами T и V . Тогда закон Гей-Люссака запишется следующим образом:

$$\frac{V}{V_0} = \frac{T}{T_0} \quad \text{или} \quad V = \frac{V_0}{T_0} T.$$

Обозначив $\frac{1}{T_0} = \alpha$, получим:

$$V = \alpha V_0 T, \quad \text{где } \alpha = 1/273,15 \text{ К}^{-1}$$

Коэффициент α называют температурным коэффициентом объёмного расширения газов. Он одинаков для всех газов и показывает, что при нагревании на 1 К объём газа увеличивается на $1/273,15$ часть того объёма, который газ занимал при 273,15 К (при 0 °С).

Графиком зависимости объёма газа данной массы от температуры при постоянном давлении является прямая линия, называемая **изобарой**.

На рисунке 75а приведён график зависимости объёма от термодинамической температуры, а на рисунке 75б — от температуры по шкале Цельсия. В первом случае график должен проходить через начало координат (при $T = 0$, $V = 0$). Однако при низких температурах газ нельзя считать идеальным. Реальные газы при низких температурах превращаются в жидкости, а к жидкостям уравнение Клапейрона так же, как и закон Гей-Люссака, не применимо.

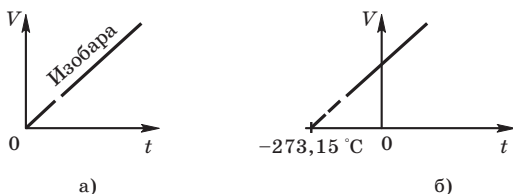


Рис. 75

Во втором случае график должен был бы пересечь ось абсцисс в точке $t = -273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

С точки зрения молекулярно-кинетических представлений при увеличении температуры увеличивается средняя кинетическая энергия теплового движения молекул газа и, следовательно, увеличивается давление газа на стенки сосуда. Для того чтобы оно осталось неизменным (изобарный процесс), должна уменьшиться концентрация молекул. К этому и приводит увеличение объёма газа при его неизменной массе.

4. Изохорный процесс. Нагревая газ в сосуде с твёрдыми стенками, можно осуществить процесс, происходящий при неизменном объёме.

Процесс изменения состояния газа, происходящий при неизменном объёме, называется изохорным.

При неизменном объёме $V_1 = V_2$, уравнение Клапейрона: $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ принимает вид: или $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$, или $\frac{p}{T} = \text{const}$.

Давление газа данной массы при постоянном объёме прямо пропорционально его термодинамической температуре, или частное от деления давления на термодинамическую температуру есть величина постоянная для газа данной массы.

Этот закон носит название закона Шарля.

Закон Шарля так же, как и закон Гей-Люссака, может быть записан иначе. Если газ переводится из состояния при нормальных условиях в состояние с параметрами p и T и при этом масса газа остаётся неизменной, то можно

записать: $\frac{p_0}{T_0} = \frac{p}{T}$ или $p = \frac{p_0}{T_0} T$.

Обозначив $\frac{1}{T_0} = \gamma$, получим:

$$p = \gamma p_0 T, \text{ где } \gamma = 1/273,15\text{ К}^{-1}.$$

Коэффициент γ называют температурным коэффициентом давления. Он одинаков для всех газов и показывает, что при нагревании на 1 К давление газа увеличивается

на $1/273,15$ часть того давления, которое производил газ при нормальных условиях.

График зависимости давления газа данной массы от температуры приведён на рисунке 76. Графиком является прямая линия, называемая **изохорой**.

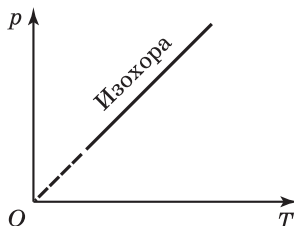


Рис. 76

График на рисунке 76 должен был бы проходить через начало координат, однако при низких температурах применить к газу закон Шарля уже нельзя.

С точки зрения молекулярно-кинетических представлений с повышением температуры увеличивается средняя кинетическая энергия хаотического движения молекул, а, следовательно, при неизменной концентрации молекул увеличивается давление газа.

5. Адиабатный процесс. Макроскопическая система, не обменивающаяся энергией с окружающей средой, называется теплоизолированной.

Адиабатным называют процесс изменения состояния газа данной массы, происходящий в теплоизолированной системе, т.е. процесс, происходящий без обмена энергией с окружающей средой.

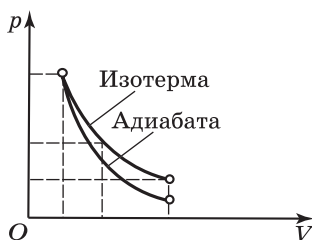


Рис. 77

В адиабатном процессе изменяются все три параметра состояния: объём, давление и температура. Поэтому при одном и том же изменении объёма давление при адиабатном процессе изменяется более резко, чем при изотермическом.

На рисунке 77 изображены графики зависимости давления от объёма при изотермическом и адиабатном процессах. Как видно, адиабата идёт круче, чем изотерма.

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ 12

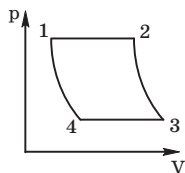
1. Разреженный азот изобарно сжимают, оставляя неизменной массу газа. Как следует изменить абсолютную температуру газа, чтобы уменьшить его объём в 4 раза?

- 1) повысить в 16 раз 3) понизить в 16 раз
- 2) повысить в 4 раза 4) понизить в 4 раза

2. В толстостенной банке быстро сжали воздух. Какой процесс происходит с воздухом в банке?

- 1) изобарный 3) изотермический
- 2) изохорный 4) адиабатный

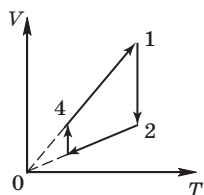
3. На рисунке приведён график процесса в координатах p, V . На каком участке графика средняя кинетическая энергия теплового движения молекул увеличивается? Считать, что на участках 2–3 и 4–1 $pV = \text{const}$



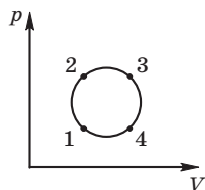
- 1) 1–2 3) 3–4
- 2) 2–3 4) 4–1

4. Цикл, изображённый на рисунке, состоит из

- 1) двух изотерм и двух изобар
- 2) четырёх изотерм
- 3) двух изохор и двух изобар
- 4) двух изотерм и двух изохор

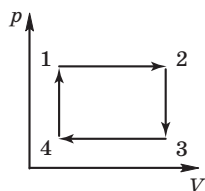


5. На рисунке изображён круговой процесс 1–2–3–4 изменения состояния идеального газа



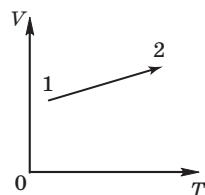
- 1) $T_1 > T_2 > T_4$
- 2) $T_2 > T_4 > T_1$
- 3) $T_1 > T_4 > T_2$
- 4) $T_4 > T_2 > T_1$

6. Газ совершает круговой процесс. В какой точке температура газа максимальна?



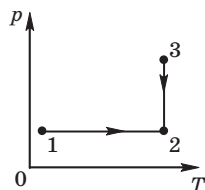
- 1) 1
- 2) 2
- 3) 3
- 4) 4

7. На рисунке приведён график зависимости объёма идеального газа данной массы от температуры. Как изменится давление газа при переходе из состояния 1 в состояние 2?



- 1) $p_1 > p_2$
- 2) $p_2 > p_1$
- 3) $p_1 = p_2$
- 4) Соотношение между p_1 и p_2 по данному графику определить невозможно.

8. 1 моль идеального газа участвует в процессе, показанном на графике зависимости давления от температуры. Где достигается наибольший объём газа в указанном процессе?



- 1) в точке 2
- 2) в точке 3
- 3) на всём отрезке 1–2
- 4) на всём отрезке 2–3

9. В сосуде под поршнем находится фиксированное количество идеального газа. Если при нагревании газа его давление остаётся постоянным, то как изменятся объём газа, его плотность и внутренняя энергия?

Для каждой величины определите соответствующий характер её изменения:

- 1) увеличится 3) не изменится
2) уменьшится

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Объём газа	Плотность газа	Внутренняя энергия газа

- 10.** Установите соответствие между процессами в идеальном газе и формулами, которыми они описываются (N — число частиц, p — давление, V — объём, T — абсолютная температура, Q — количество теплоты). К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

ПРОЦЕССЫ

ФОРМУЛЫ

- А) Изобарный процесс при $N = \text{const}$
Б) Изотермический процесс при $N = \text{const}$

- 1) $\frac{p}{T} = \text{const}$
- 2) $\frac{V}{T} = \text{const}$
- 3) $pV = \text{const}$
- 4) $Q = 0$
- 5) $\frac{pV}{T} = \text{const}$

Ответ:

А	Б

Насыщенные и ненасыщенные пары

1. Парообразование. Процесс перехода вещества из жидкого состояния в газообразное называется **парообразованием**. Парообразование осуществляется при испаре-

нии и при кипении. Испарение происходит следующим образом.

Между молекулами жидкости, участвующими в тепловом движении, действуют силы притяжения, которые удерживают их друг около друга. Однако есть такие молекулы жидкости, у которых кинетическая энергия движения достаточно велика и превосходит потенциальную энергию их взаимодействия. Такие молекулы могут совершить работу по преодолению сил притяжения (работу выхода) и покинуть жидкость.

Молекулы, вылетевшие из жидкости, беспорядочно движутся, некоторые из них в результате столкновений могут приобрести соответствующую скорость и вернуться в жидкость. Однако таких молекул мало, большинство же молекул рассеиваются в окружающем пространстве, если сосуд, из которого они вылетают, открыт. Над жидкостью в этом случае будет находиться **ненасыщенный пар**. Испарение будет происходить до тех пор, пока вся жидкость не превратится в пар.

2. Насыщенный пар. Если жидкость находится в закрытом сосуде, то молекулы, вылетевшие из жидкости, уже не будут рассеиваться в атмосфере. Часть молекул возвратится в жидкость. В начале процесса испарения число молекул, вылетевших из жидкости, будет больше, чем число молекул, вернувшихся в неё. Поэтому плотность пара будет постепенно возрастать. При этом число молекул, возвращающихся в жидкость, тоже будет постепенно увеличиваться. Настанет такой момент, когда число молекул, вылетевших из жидкости, будет равно числу молекул, возвращающихся обратно в жидкость. Теперь число молекул над жидкостью и соответственно плотность пара изменяться не будут. Говорят, что в этом случае существует **динамическое равновесие** между жидкостью и её паром и пар является **насыщенным**.

Насыщенным называют пар, находящийся в состоянии динамического равновесия со своей жидкостью.

3. Свойства насыщенного пара. Пусть в цилиндре под поршнем находятся жидкость и её насыщенный пар (рис. 78).



Рис. 78

При сжатии пара его объём уменьшится, а плотность и давление в первый момент возрастут. Это приведёт к нарушению равновесия между паром и жидкостью: число молекул, возвращающихся в жидкость, станет больше, чем число молекул, покидающих её.

Причина этого заключается в том, что число молекул, вылетающих из жидкости, зависит от температуры. При неизменной температуре это число постоянно.

Число молекул, возвращающихся в жидкость, при постоянной температуре прямо пропорционально давлению. Так как давление в первый момент увеличится, то увеличится и число молекул, возвращающихся в жидкость. При этом число молекул пара уменьшится и восстановится прежнее давление.

Это можно пояснить, исходя из уравнения состояния газа: $p = nkT$ или $p = \frac{N}{V}kT$. Если одновременно в одно и то же число раз изменяются число молекул газа и его объём, то давление при постоянной температуре остаётся неизменным.

Если при неизменной температуре поднимать поршень в цилиндре, то объём пара увеличится, а его плотность и давление в первый момент уменьшатся. В этом случае число молекул, вылетающих из жидкости, будет больше, чем число молекул, влетающих в неё. Плотность и давление пара начнут увеличиваться до тех пор, пока не достигнут прежних значений.

Таким образом, давление насыщенного пара при данной температуре не зависит от его объёма и его значение постоянно.

Давление насыщенного пара при данной температуре зависит от рода вещества: при одной и той же температуре оно разное для разных веществ. Так, давление насыщенного пара воды при $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ равно 10^4 Па, а ртути — всего 1,3 Па.

Будем нагревать жидкость в закрытом сосуде. При повышении температуры большее число молекул приобретёт энергию, достаточную для преодоления сил притяжения соседних молекул и вылета из жидкости. В первый момент равновесие нарушится, если поддерживать температуру постоянной, то оно восстановится, но теперь над жидкостью будет находиться больше молекул пара, чем при более низкой температуре. Соответственно увеличатся плотность пара и его давление.

Если рассматриваемую систему «жидкость–насыщенный пар» охлаждать, то пар будет конденсироваться. Это означает, что в жидкость будет возвращаться больше молекул, чем из неё вылетать. Плотность и давление насыщенного пара будут уменьшаться.

Таким образом, давление насыщенного пара возрастает с повышением температуры.

4. Точка росы. Превращение ненасыщенного пара в насыщенный можно осуществить, понижая его температуру. Это явление наблюдал каждый из вас. Летом, вечером после жаркого дня выпадает роса. Это связано с тем, что в воздухе содержится водяной пар; днём этот пар является ненасыщенным, а к вечеру при понижении температуры он переходит в состояние насыщения и начинает конденсироваться.

Температуру, при которой ненасыщенный пар становится насыщенным, называют точкой росы.

Точка росы зависит от давления. Так, при давлении $2,3 \cdot 10^3$ Па водяной пар становится насыщенным при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при давлении $1,2\text{--}10^4$ Па — при $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Чем больше давление, тем выше точка росы, т.е. при более высоком давлении переход пара в состояние насыщения происходит при более высокой температуре.

Влажность воздуха

1. Абсолютная влажность. В воздухе всегда содержится водяной пар. Это связано с тем, что вода непрерывно испаряется с поверхности водоёмов, растительности, почвы и пр. Обычно водяной пар, присутствующий в атмосфере, ненасыщенный, однако при определённых условиях он может стать насыщенным, например, при низкой температуре или сразу же после дождя. Содержание водяного пара в воздухе характеризует его *влажность*.

Для того чтобы оценить влажность воздуха, вводят две величины: **абсолютную и относительную влажность**.

Давление воздуха складывается из парциальных давлений газов, входящих в его состав, т.е. из давлений, производимых каждым газом, в том числе и водяным паром. По значению парциального давления водяного пара можно судить об абсолютной влажности воздуха.

Абсолютная влажность воздуха p равна парциальному давлению водяного пара, содержащегося при данной температуре.

Эквивалентным является определение абсолютной влажности через *плотность водяного пара, содержащегося в воздухе при данной температуре*.

Значения парциального давления и плотности насыщенного водяного пара при разной температуре приведены в таблице 1.

Таблица 1

Тем- пера- тура, °С	Давление насы- щенного пара, кПа	Плот- ность на- сыщенно- го пара, 10 ³ кг/м ³	Тем- пера- тура, °С	Давление насы- щенного пара, кПа	Плот- ность на- сыщенно- го пара, 10 ³ кг/м ³
-30	0,056	0,46	10	1,227	9,41
-20	0,103	0,88	15	1,704	12,84

Тем- пера- тура, °С	Давление насы- щенного пара, кПа	Плот- ность на- сыщенно- го пара, 10^3 кг/м^3	Тем- пера- тура, °С	Давление насы- щенного пара, кПа	Плот- ность на- сыщенно- го пара, 10^3 кг/м^3
-10	0,259	2,14	20	2,337	17,32
0	0,611	4,58	30	4,242	30,30
5	0,872	6,80	40	7,376	51,20

Если парциальное давление водяного пара равно, на-
пример, $1,08 \cdot 10^3 \text{ Па}$, то это значение и есть абсолютная
влажность воздуха при данной температуре.

Абсолютную влажность воздуха выражают также через
плотность водяного пара, содержащегося в воздухе. Если
говорят, что влажность воздуха $8,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$, то это зна-
чит, что в 1 м^3 воздуха содержится водяной пар массой
 $8,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$.

Абсолютную влажность воздуха измеряют с помощью
гигрометра (рис. 79).

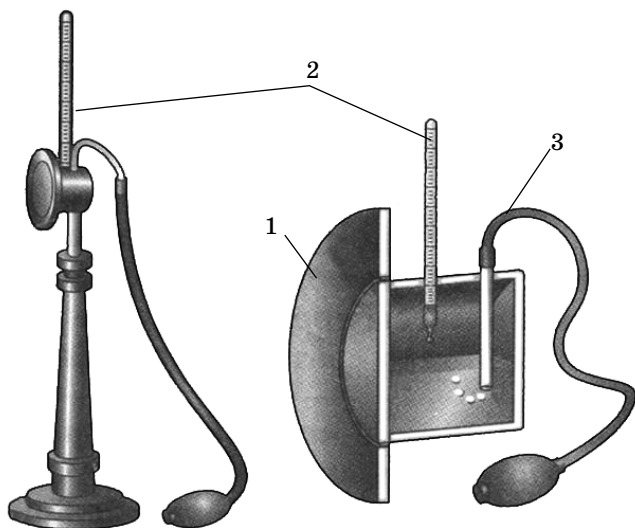


Рис. 79

Он состоит из прикреплённой к стойке металлической коробочки, одна из сторон которой сделана блестящей (1). В коробочке имеется отверстие, через которое в неё вставляют термометр (2). В другое отверстие плотно входит трубка, присоединённая к резиновой груше (3).

В коробочку наливают эфир и продувают через него воздух. Эфир быстро испаряется, охлаждает при этом коробочку, и её поверхность запотевает. Это происходит потому, что водяной пар, находящийся в воздухе вблизи коробочки, при данной пониженной температуре становится насыщенным. Эта температура называется точкой росы. Измерив с помощью термометра точку росы, по таблице определяют давление (или плотность) насыщенного пара при данной температуре. Это значение и есть абсолютная влажность воздуха.

Например, необходимо определить абсолютную влажность воздуха при температуре 16°C . Проведя опыт с гигрометром, установили, что точка росы равна 8°C . По таблице нашли, что при этой температуре давление насыщенного пара $1,08 \cdot 10^3$ Па. Это — абсолютная влажность воздуха при 16°C .

2. Относительная влажность. Зная абсолютную влажность воздуха, нельзя сказать сухой это воздух или влажный. При одном и том же значении парциального давления пара воздух может быть более или менее сухим в зависимости от температуры. Одно и то же давление пара или одна и та же его плотность при 15°C и при 25°C делают воздух в разной степени влажным. При температуре 15°C при данном давлении водяной пар ближе к насыщению, чем при давлении 25°C . Поэтому степень влажности воздуха характеризуют величиной относительной влажности.

Относительной влажностью воздуха (ϕ) называют величину, равную отношению абсолютной влажности ρ к парциальному давлению насыщенного пара ρ_0 при той же температуре (или отношению плотности водяного пара, содержащегося в воздухе ρ (абсолютной влажности)

к плотности насыщенного водяного пара (ρ_0) при этой же температуре:

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_0} 100\%.$$

Обычно относительная влажность выражается в процентах.

Чтобы определить относительную влажность с помощью гигрометра, устанавливают абсолютную влажность так, как это было показано выше, а затем по таблице определяют значение парциального давления насыщенного пара при данной температуре. В приведённом выше примере — это давление насыщенного пара при температуре 15°C . Оно равно $1,08 \cdot 10^3$ Па. Следовательно, относительная влажность воздуха составляет $\varphi = 60\%$.

Относительную влажность воздуха можно измерить с помощью прибора, называемого **психрометром** (рис. 80).

Психрометр состоит из двух термометров, шарик одного из которых обёрнут куском ткани, опущенным в воду. Таким образом, один термометр (влажный) показывает температуру влажной ткани, с которой испаряется вода, а другой (сухой) — температуру воздуха. Поскольку при испарении жидкости температура понижается, то показания термометров будут различны.

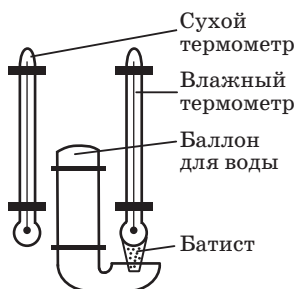


Рис. 80

Если воздух в помещении содержит насыщенный пар, то термометры покажут одинаковую температуру, так как вода с влажного термометра не испаряется. Чем дальше воздух от насыщения, тем интенсивнее происходит процесс испарения, тем соответственно больше разность показаний термометров.

Составлены специальные психрометрические таблицы, по которым, зная показания сухого термометра и разность показаний сухого и влажного термометров, можно определить относительную влажность воздуха.

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ 13

1. В сосуде с подвижным поршнем находятся вода и её насыщенный пар. Объём пара изотермически уменьшили в 3 раза. Концентрация молекул пара при этом
 - 1) уменьшилась в 3 раза
 - 2) не изменилась
 - 3) увеличилась в 3 раза
 - 4) увеличилась в 9 раз
2. При одной и той же температуре насыщенный пар в закрытом сосуде отличается от ненасыщенного пара в таком же сосуде
 - 1) давлением
 - 2) средней скоростью движения молекул
 - 3) средней кинетической энергией движения молекул
 - 4) отсутствием примеси посторонних газов
3. В сосуде под поршнем находится ненасыщенный пар. Как можно его сделать насыщенным?
 - 1) повышая температуру
 - 2) уменьшая объём сосуда
 - 3) увеличивая внутреннюю энергию пара
 - 4) добавляя в сосуд другой газ
4. В сосуде под поршнем находится насыщенный пар. Объём пара изотермически уменьшили в 2 раза. Как изменилось давление пара?
 - 1) уменьшилось в 2 раза
 - 2) не изменилось
 - 3) увеличилось в 2 раза
 - 4) уменьшилось в 4 раза
5. В сосуде под поршнем находится насыщенный пар. Температуру сосуда уменьшили в 2 раза. Как изменилось давление пара?
 - 1) уменьшилось в 2 раза
 - 2) не изменилось
 - 3) увеличилось в 2 раза
 - 4) уменьшилось

6. В сосуде, содержащем только пар и воду, поршень перемещается так, что давление остаётся постоянным. Температура при этом

- 1) не изменяется
- 2) повышается
- 3) понижается
- 4) может как уменьшаться, так и увеличиваться

7. В кубическом метре воздуха в помещении при температуре $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ находится $1,00 \cdot 10^{-2}$ кг водяных паров. Пользуясь таблицей плотности насыщенных паров воды, определите относительную влажность воздуха.

$t, ^{\circ}\text{C}$	16	17	18	19	2°	21	22	23
$\rho, 10^{-2}, \text{кг/м}^3$	1,36	1,45	1,54	1,63	1,73	1,83	1,94	2,06

- 1) 100% 2) 75% 3) 65% 4) 55%

8. Относительная влажность воздуха в цилиндре под поршнем равна 60%. Воздух изотермически сжали, уменьшив его объём в два раза. Относительная влажность воздуха стала

- 1) 120% 2) 100% 3) 60% 4) 30%

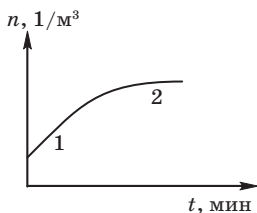
9. В цилиндре под поршнем находятся вода и насыщенный водяной пар. Поршень медленно изотермически выдвигают из цилиндра. Как меняются при этом давление водяного пара, его масса и масса воды в цилиндре? Для каждой величины определите соответствующий характер её изменения:

- 1) увеличится
- 2) уменьшится
- 3) не изменится

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Давление водяного пара в цилиндре	Масса водяного пара в цилиндре	Масса воды в цилиндре

10. В стеклянную колбу налили немного воды и закрыли её пробкой. Вода постепенно испарялась. В конце процесса на стенках колбы осталось несколько капель воды. На рисунке показан график зависимости от времени концентрации n молекул водяного пара внутри колбы. Какие два утверждения можно считать правильными. Запишите их номера.



- 1) на участке 1 пар насыщенный, а на участке 2 — ненасыщенный
- 2) на обоих участках пар ненасыщенный
- 3) на обоих участках пар насыщенный
- 4) на участке 1 пар ненасыщенный, а на участке 2 — насыщенный
- 5) концентрация молекул насыщенного пара остаётся постоянной

ТЕРМОДИНАМИКА

Внутренняя энергия макроскопической системы

1. Понятие внутренней энергии. Макроскопические тела состоят из движущихся и взаимодействующих частиц: молекул, атомов, ионов. В свою очередь, атомы и ядра атомов тоже состоят из движущихся и взаимодействующих частиц.

Движущиеся тела обладают кинетической энергией, следовательно, частицы (молекулы, атомы, ионы), из которых состоит вещество, тоже обладают кинетической энергией.

Взаимодействующие тела обладают энергией взаимодействия или потенциальной энергией. Поскольку частицы вещества взаимодействуют между собой, то они обладают потенциальной энергией.

Следовательно, частицы, из которых состоят макроскопические тела, обладают кинетической и потенциальной

энергией, их сумма и есть **внутренняя энергия** макроскопической системы.

Внутренней энергией U макроскопической системы называют сумму кинетической энергии E_k движения составляющих его частиц (молекул, атомов, ионов) и потенциальной энергии E_{π} их взаимодействия.

$$U = E_k + E_{\pi}$$

Единицей внутренней энергии является 1 джоуль (1 Дж).

К внутренней энергии относят и энергию движения и взаимодействия частиц, входящих в состав атомов и ядер вещества, однако в молекулярной физике имеют дело с процессами, которые происходят при не слишком высоких температурах и не связаны с превращением вещества. В этих процессах внутриатомная и внутриядерная энергия не изменяется.

Внутренняя энергия тела зависит от его состояния, т.е. является функцией состояния и определяется однозначно параметрами: p , V , T . Это значит, что тело, находясь в состоянии с данными значениями параметров, имеет одно и только одно значение внутренней энергии. При изменении состояния тела изменяется значение внутренней энергии.

Кинетическая энергия тела прямо пропорциональна квадрату его скорости. Поскольку молекулы имеют разные скорости и, следовательно, разные кинетические энергии, то их совокупность характеризуется средней кинетической энергией, которая прямо пропорциональна среднему квадрату скорости движения молекул:

$$\overline{E_k} = \frac{m_0 \bar{v}^2}{2}.$$

Так как температура тела тем выше, чем больше средний квадрат скорости движения молекул, которому прямо пропорциональна средняя кинетическая энергия молекул, то можно сказать, что температура тела прямо пропорциональна средней кинетической энергии составляющих его частиц.

Внутренняя энергия тела зависит от его температуры, а об изменении внутренней энергии можно судить по изменению температуры тела.

Внутренняя энергия тела зависит и от его агрегатного состояния. Так, она больше у стоградусного пара, чем у воды такой же массы при той же температуре. Это объясняется различием потенциальных энергий взаимодействия молекул пара и воды.

Внутренняя энергия зависит от деформации тела: она больше у деформированного тела, чем у недеформированного.

Внутренняя энергия, так же как температура, давление и объём, характеризует состояние системы.

Следует иметь в виду, что внутренняя энергия тела не зависит от его движения как целого и от его положения в пространстве. Так, значения внутренней энергии у шарика, лежащего на полу и поднятого на некоторую высоту, одинаковы.

2. Способы изменения внутренней энергии. Определить значение внутренней энергии тела можно лишь для простейших макроскопических систем, например для идеального газа. В большинстве же случаев рассчитать внутреннюю энергию системы невозможно, так как для этого потребовалось бы знать энергию движения и взаимодействия каждой молекулы. Однако в этом порой нет необходимости, поскольку чаще интерес представляет не значение внутренней энергии тела, а её изменение. Это связано с тем, что важно знать, какую работу тело совершит за счёт имеющейся у него энергии. Значение совершённой работы равно изменению энергии тела.

Внутреннюю энергию макроскопической системы можно изменить в процессе совершения работы или путём теплопередачи.

Если взять монету и потереть её о поверхность стола, то через некоторое время можно ощутить, что температура монеты повысилась, следовательно, выросла внутренняя энергия монеты. На ощупь можно определить повышение температуры гвоздя, забиваемого молотком. В этом случае

механическая энергия молотка превращается во внутреннюю энергию гвоздя и молотка.

Можно наблюдать уменьшение внутренней энергии системы, когда она сама совершает работу. Если на дно толстостенной банки налить немного воды и закрыть банку пробкой (рис. 81), а затем накачать в неё воздух, то при некотором давлении пробка из банки вылетит.

В банке при этом образуется туман, который хорошо виден. Пробка вылетела из банки под действием избыточного давления воздуха в ней. При этом воздух совершил механическую работу за счёт своей внутренней энергии. О её уменьшении свидетельствует понижение температуры воздуха в банке.

Внутреннюю энергию можно изменить, не совершая работу. Например, внутренняя энергия воздуха в комнате и всех предметов, находящихся в ней будет увеличиваться, если при закрытых окнах и дверях включить батареи парового отопления или затопить печь. Если опустить в горячую воду ложку, то температура ложки повысится, а воды понизится. В этом случае изменение внутренней энергии макроскопических тел происходит без совершения работы в процессе **теплопередачи (теплообмена)**.

Теплопередачей называется способ изменения внутренней энергии тела, при котором происходит передача энергии от одной части тела к другой или от одного тела к другому без совершения работы.

При теплопередаче не происходит превращения энергии из одной формы в другую, как при совершении работы. Этот процесс характеризуется передачей внутренней энергии от более нагретого тела к менее нагретому телу.



Рис. 81

3. Теплопроводность. Различают три вида теплопередачи: **теплопроводность, конвекцию и излучение.**

Теплопроводность можно наблюдать на следующем опыте.

Если к металлическому стержню с помощью воска прикрепить несколько гвоздиков (рис. 82), закрепить один конец стержня в штативе, а другой нагревать на спиртовке, то через некоторое время гвоздики начнут отпадать от стержня: сначала отпадёт тот гвоздик, который ближе к спиртовке, затем следующий и т.д.

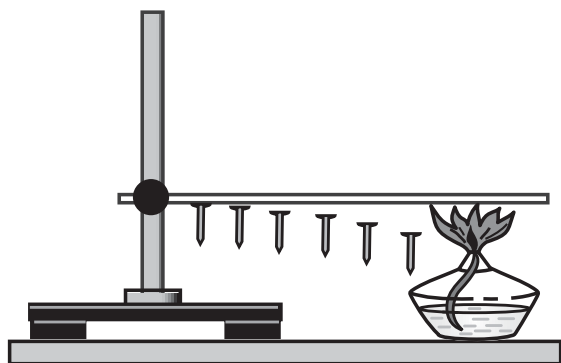


Рис. 82

Это происходит потому, что при повышении температуры воск начинает плавиться. Поскольку гвоздики отпадали не одновременно, а постепенно, можно сделать вывод, что температура стержня повышалась постепенно. Следовательно, постепенно увеличивалась и внутренняя энергия стержня, она передавалась от одного его конца к другому.

Передачу энергии при теплопроводности можно объяснить с точки зрения внутреннего строения вещества. Молекулы ближнего к спиртовке конца стержня получают от неё энергию, их энергия увеличивается, они начинают более интенсивно колебаться и передают часть своей энергии соседним частицам, заставляя их колебаться быстрее. Те, в свою очередь, передают энергию своим соседям, и процесс передачи энергии распространяется по всему стержню.

ню. Увеличение кинетической энергии частиц приводит к повышению температуры стержня.

Важно, что при теплопроводности не происходит перемещения вещества, от одного тела к другому или от одной части тела к другой передаётся энергия.

Процесс передачи энергии от одного тела к другому или от одной части тела к другой, благодаря тепловому движению частиц, называется теплопроводностью.

Разные вещества обладают разной теплопроводностью. Если на дно пробирки, наполненной водой, положить кусочек льда (рис. 83) и верхний её конец поместить над пламенем спиртовки, то через некоторое время вода в верхней части пробирки за-

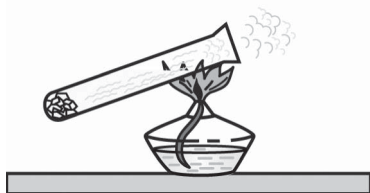


Рис. 83

кипит, а лёд при этом не растает. Следовательно, вода, так же как и все жидкости, обладает плохой теплопроводностью.

Ещё более плохой теплопроводностью обладают газы. Возьмём пробирку, в которой нет ничего, кроме воздуха, и расположим её над пламенем спиртовки, как показано на рисунке 84. Палец, помещённый в пробирку, не почувствует тепла. Следовательно, воздух и другие газы обладают плохой теплопроводностью.

Хорошими проводниками теплоты являются металлы, самыми плохими — сильно разреженные газы. Это объясняется особенностями их строения. Молекулы газов находятся друг от друга на расстояниях, больших, чем молекулы твёрдых тел, и значительно реже сталкиваются. Поэтому и передача энергии от одних молекул к другим в газах происходит не столь интенсивно, как в твёрдых телах. Теплопроводность жидкости занимает промежуточное положение между теплопроводностью газов и твёрдых тел.

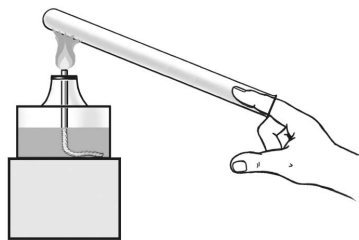


Рис. 84

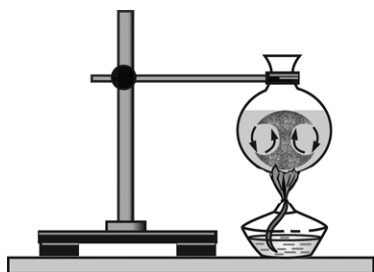


Рис. 85

4. Конвекция. Как известно, газы и жидкости плохо проводят теплоту. В то же время от батарей парового отопления нагревается воздух. Это происходит благодаря такому виду теплопроводности, как **конвекция**.

Если на дно колбы с водой аккуратно через трубочку опустить кристаллик марганцево-кислого калия и нагревать колбу снизу так, чтобы пламя касалось её в том месте, где лежит кристаллик, то можно увидеть, как со дна колбы будут подниматься окрашенные струйки воды (рис. 85).

Достигнув верхних слоёв воды, эти струйки начнут опускаться.

Объясняется это явление следующим образом. Нижний слой воды нагревается от пламени спиртовки. Нагреваясь, вода расширяется, её объём увеличивается, а плотность соответственно уменьшается. На этот слой воды действует архимедова сила, которая выталкивает нагретый слой жидкости вверх. Его место занимает опустившийся вниз холодный слой воды, который, в свою очередь, нагреваясь, перемещается вверх и т.д. Следовательно, энергия в данном случае переносится поднимающимися потоками жидкости.

Подобным образом осуществляется теплопередача и в газах. Если вертушку, сделанную из бумаги, поместить над электрической лампочкой, включённой в сеть или спиртовкой (рис. 86), то вертушка начнёт вращаться.

Это происходит потому, что нагретые менее плотные слои воздуха под действием выталкивающей силы поднимаются вверх, а более холодные движутся вниз и занимают их место, что и приводит к вращению вертушки.

Теплопередача, которая осуществляется в этом опыте и в опыте, изображённом на рисунке 86, называется **конвекцией**.

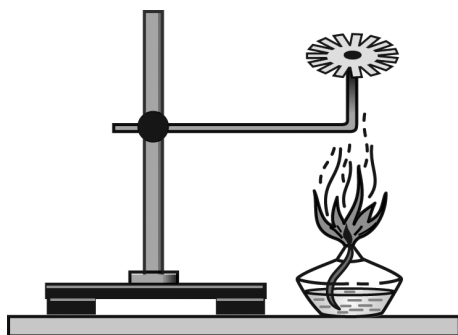


Рис. 86

Конвекция — вид теплопередачи, при котором энергия передаётся слоями жидкости или газа.

Конвекция связана с переносом вещества, поэтому она может осуществляться только в жидкостях и газах; в твёрдых телах конвекция не происходит.

5. Излучение. Третий вид теплопередачи — **излучение**. Если поднести руку к спирали электроплитки, включённой в сеть, к горячей электрической лампочке, к нагретому утюгу, к батарее отопления и т.п., то можно явно ощутить тепло.

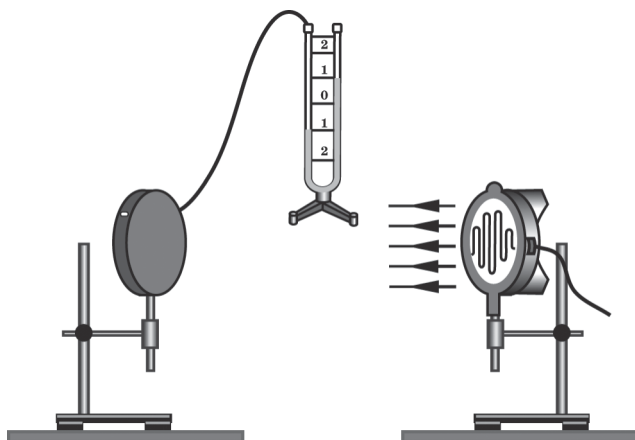


Рис. 87

Если закрепить металлическую коробочку (теплоприёмник), одна сторона которой блестящая, а другая чёрная, в штативе (рис. 87), соединить коробочку с манометром, а затем налить кипятка в сосуд, у которого одна поверхность белая, а другая чёрная, то, повернув сосуд к чёрной стороне теплоприёмника сначала белой стороной, а затем чёрной, можно заметить, что уровень жидкости в колене манометра, соединённом с теплоприёмником, понизится. При этом он сильнее понизится, когда сосуд обращён к теплоприёмнику чёрной стороной.

Понижение уровня жидкости в манометре происходит потому, что воздух в теплоприёмнике расширяется, это возможно при нагревании воздуха. Следовательно, воздух получает от сосуда с горячей водой энергию, нагревается и расширяется. Поскольку воздух обладает плохой теплопроводностью и конвекция в данном случае не происходит, так как плитка и теплоприёмник располагаются на одном уровне, то остаётся признать, что сосуд с горячей водой излучает энергию.

Опыт также показывает, что чёрная поверхность сосуда излучает больше энергии, чем белая. Об этом свидетельствует разный уровень жидкости в колене манометра, соединённом с теплоприёмником.

Чёрная поверхность не только излучает больше энергии, но и больше поглощает. Это можно также доказать экспериментально, если поднести включённую в сеть электроплитку сначала к блестящей стороне теплоприёмника, а затем к чёрной. Во втором случае жидкость в колене манометра, соединённом с теплоприёмником, опустится ниже, чем в первом.

Таким образом, чёрные тела хорошо поглощают и излучают энергию, а белые или блестящие плохо испускают и плохо поглощают её. Они хорошо энергию отражают. Поэтому понятно, почему летом носят светлую одежду, почему дома на юге предпочитают красить в белый цвет.

Путём излучения энергия передаётся от Солнца к Земле. Поскольку пространство между Солнцем и Землёй представляет собой вакуум (высота атмосферы Земли много

меньше расстояния от неё до Солнца), то энергия не может передаваться ни путём конвекции, ни путём теплопроводности. Таким образом, для передачи энергии путём излучения не требуется наличие какой-либо среды, эта теплопередача может осуществляться и в вакууме.

6. Количество теплоты. Удельная теплоёмкость вещества. Мерой изменения внутренней энергии в процессе теплопередачи является **количество теплоты**. **Количеством теплоты называется изменение внутренней энергии тела в процессе теплопередачи без совершения работы.**

Количество теплоты обозначается буквой Q , единица количества теплоты 1 джоуль (1 Дж).

При передаче телу некоторого количества теплоты без совершения работы его внутренняя энергия увеличивается. Если тело отдаёт какое-то количество теплоты, то его внутренняя энергия уменьшается.

Количество теплоты Q , полученное или отданное телом в процессе теплопередачи, зависит от массы тела m , разности конечной и начальной температуры и рода вещества.

Зависимость количества теплоты, необходимого для нагревания тела, от рода вещества характеризуется физической величиной, называемой **удельной теплоёмкостью вещества**.

Физическая величина, равная количеству теплоты, которое необходимо сообщить 1 кг вещества для нагревания его на 1°C (или на 1 К), называется удельной теплоёмкостью вещества.

Такое же количество теплоты 1 кг вещества отдаёт при охлаждении на 1 К или 1°C .

Удельная теплоёмкость вещества обозначается буквой c , единица удельной теплоёмкости — $[c] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Значения удельной теплоёмкости веществ определяют экспериментально. Жидкости имеют большую удельную теплоёмкость, чем металлы; самую большую удельную теплоёмкость имеет вода, очень маленькую удельную теплоёмкость имеет золото.

Удельная теплоёмкость газов зависит не только от их химического состава, но и от процесса изменения его внутренней энергии, который может осуществляться как при постоянном давлении, так и при постоянном объёме.

Удельная теплоёмкость свинца 140 Дж/кг °С. Это значит, что для нагревания 1 кг свинца на 1 °С необходимо затратить количество теплоты 140 Дж. Такое же количество теплоты выделится при остывании 1 кг воды на 1 °С.

Поскольку количество теплоты равно изменению внутренней энергии тела, то можно сказать, что удельная теплоёмкость показывает, на сколько изменяется внутренняя энергия 1 кг вещества при изменении его температуры на 1 °С. В частности, внутренняя энергия 1 кг свинца при его нагревании на 1 °С увеличивается на 140 Дж, а при охлаждении уменьшается на 140 Дж.

Количество теплоты Q , необходимое для нагревания тела массой m от температуры T_1 до температуры T_2 , равно произведению удельной теплоёмкости вещества, массы тела и разности конечной и начальной температур, т.е.

$$Q = cm (T_2 - T_1).$$

По этой же формуле вычисляется и количество теплоты, которое тело отдаёт при охлаждении. Только в этом случае от начальной температуры следует отнять конечную, т.е. от большего значения температуры отнять меньшее.

Как следует из приведённой формулы, если тело в процессе теплопередачи получает энергию, то $T_2 > T_1$ и $Q > 0$; если тело отдаёт энергию, то $T_2 < T_1$ и $Q < 0$.

7. Теплота сгорания топлива. Топливо является одним из источников энергии. При его сгорании происходит химическая реакция окисления содержащегося в его составе углерода. Атомы углерода соединяются с атомами кислорода, находящегося в воздухе, и образуется оксид углерода. При этом выделяется энергия. Энергия, выделяющаяся при сгорании разных видов топлива, характеризуется величиной, называемой **удельной теплотой сгорания топлива**.

Удельной теплотой сгорания топлива (q) называют физическую величину, показывающую, какое количество теплоты выделяется при полном сгорании топлива массой 1 кг.

Единица удельной теплоты сгорания топлива — $[q] = 1 \text{ Дж/кг}$.

Значения удельной теплоты сгорания топлива определяют экспериментально, они приводятся в специальных таблицах.

Количество теплоты Q , выделяющееся при полном сгорании топлива, равно произведению удельной теплоты сгорания топлива q и массы m топлива: $Q = qm$.

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ 14

1. Внутренняя энергия тела зависит от
 - А. Массы тела
 - Б. Положения тела относительно поверхности Земли
 - В. Скорости движения тела (при отсутствии трения)
 - 1) только А
 - 2) только Б
 - 3) только В
 - 4) только Б и В
2. Какой вид теплопередачи сопровождается переносом вещества
 - 1) только теплопроводность
 - 2) теплопроводность, конвекция и излучение
 - 3) только излучение
 - 4) только конвекция
3. Теплопередача путём конвекции может происходить
 - 1) только в газах
 - 2) только в жидкостях
 - 3) только в газах и жидкостях
 - 4) в газах, жидкостях и твёрдых телах

4. В стоящие на столе металлическую и пластмассовую кружки одинаковой вместимости одновременно налили по 200 г горячей воды одинаковой температуры. В какой кружке вода остынет быстрее?
- 1) в металлической
 - 2) в пластмассовой
 - 3) одновременно
 - 4) ответ зависит от начальной температуры воды
5. Воду равной массы, имеющую температуру 10°C , налили в две кастрюли, которые закрыли крышками и поставили на солнце. Кастрюли совершенно одинаковы, кроме цвета внешней поверхности: одна из них чёрная, другая блестящая. Что произойдёт с температурой воды в кастрюлях через некоторое время?
- 1) Температура воды не изменится ни в той, ни в другой кастрюле.
 - 2) Температура воды повысится и в той, и в другой кастрюле на одно и то же число градусов.
 - 3) Температура воды в блестящей кастрюле станет выше, чем в чёрной.
 - 4) Температура воды в чёрной кастрюле станет выше, чем в блестящей.
6. Удельная теплоёмкость стали равна $500 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}$. Что это означает?
- 1) При охлаждении 1 кг стали на 1°C выделяется энергия 500 Дж.
 - 2) При охлаждении 500 кг стали на 1°C выделяется энергия 1 Дж.
 - 3) При охлаждении 1 кг стали на 500°C выделяется энергия 1 Дж.
 - 4) При охлаждении 500 кг стали на 1°C выделяется энергия 500 Дж.
7. На столе под лучами солнца стоят три одинаковых кувшина, наполненные водой. Кувшин 1 закрыт пробкой, кувшин 2 открыт, а стенки кувшина 3 пронизаны мно-

жеством пор, по которым вода медленно просачивается наружу. Сравните установившуюся температуру воды в этих кувшинах.

- 1) в кувшине 1 будет самая низкая температура
- 2) в кувшине 2 будет самая низкая температура
- 3) в кувшине 3 будет самая низкая температура
- 4) во всех кувшинах будет одинаковая температура

8. Температура медной детали массой 200 г понизилась с 60 °С до 20 °С. Какое количество теплоты выделилось при этом?

- 1) 760 Дж
- 2) 1520 Дж
- 3) 3040 Дж
- 4) 2280 Дж

9. В стакан с горячей водой опустили чайную ложку. Как меняется при этом внутренняя энергия воды, ложки и системы: стакан, вода, ложка? Считать, что теплообмен с окружающей средой отсутствует.

Для каждой величины определите соответствующий характер её изменения:

- 1) увеличится
- 2) уменьшится
- 3) не изменится

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Внутренняя энергия воды	Внутренняя энергия ложки	Внутренняя энергия системы «стакан, вода, ложка»

10. Установите соответствие между процессами и формулами, которыми они описываются (Q — количество теплоты). К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

ПРОЦЕССЫ

- А) нагревание жидкости
Б) сгорание топлива

ФОРМУЛЫ

- 1) $\Delta U = \frac{m}{M} R \Delta T$
2) $p = nkT$
3) $Q = qm$
4) $Q = cm (T_2 - T_1)$
5) $\frac{pV}{T} = \text{const}$

Ответ:

А	Б

Изменение агрегатных состояний вещества: испарение и конденсация, кипение

1. Испарение. Явление превращения вещества из жидкого состояния в газообразное называется **парообразованием**. Парообразование может осуществляться в виде двух процессов: *испарения* и *кипения*.

Испарение происходит с поверхности жидкости при любой температуре. Так, лужи высыхают и при 10 °С, и при 20 °С, и при 30 °С. Таким образом, **испарением называется процесс превращения вещества из жидкого состояния в газообразное, происходящий с поверхности жидкости при любой температуре.**

С точки зрения молекулярно-кинетической теории строения вещества испарение жидкости объясняется следующим образом. Молекулы жидкости, участвуя в непрерывном движении, имеют разные скорости. Наиболее быстрые молекулы, находящиеся на границе поверхности воды и воздуха и имеющие сравнительно большую энергию, преодолевают притяжение соседних молекул и покидают жидкость. Так над жидкостью образуется пар.

Поскольку из жидкости при испарении вылетают молекулы, обладающие большей внутренней энергией по сравнению с энергией молекул, остающихся в жидкости, то средняя скорость и средняя кинетическая энергия молекул жидкости уменьшается и, следовательно, температура жидкости уменьшается.

Скорость испарения жидкости зависит от рода жидкости. Например, скорость испарения эфира больше, чем скорость испарения воды и растительного масла. Кроме того, скорость испарения зависит от движения воздуха над поверхностью жидкости. Доказательством может служить то, что бельё сохнет быстрее на ветру, чем в безветренном месте при тех же внешних условиях.

Скорость испарения зависит от температуры жидкости. Например, вода при температуре 30 °С испаряется быстрее, чем вода при 10 °С.

Хорошо известно, что вода, налитая в блюдце, испарится быстрее, чем вода такой же массы, налитая в стакан. Следовательно, скорость испарения зависит от площади поверхности жидкости.

2. Конденсация.

Процесс превращения вещества из газообразного состояния в жидкое называется конденсацией.

Процесс конденсации происходит одновременно с процессом испарения. Молекулы, вылетевшие из жидкости и находящиеся над её поверхностью, участвуют в хаотическом движении. Они сталкиваются с другими молекулами, и в какой-то момент времени их скорости могут быть направлены к поверхности жидкости, и молекулы вернутся в неё.

3. Кипение. Второй процесс парообразования — кипение. Наблюдать этот процесс можно с помощью простого опыта, нагревая воду в стеклянной колбе. При нагревании воды в ней через некоторое время появляются пузырьки, в которых содержатся воздух и насыщенный водяной пар, который образуется при испарении воды внутри пузырьков. При повышении температуры давление внутри пузырьков растёт, и под действием выталкивающей силы они поднимаются вверх. Поскольку температура верхних слоёв воды меньше, чем нижних, пар в пузырьках начинает конденсироваться, и они сжимаются. Когда вода прогреется по всему объёму, пузырьки с паром поднимаются до поверх-

ности, лопаются, и пар выходит наружу. Вода кипит. Это происходит при такой температуре, при которой давление насыщенного пара в пузырьках равно атмосферному давлению.

Процесс парообразования, происходящий во всём объёме жидкости при определённой температуре, называют кипением.

Температуру, при которой жидкость кипит, называют температурой кипения.

Эта температура зависит от атмосферного давления. При повышении атмосферного давления температура кипения возрастает.

Опыт показывает, что в процессе кипения температура жидкости не изменяется, несмотря на то что извне поступает энергия. Переход жидкости в газообразное состояние при температуре кипения связан с увеличением расстояния между молекулами и, соответственно, с преодолением притяжения между ними. На совершение работы по преодолению сил притяжения расходуется подводимая к жидкости энергия. Так происходит до тех пор, пока вся жидкость не превратится в пар. Поскольку жидкость и пар в процессе кипения имеют одинаковую температуру, то средняя кинетическая энергия молекул не изменяется, увеличивается лишь их потенциальная энергия.

На рисунке 88 приведён график зависимости температуры воды от времени в процессе её нагревания от комнатной температуры до температуры кипения (АБ), кипения (БВ), нагревания пара (ВГ), охлаждения пара (ГД), конденсации (ДЕ) и последующего охлаждения (ЕЖ).

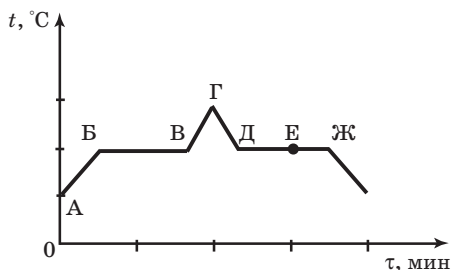


Рис. 88

4. Удельная теплота парообразования. Для превращения разных веществ из жидкого состояния в газообразное требуется разная энергия, эта энергия характеризуется величиной, называемой **удельной теплотой парообразования**.

Удельной теплотой парообразования (L) называют величину, равную отношению количества теплоты, которое нужно сообщить веществу массой **1 кг**, для превращения его из жидкого состояния в газообразное при температуре кипения.

Единица удельной теплоты парообразования — $[L] = \text{Дж/кг}$.

Чтобы рассчитать количество теплоты Q , которое необходимо сообщить веществу массой m для его превращения из жидкого состояния в газообразное, необходимо удельную теплоту парообразования (L) умножить на массу вещества: $Q = Lm$.

При конденсации пара выделяется некоторое количество теплоты, причём его значение равно значению количества теплоты, которое необходимо затратить для превращения жидкости в пар при той же температуре.

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ 15

1. Вода может испаряться

- 1) только при кипении
- 2) только при нагревании
- 3) при любой температуре, если пар в воздухе над поверхностью воды является ненасыщенным
- 4) при любой температуре, если пар в воздухе над поверхностью воды является насыщенным

2. Кипение происходит

- 1) при любой температуре с поверхности жидкости
- 2) при определённой температуре с поверхности жидкости
- 3) при любой температуре во всем объёме жидкости
- 4) при определённой температуре во всем объёме жидкости

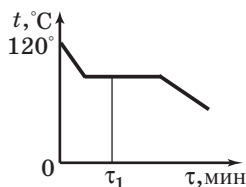
3. На вершине горы температура кипения воды

- 1) равна $100\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 2) больше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 3) меньше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 4) ответ зависит от времени года

4. В процессе парообразования жидкости происходит

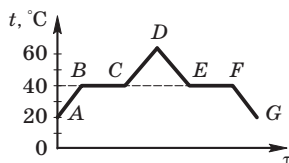
- 1) уменьшение размеров частиц жидкости
- 2) изменение химического состава жидкости
- 3) увеличение кинетической энергии частиц жидкости
- 4) нарушение ближнего порядка в расположении частиц жидкости

5. На рисунке приведён график зависимости температуры воды от времени. В начальный момент времени вода находилась в газообразном состоянии. В каком состоянии находится вода в момент времени τ_1 ?



- 1) только в газообразном
- 2) только в жидком
- 3) часть воды в жидком состоянии, часть — в газообразном
- 4) часть воды в жидком состоянии, часть — в кристаллическом

6. В начальный момент в сосуде под лёгким поршнем находится только жидкий эфир. На рисунке показан график зависимости температуры t эфира от времени τ его нагревания и последующего охлаждения.



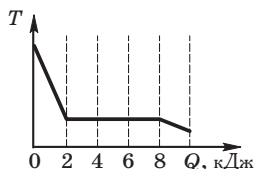
Какой участок графика соответствует процессу конденсации эфира?

- 1) BC
- 2) DE
- 3) EF
- 4) FG

7. Удельная теплота парообразования воды равна $2,3 \cdot 10^6$ Дж/кг. Это означает, что при конденсации

- 1) водяного пара любой массы при температуре конденсации выделяется количество теплоты, равное $2,3 \cdot 10^6$ Дж
- 2) 1 кг водяного пара при температуре конденсации выделяется количество теплоты, равное $2,3 \cdot 10^6$ Дж
- 3) 2,3 кг водяного пара при температуре конденсации выделяется количество теплоты, равное 10^6 Дж
- 4) 1 кг водяного пара при любой температуре выделяется количество теплоты, равное $2,3 \cdot 10^6$ Дж

8. Зависимость температуры 0,02 кг первоначально газообразного вещества от количества выделенной им теплоты представлена на рисунке. Какова удельная теплота парообразования этого вещества?



- 1) 0,12 кДж/кг
- 2) 0,16 кДж/кг
- 3) 300 кДж/кг
- 4) 400 кДж/кг

9. Как меняются в процессе кипения воды её температура, кинетическая энергия молекул, внутренняя энергия воды?

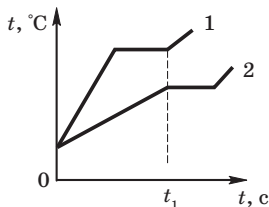
Для каждой величины определите соответствующий характер её изменения:

- 1) увеличится
- 2) уменьшится
- 3) не изменится

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Температура воды	Кинетическая энергия молекул	Внутренняя энергия воды

10. На рисунке приведены графики зависимости от времени температуры двух веществ одинаковой массы, находившихся первоначально в жидком состоянии, получающих одинаковое количество теплоты в единицу времени. Из приведённых ниже утверждений выберите правильные и запишите их номера.



- 1) Вещество 1 полностью переходит в газообразное состояние, когда начинается кипение вещества 2
- 2) Удельная теплоёмкость вещества 1 больше, чем вещества 2
- 3) Удельная теплота парообразования вещества 1 больше, чем вещества 2
- 4) Температура кипения вещества 1 выше, чем вещества 2
- 5) В течение промежутка времени $0-t_1$ оба вещества находились в жидком состоянии

Ответ:

А	Б

Изменение агрегатных состояний вещества: плавление и кристаллизация

1. Плавление. Плавлением называется процесс превращения вещества из твёрдого состояния в жидкое.

Наблюдения показывают, что если измельчённый лёд, имеющий, например, температуру $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, оставить в тёплой комнате, то его температура будет повышаться. При $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ лёд начнёт таять, а температура при этом не будет изменяться до тех пор, пока весь лёд не превратится в жидкость. После этого температура образовавшейся из льда воды будет повышаться.

Это означает, что кристаллические тела, к которым относится и лёд, плавятся при определённой температуре, которую называют **температурой плавления**. Важно, что

во время процесса плавления температура кристаллического вещества и образовавшейся в процессе его плавления жидкости остаётся неизменной.

В описанном выше опыте лёд получал некоторое количество теплоты, его внутренняя энергия увеличивалась за счёт увеличения средней кинетической энергии движения молекул. Затем лёд плавился, его температура при этом не менялась, хотя лёд получал некоторое количество теплоты. Следовательно, его внутренняя энергия увеличивалась, но не за счёт кинетической, а за счёт потенциальной энергии взаимодействия молекул. Получаемая извне энергия расходуется на разрушение кристаллической решётки. Подобным образом происходит плавление любого кристаллического тела.

Аморфные тела не имеют определённой температуры плавления. При повышении температуры они постепенно размягчаются, пока не превратятся в жидкость. У них нет определённой температуры плавления.

2. Кристаллизация. Процесс перехода вещества из жидкого состояния в твёрдое состояние называют кристаллизацией. Охлаждаясь, жидкость будет отдавать некоторое количество теплоты окружающему воздуху. При этом будет уменьшаться её внутренняя энергия за счёт уменьшения средней кинетической энергии его молекул. При определённой температуре начнётся процесс кристаллизации, во время этого процесса температура вещества не будет изменяться, пока всё вещество не перейдёт в твёрдое состояние. Этот переход сопровождается выделением определённого количества теплоты и, соответственно, уменьшением внутренней энергии вещества за счёт уменьшения потенциальной энергии взаимодействия его молекул.

Переход вещества из жидкого состояния в твёрдое состояние происходит при определённой температуре, называемой **температурой кристаллизации**. Эта температура остаётся неизменной в течение всего процесса плавления. Она равна температуре плавления этого вещества.

На рисунке 89 приведён график зависимости температуры твёрдого кристаллического вещества от времени

в процессе его нагревания от комнатной температуры до температуры плавления (АБ), плавления (БВ), нагревания вещества в жидком состоянии (ВГ), охлаждения жидкого вещества (ГД), кристаллизации (ДЕ) и последующего охлаждения вещества в твёрдом состоянии (ЕЖ).

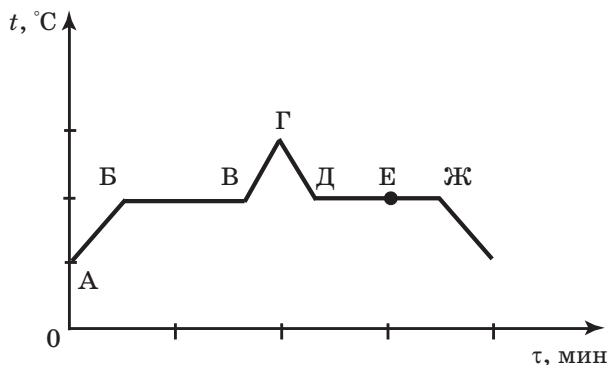


Рис. 89

3. Удельная теплота плавления. Различные кристаллические вещества имеют разное строение. Соответственно, для того чтобы разрушить кристаллическую решётку твёрдого тела при температуре его плавления, необходимо ему сообщить разное количество теплоты.

Количество теплоты, которое необходимо сообщить 1 кг кристаллического вещества, чтобы превратить его в жидкость при температуре плавления, называют удельной теплотой плавления.

Опыт показывает, что удельная теплота плавления равна удельной теплоте кристаллизации.

Удельную теплоту плавления обозначают буквой λ . Единица удельной теплоты плавления — $[\lambda] = 1 \text{ Дж/кг}$.

Значения удельной теплоты плавления кристаллических веществ приведены в таблице. Удельная теплота плавления алюминия $3,9 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$. Это означает, что для плавления 1 кг алюминия при температуре плавления необходимо затратить количество теплоты $3,9 \cdot 10^5 \text{ Дж}$. Этому же значению равно увеличение внутренней энергии 1 кг алюминия.

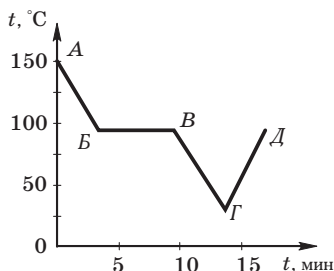
Чтобы вычислить количество теплоты Q , необходимое для плавления вещества массой m , взятого при температуре плавления, следует удельную теплоту плавления λ умножить на массу вещества: $Q = \lambda m$.

Эта же формула используется при вычислении количества теплоты, выделяющейся при кристаллизации жидкости.

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ 16

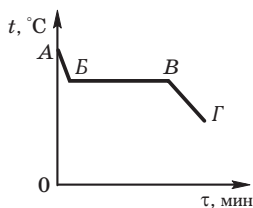
1. При кристаллизации вода переходит из жидкого состояния в твёрдое. При этом переходе
 - 1) уменьшается и температура, и внутренняя энергия воды
 - 2) уменьшается температура, не изменяется внутренняя энергия воды
 - 3) уменьшается внутренняя энергия, не изменяется температура воды
 - 4) уменьшается температура, возрастает внутренняя энергия воды
2. В процессе плавления кристаллического тела происходит
 - 1) уменьшение размеров частиц
 - 2) изменение химического состава
 - 3) разрушение кристаллической решётки
 - 4) уменьшение кинетической энергии частиц
3. В одном сосуде находится лёд при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, в другом — такая же масса воды при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Внутренняя энергия льда
 - 1) равна внутренней энергии воды
 - 2) больше внутренней энергии воды
 - 3) меньше внутренней энергии воды
 - 4) равна нулю

4. На рисунке изображён график зависимости температуры тела от времени. Первоначально тело находилось в жидком состоянии. Какой процесс характеризует отрезок BB ?



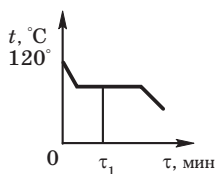
- 1) нагревание 3) плавление
2) охлаждение 4) кристаллизацию

5. На рисунке приведён график зависимости температуры некоторого вещества от времени. Первоначально вещество находилось в жидком состоянии. Какая точка графика соответствует началу процесса отвердевания вещества?



- 1) A 2) B 3) B

6. На рисунке приведён график зависимости температуры некоторого вещества от времени. В начальный момент времени вещество находилось в жидком состоянии. В каком состоянии находится вещество в момент времени τ_1 ?



- 1) только в твёрдом
2) только в жидком
3) часть вещества в твёрдом состоянии, часть — в жидком
4) часть вещества в жидком состоянии, часть — в газообразном

7. Удельную теплоту плавления можно рассчитать по формуле

1) $\frac{Q}{m(t_2 - t_1)}$

3) $\frac{Q}{(t_2 - t_1)}$

2) $\frac{Q}{m}$

4) λm

8. Чему равно количество теплоты, которое необходимо затратить на полное превращение 2 кг свинца, взятого при температуре плавления, в жидкое состояние?

1) 12,5 кДж

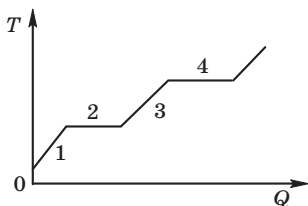
2) 50 кДж

3) 125 кДж

4) 16350 кДж

9. В цилиндре под поршнем находится твёрдое вещество.

Цилиндр поместили в раскалённую печь. На рисунке показан график изменения температуры T вещества по мере поглощения им количества теплоты Q .



Какие участки графика соответствуют нагреванию вещества в твёрдом состоянии и кипению вещества? Установите соответствие между тепловым процессом и участком графика. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

ПРОЦЕСС

А) нагревание твёрдого вещества

Б) кипение жидкости

УЧАСТОК ГРАФИКА

1) 1

2) 2

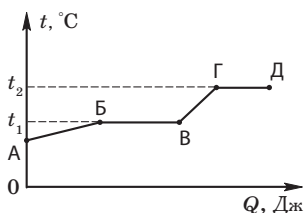
3) 3

4) 4

Ответ:

А	Б

10. На рисунке представлен график зависимости температуры некоторого вещества от полученного количества теплоты. Первоначально вещество находилось в твёрдом состоянии.



Используя данные графика, выберите из предложенного перечня два верных утверждения. Укажите их номера.

- 1) Удельная теплоёмкость вещества в твёрдом состоянии равна удельной теплоёмкости вещества в жидком состоянии.
- 2) Температура кипения вещества равна t_1 .
- 3) В точке В вещество находится в жидком состоянии.
- 4) В процессе перехода из состояния Б в состояние В внутренняя энергия вещества увеличивается.
- 5) Участок графика ГД соответствует процессу плавления вещества.

Ответ:

А	Б

Работа в термодинамике

1. Работа в механике. Одним из процессов изменения внутренней энергии макроскопической системы является совершение работы. В механике работа A силы F на перемещении S равна скалярному произведению этих векторов, т.е. $A = FS$ или $A = FS \cos \alpha$, где α — угол между вектором силы и вектором перемещения. Если направления силы и перемещения совпадают, то $A = FS$.

2. Работа при изменении объёма газа. Пусть в горизонтально расположенном цилиндре под поршнем, который

может перемещаться в нём без трения, находится сжатый газ (рис. 90).

В этом состоянии газ имеет объём V_1 и давление p , которое равно атмосферному. Если предоставить поршню свободу, то газ начнёт расширяться. Его объём станет равным V_2 , а давление останется прежним.

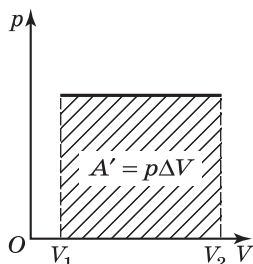


Рис. 90

При расширении газ перемещается на расстояние $l - l_0 = \Delta l$ под действием силы давления F . Работа, которую совершает газ, равна произведению модуля силы F и модуля перемещения Δl : $A = F\Delta l$. При этом считаем, что сила F — постоянна.

Сила давления F газа на поршень равна произведению давления p и площади S поршня, т.е.: $F = pS$. Тогда $A = pS\Delta l$. Произведение $S\Delta l$ — изменение объёма газа: $\Delta V = S\Delta l$, поэтому:

$$A = p\Delta V.$$

Таким образом, работа газа при неизменном давлении равна произведению его давления и изменения объёма.

Если газ при этом расширяется, как в рассмотренном выше примере, то его объём увеличивается, $\Delta V > 0$ и работа газа величина положительная $A > 0$. Если газ сжимается, то работа газа отрицательна: $A < 0$.

Если при изменении состояния газа его объём остаётся постоянным, то изменение объёма равно нулю ($\Delta V = 0$), и работа в этом случае тоже равна нулю ($A = 0$).

Работа, совершаемая над газом внешними телами A' , равна работе газа A с противоположным знаком: $A' = -A$; $A' = -p\Delta V$.

При сжатии газа ($V_2 < V_1$) работа внешних сил положительна ($A' > 0$), при расширении газа работа внешних сил отрицательна.

Полученная формула для вычисления работы макроскопической системы справедлива при любых изменениях объёма газа при постоянном давлении. Если давление газа изменяется, то формулу можно применить в случае столь малого изменения объёма газа, при котором приборами

не фиксируется изменение давления. Вычислив последовательно значения работы для малых изменений объема и просуммировав их, получают полную работу.

Получим ещё одно выражение для работы газа.

Пусть параметры газа массой m в состоянии 1 — p, V_1, T_1 , в состоянии 2 — p, V_2, T_2 . Уравнение Менделеева — Клапейрона для первого состояния газа: $pV_1 = \frac{m}{M}RT_1$, для второго — $pV_2 = \frac{m}{M}RT_2$. Вычтя из второго равенства первое, получим $p\Delta V = \frac{m}{M}R\Delta T_2$. В левой части равенства записано выражение для работы газа.

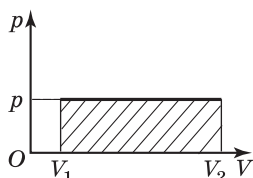


Рис. 91

3. Графическое представление работы. Построим график зависимости давления газа от его объема (рис. 91). Поскольку давление газа не изменяется, то графиком будет прямая линия, параллельная оси абсцисс.

Работа газа равна произведению его давления и изменения его объема ($A = p\Delta V$). На графике этому произведению численно равна площадь прямоугольника, ограниченного графиком $p = \text{const}$, осью абсцисс и перпендикулярами, восстановленными к оси абсцисс в точках V_1 и V_2 :

$$A = p\Delta V = p(V_2 - V_1).$$

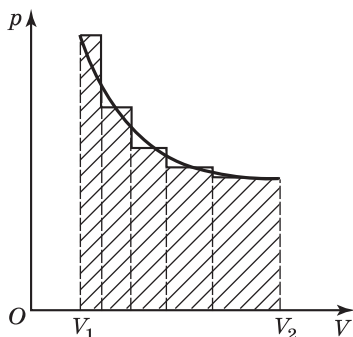


Рис. 92

Если давление газа не остаётся постоянным (рис. 92), то, как указывалось выше, для вычисления работы процесс изменения состояния газа необходимо разбить на элементарные процессы, происходящие при неизменном давлении, и вычислить значения элементарной работы, которые численно равны площадям прямоугольников, а затем их все сложить.

Суммарная работа будет и в этом случае равна площади фигуры, ограниченной графиком зависимости давления от объёма, осью абсцисс и перпендикулярами, восстановленными к оси абсцисс в точках V_1 и V_2 .

Первый закон термодинамики

1. Закон сохранения механической энергии. Закон сохранения энергии в механических процессах читается следующим образом:

Полная механическая энергия замкнутой системы тел, взаимодействующих между собой силами тяготения и упругости, остаётся неизменной.

Системы тел, в которых действуют силы тяготения или упругости, называют *консервативными*. Работа этих сил по замкнутой траектории равна нулю.

Если в замкнутой системе действует сила трения, которая является неконсервативной (её работа по замкнутой траектории не равна нулю), то механическая энергия системы будет уменьшаться. Так, например, уменьшается механическая энергия автомобиля, движущегося по горизонтальной дороге с выключенным двигателем, о чём свидетельствует уменьшение его скорости. При этом наблюдается нагревание трущихся поверхностей, т.е. увеличение внутренней энергии. В этом примере механическая энергия системы не сохраняется, часть её превращается во внутреннюю энергию.

2. Первый закон термодинамики. Внутреннюю энергию макроскопической системы можно изменить путём теплопередачи или совершения работы.

Предположим, что над системой одновременно совершается работа A' и ей сообщается некоторое количество теплоты Q . Например, газ, находящийся в цилиндре под

поршнем, сжимают и передают ему некоторое количество теплоты. Так как механическая энергия системы не меняется, то *изменение её внутренней энергии ΔU равно сумме работы, совершённой над системой, и переданного ей количества теплоты:*

$$\Delta U = A' + Q.$$

Это равенство можно записать иначе. Работа внешних сил над системой A' равна работе системы A с противоположным знаком: $A' = -A$. Подставим в приведённую формулу A вместо A' , получим: $\Delta U = -A + Q$. Преобразуем равенство и получим:

$$Q = \Delta U + A.$$

Это равенство представляет собой **первый закон термодинамики или закон сохранения энергии в механических и тепловых процессах** и читается следующим образом:

Количество теплоты, сообщённое системе, идёт на работу системы против внешних сил и на увеличение её внутренней энергии.

3. Эквивалентность теплоты и работы. Из первого закона термодинамики следует, что внутренняя энергия системы может быть изменена как в процессе совершения работы, так и в результате теплопередачи. Величины: работа и количество теплоты являются мерами изменения внутренней энергии системы при разных процессах.

Очевидно, что внутренняя энергия системы может быть изменена на одно и то же значение только при передаче ей некоторого количества теплоты или при совершении работы без теплообмена. Например, внутренняя энергия газа в цилиндре может быть увеличена на одно и то же значение при его сжатии и при теплообмене.

Это положение выражает принцип эквивалентности теплоты и работы.

4. Невозможность создания вечного двигателя. Долгое время предпринимали попытки создания вечного двигателя, т.е. такого устройства, которое совершало бы механиче-

скую работу только за счёт внутренней энергии, не получая энергию извне. Из первого закона термодинамики следует невозможность создания такого двигателя. Действительно, если к системе не подводят энергию, т.е. $Q = 0$, то работа будет совершаться только за счёт внутренней энергии системы, которая с течением времени будет уменьшаться и в конце концов станет равной нулю, и двигатель перестанет работать.

5. Применение первого закона термодинамики к изопроцессам.

Изотермический процесс. Согласно первому закону термодинамики количество теплоты, переданное системе, идёт на изменение внутренней энергии системы и работу системы против внешних сил: $Q = \Delta U + A$. Поскольку при изотермическом процессе температура не меняется, то $\Delta U = 0$, т.е. $Q = A$ или $Q = -A'$. Это означает, что при изотермическом процессе количество теплоты, переданное системе, идёт на совершение системой работы против внешних сил. Если система получает некоторое количество теплоты, то она расширяется и совершает положительную работу. Если система отдаёт некоторое количество теплоты, то она сжимается и совершает отрицательную работу. Иначе говоря, если газ сжимают изотермически, то он отдаёт некоторое количество теплоты.

Изохорный процесс. При изохорном процессе объём не изменяется, поэтому работа при изохорном процессе равна нулю. Применительно к нему первый закон термодинамики имеет вид: $Q = \Delta U$, т.е. все сообщённое системе количество теплоты идёт на увеличение её внутренней энергии. Количество теплоты в этом случае равно $Q = c_v m(T_2 - T_1)$, где c_v — удельная теплоёмкость газа при изохорном процессе (при постоянном объёме).

Изобарный процесс. При изобарном процессе давление постоянно, поэтому переданное системе количество теплоты идёт на изменение внутренней энергии системы и на работу системы против внешних сил: $Q = \Delta U + p\Delta V$. Количество теплоты в этом случае равно $Q = c_p m(T_2 - T_1)$,

где c_p — удельная теплоёмкость газа при изобарном процессе (при постоянном давлении).

В формулу первого закона термодинамики подставим выражения для работы, внутренней энергии и количества теплоты: $c_p m \Delta T = c_v m \Delta T + \frac{m}{M} R \Delta T$ или $c_p = c_v + \frac{R}{M}$, откуда $c_p - c_v = \frac{R}{M}$. Записанное равенство называют уравнением Майера. Для молярной (отнесённой к 1 моль газа) теплоёмкости газа $c_p - c_v = R$.

Адиабатный процесс. При адиабатном процессе не передаётся энергия, следовательно, $Q = 0$.

В соответствии с первым законом термодинамики $Q = \Delta U + A$ для адиабатного процесса: $\Delta U = -A$. Согласно этому уравнению при расширении газа он совершает работу, его внутренняя энергия уменьшается и температура понижается. Действительно, при расширении работа газа положительна ($\Delta V > 0$), следовательно, $A > 0$, а $\Delta U < 0$. Подтверждением этого является опыт по адиабатному расширению воздуха.

При сжатии газа внешние силы совершают положительную работу, и внутренняя энергия газа увеличивается. Примером может служить опыт с воздушным огнём. На дно толстостенного цилиндра кладут ватку, смоченную эфиром, резко ударяют по поршню, ватка воспламеняется. В этом случае при адиабатном сжатии воздуха и паров эфира их внутренняя энергия и, соответственно, температура возрастают.

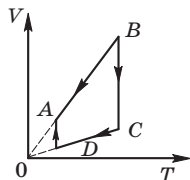
ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ 17

1. Газ совершил работу 10 Дж и получил количество теплоты 6 Дж. Внутренняя энергия газа
 - 1) увеличилась на 16 Дж
 - 2) уменьшилась на 16 Дж
 - 3) увеличилась на 4 Дж
 - 4) уменьшилась на 4 Дж

2. Газу передали изохорно количество теплоты 300 Дж. Как изменилась его внутренняя энергия в этом процессе?

- 1) увеличилась на 300 Дж
- 2) увеличилась на 600 Дж
- 3) уменьшилась на 600 Дж
- 4) уменьшилась на 300 Дж

3. На рисунке приведён график циклического процесса, проведённого с одноатомным идеальным газом неизменной массы. На каком из участков внутренняя энергия газа не менялась?



- 1) DA
- 2) CD
- 3) AB
- 4) такого участка нет

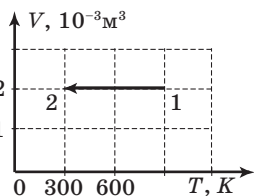
4. Какой процесс происходит без теплообмена с окружающей средой?

- 1) изотермический
- 2) адиабатный
- 3) изобарный
- 4) изохорный

5. При каком процессе остаётся неизменной внутренняя энергия 1 моль идеального газа?

- 1) при изобарном расширении
- 2) при изохорном нагревании
- 3) при адиабатном сжатии
- 4) при изотермическом сжатии

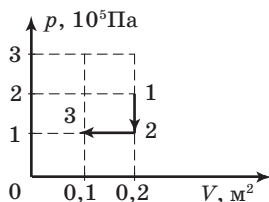
6. На рисунке показан график изменения состояния газа постоянной массы. В этом процессе газ отдал количество теплоты, равное 6 кДж, в результате чего его внутренняя энергия уменьшилась на



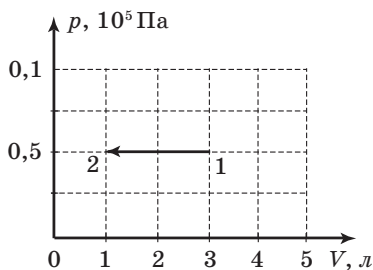
- 1) 2,4 кДж
- 2) 3,6 кДж
- 3) 4,8 кДж
- 4) 6 кДж

7. Какую работу совершает газ при переходе из состояния 1 в состояние 3?

- 1) 10 кДж
- 2) 20 кДж
- 3) 30 кДж
- 4) 40 кДж



8. На рисунке показано расширение водорода двумя способами: 1–2 и 3–4. Сравните работу газа при этих процессах.



- 1) $A_{34} = 2A_{12}$
- 2) $A_{34} = 1,5A_{12}$
- 3) $A_{34} = A_{12} \neq 0$
- 4) $A_{34} = A_{12} = 0$

9. В ходе адиабатного процесса внутренняя энергия одного моля углекислого газа уменьшается. Как изменяются при этом температура углекислого газа, его давление и объём?

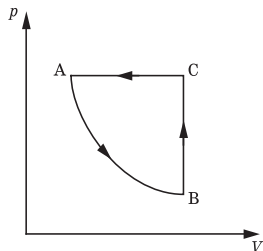
Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличивается
- 2) уменьшается
- 3) не изменяется

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Температура углекислого газа	Давление углекислого газа	Объём углекислого газа

10. На рисунке приведён график циклического процесса, проведённого с одним молем идеального газа.



Установите соответствие между участками цикла и физическими величинами, описывающими эти участки (ΔU — изменение внутренней энергии газа, A — работа газа). К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго столбца и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

УЧАСТОК ЦИКЛА	ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ
А) AB	1) $\Delta U = 0, A > 0$
Б) BC	2) $\Delta U = 0, A < 0$
	3) $\Delta U < 0, A < 0$
	4) $\Delta U > 0, A = 0$

Ответ:

А	Б

Второй закон термодинамики

1. Необратимые процессы. При теплообмене тело, имеющее более высокую температуру, отдаёт некоторое количество теплоты и остывает, а тело, имеющее более низкую температуру, получает некоторое количество теплоты и нагревается.

С точки зрения первого закона термодинамики возможен и такой процесс, при котором менее нагретое тело отдаёт некоторое количество теплоты и ещё сильнее остывает, а более нагретое тело получает некоторое количество теплоты и ещё сильнее нагревается. При этом полная энергия системы сохраняется, если система замкнутая и теплоизолированная. Таким образом, первый закон термодинамики ничего не говорит о направлении процесса теплообмена, т.е. о том, какое тело отдаёт энергию, а какое её получает, и не запрещает самопроизвольную передачу

энергии от более холодного тела к более горячему. Этот запрет накладывает второй закон термодинамики, который содержит утверждение о направленности процессов теплообмена.

Итак, при теплообмене энергия переходит от более нагретого тела к менее нагретому. Обратный процесс самопроизвольно происходить не может, т.е. теплопередача — необратимый процесс.

Если налить в сосуд раствор медного купороса, а сверху воду, то через некоторое время вследствие диффузии вещества перемешаются и раствор станет однородным. Диффузия произошла самопроизвольно. Обратный процесс, т.е. разделение смеси на вещества, самопроизвольно произойти не может. Диффузия — также пример необратимого процесса.

Ещё одним примером подобного процесса является движение шарика, упавшего на плиту и отскочившего обратно. При этом шарик сам не поднимется на ту же высоту, с которой он упал, поскольку часть механической энергии превратится во внутреннюю энергию воздуха, шарика и плиты. Если бы отсутствовало сопротивление воздуха и удар шарика о плиту был абсолютно упругим, то шарик после удара поднялся бы на прежнюю высоту и его движение было бы обратимым. Однако реальные движения происходят с трением, поэтому реальные движения необратимы.

Необратимыми являются процессы, обратные которым самопроизвольно не происходят.

Все реальные процессы необратимы, в том числе старение живых организмов.

Возникает вопрос, что нужно сделать, чтобы в рассмотренном выше примере шарик, ударившись о плиту, поднялся на прежнюю высоту. Очевидно, необходимо иметь источник энергии, от которого шарик с помощью специального устройства передавалась бы энергия, равная энергии, затраченной на совершение работы против сил трения и превратившейся во внутреннюю энергию при деформации шарика и плиты. Иначе говоря, необходимо осуществить более сложный процесс, частью которого являлось бы движение шарика вверх после удара о плиту.

Аналогично можно передать энергию от тела с меньшей температурой телу с более высокой температурой. Однако для этого нужна специальная установка, с помощью которой передавалась бы энергия, т.е. необходимо осуществить более сложный процесс, частью которого являлась бы передача энергии от менее нагретого тела к более нагретому телу.

Необратимым называется процесс, обратный которому может протекать лишь как одно из звеньев более сложного процесса.

2. Второй закон термодинамики. Понятие необратимости процессов составляет содержание **второго закона термодинамики**, который указывает направление энергетических превращений в природе. Он имеет несколько эквивалентных формулировок. Немецкий учёный Р. Клаузиус (1822–1888) сформулировал второй закон термодинамики следующим образом:

— **невозможен процесс, единственным результатом которого был бы переход теплоты от более холодного тела к более горячему.**

Из приведённой формулировки следует, что если процесс передачи энергии от более холодного тела к более горячему осуществляется, то при этом происходят определённые изменения в окружающих телах. В частности, такой процесс происходит в холодильнике: энергия передаётся от холодильной камеры среде, имеющей более высокую температуру, но этот процесс осуществляется при совершении работы над рабочим веществом, и при этом происходят определённые изменения в окружающей среде.

3. Статистическое объяснение необратимости. Необратимость можно объяснить с точки зрения внутреннего строения вещества. Так, состояние системы из двух тел с разной температурой — упорядоченное (по значению температуры мы можем дифференцировать эти тела, средняя кинетическая энергия движения молекул этих тел так же различна). После того как тела привели в контакт, состояние стало неупорядоченным в том смысле, что значение

температуры не позволяет различить эти два тела. Система перешла из упорядоченного состояния в беспорядочное. Беспорядочное состояние характеризуется выравниванием температуры и средней кинетической энергии молекул тел. Это состояние является равновесным. Обратный переход из беспорядочного состояния в упорядоченное сам по себе невозможен.

Вода и медный купорос в сосуде в начальный момент времени находились в упорядоченном состоянии: в нижней части сосуда размещались молекулы медного купороса, в верхней — воды. С течением времени молекулы перемешались и порядок нарушился. Произошло выравнивание плотностей жидкости, т.е. система «медный купорос — вода» также перешла из упорядоченного состояния в неупорядоченное. Обратный переход невозможен сам по себе.

Система всегда стремится перейти из упорядоченного состояния в неупорядоченное, а самопроизвольный обратный переход невозможен. При этом неупорядоченное состояние является наиболее вероятным.

Принципы работы тепловых двигателей

1. Основные части теплового двигателя. Устройство, совершающее механическую работу за счёт внутренней энергии топлива, называют тепловым двигателем.

Существуют разные типы тепловых двигателей: паровая турбина, двигатель внутреннего сгорания, реактивный двигатель и др. Несмотря на различие конструкций двигателей и некоторые особенности их работы, принципы их действия одинаковы.

Все тепловые двигатели, независимо от их особенно-

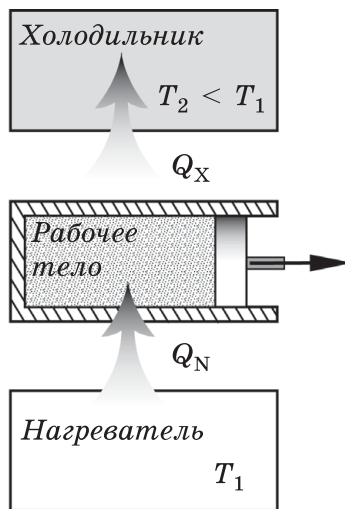


Рис. 93

стей, имеют три части: **нагреватель, рабочее тело, холодильник**.

Рабочим телом двигателя называется система, за счёт внутренней энергии которой совершается механическая работа (рис. 93).

Механическая работа совершается при сжатии и расширении рабочего тела. Чем больше сжатие или расширение, тем большая работа совершается. Газы расширяются и сжимаются легче, чем жидкости и тем более твёрдые тела, поэтому в качестве рабочего тела чаще всего используют газ или пар. Так, в паровой турбине рабочим телом является пар, в двигателе внутреннего сгорания — газ, состоящий из смеси паров бензина и воздуха.

Поскольку работа совершается за счёт внутренней энергии рабочего тела, которая тем больше, чем выше его температура, то в состав теплового двигателя входит **нагреватель**, который нагревает рабочее тело до некоторой температуры T_1 .

Нагреватель может быть самостоятельным устройством, как в случае паровой турбины. Рабочее тело — пар нагревается в паровом котле, при этом энергия топлива превращается в энергию пара. В двигателе внутреннего сгорания нагревание рабочего тела происходит непосредственно в цилиндре при сгорании горючей смеси.

2. Круговой процесс. Рабочее тело, нагретое в нагревателе до температуры T_1 , расширяясь совершает работу. Так, пар, попадая на лопасти турбины, расширяется и приводит турбину во вращение. Горючая смесь в двигателе внутреннего сгорания, достигая высокой температуры, оказывает большое давление на поршень, расширяется и совершает работу. На рисунке 93 работа, которую совершает рабочее тело при расширении, численно равна площади фигуры под графиком $ABCDE$.

В соответствии с первым законом термодинамики невозможно совершить неограниченную работу за счёт первоначально полученного запаса внутренней энергии. Поэтому отработанный пар должен вернуться в исходное состояние и снова нагреться. Таким образом, для того

чтобы двигатель работал непрерывно, он должен каждый раз возвращаться в исходное состояние, т.е. совершать **круговой процесс** или **цикл**. Такой двигатель называют **циклическим**.

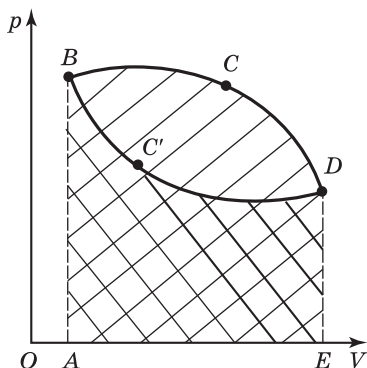


Рис. 94

3. Холодильник. Чтобы вернуть рабочее тело в исходное состояние, его необходимо сжать. Если сжатие производить при тех же значениях давления, что и расширение, то работа сжатия будет равна работе расширения, а полная работа окажется равной нулю. Чтобы получить полную работу, отличную от нуля, нужно производить сжатие при меньших значениях давления, чем расширение. На рисунке 94 работа сжатия соответствует площади фигуры под кривой $DC'B$. Тогда полная работа, равная разности между работой расширения и работой сжатия, соответствует площади фигуры, ограниченной кривой $BCDC'B$.

Для того чтобы осуществить сжатие рабочего тела при меньших значениях давления, чем при расширении, этот процесс следует осуществлять при более низкой температуре, чем расширение. Поэтому рабочее тело необходимо охладить. Для этого его приводят в контакт с телом, температура которого $T_2 < T_1$. Такое тело называют **холодильником**. Для паровой турбины холодильником является атмосфера или специальное устройство для охлаждения отработанного пара; для двигателя внутреннего сгорания — атмосфера.

Следовательно, только часть количества теплоты Q_1 , полученной от нагревателя, превращается в полезную механическую работу A , а другая часть количества теплоты Q_2 передаётся холодильнику.

Таким образом, для обеспечения циклической работы теплового двигателя необходимы нагреватель с температурой T_1 , холодильник с температурой T_2 и рабочее тело. Рабочее тело получает от нагревателя количество теплоты Q_1 и отдаёт холодильнику количество теплоты Q_2 . Разность $Q_2 - Q_1$ равна полезной работе:

$$A = Q_1 - |Q_2|.$$

Итак, в циклически работающей тепловой машине невозможно преобразовать в механическую работу всё количество теплоты, полученное от нагревателя.

4. КПД теплового двигателя. Коэффициентом полезного действия (КПД или η) называют отношение полезной работы A к количеству теплоты, полученной рабочим телом от нагревателя Q_1 :

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}.$$

Так как $\frac{|Q_2|}{Q_1}$ меньше единицы, то коэффициент полезного действия теплового двигателя никогда не может быть равным единице (КПД < 1).

5. Идеальный тепловой двигатель. Французский учёный С. Карно, решая проблему повышения эффективности тепловых двигателей, предложил модель идеальной тепловой машины. Рабочим телом в этой машине служит идеальный газ. Наиболее экономичными процессами являются адиабатный и изотермический процессы. В этих процессах вся полученная рабочим телом энергия превращается в работу. В отличие от них, при изохорном процессе работа не совершается, при изобарном на совершение работы идёт только часть полученного количества теплоты, другая часть расходуется на изменение внутренней энергии.

На рисунке 95 приведён график зависимости давления от объёма в идеальном тепловом двигателе Карно, называемый *циклом Карно*.

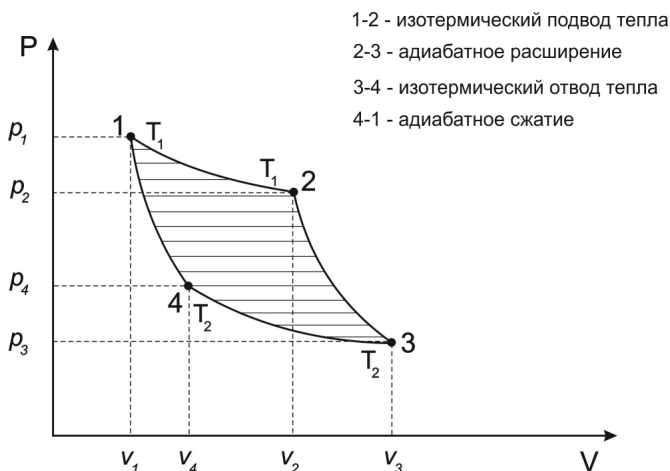


Рис. 95

Участок графика 1–2 соответствует изотермическому расширению рабочего тела. При этом оно получает от нагревателя, температура которого T_1 , количество теплоты Q_1 . Участок графика 2–3 соответствует адиабатному расширению рабочего тела, при этом оно охлаждается до температуры T_2 , равной температуре холодильника. Затем рабочее тело изотермически сжимается (участок графика 3–4) при температуре T_2 . При этом холодильнику передаётся количество теплоты Q_2 . И, наконец, рабочее тело адиабатически сжимается, и температура его при этом повышается до температуры нагревателя T_1 (участок графика 4–1).

6. КПД идеального теплового двигателя. Поскольку тепловой двигатель Карно самый экономичный, он имеет и самый высокий коэффициент полезного действия при данных температурах нагревателя и холодильника. Он равен:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Из этой формулы следует, что КПД идеального теплового двигателя всегда меньше единицы, даже если устранены все потери энергии. Это связано с тем, что некоторое количество теплоты всегда передаётся холодильнику.

Карно доказал, что КПД любого реального теплового двигателя не может быть больше КПД идеального теплового двигателя, имеющего те же значения температуры нагревателя и холодильника.

При совершенствовании тепловых двигателей решается задача приближения их КПД не к 100%, а к КПД идеального двигателя Карно, работающего при тех же температурах нагревателя и холодильника. А он тем больше, чем больше температура нагревателя и меньше температура холодильника. Поэтому для повышения КПД теплового двигателя стремятся повысить температуру нагревателя и понизить температуру холодильника, что является достаточно сложной инженерной проблемой. Она заключается в том, что повышение температуры нагревателя ограничивается свойствами применяемых в конструкции двигателей сплавов. В частности, они должны быть теплостойкими и жаропрочными. Кроме того, они должны обладать высокой механической прочностью и выдерживать высокие давления, не разрушаясь и сохраняя свои упругие свойства.

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ 18

1. При повышении КПД теплового двигателя стремятся его приблизить к
 - 1) 100%
 - 2) к КПД идеального цикла Карно
2. Тепловая машина с КПД 40% за цикл работы получает от нагревателя количество теплоты, равное 300 Дж. Какую работу машина совершает за цикл?
 - 1) 300 Дж
 - 2) 180 Дж
 - 3) 120 Дж
 - 4) 75 Дж

3. Температура холодильника идеальной тепловой машины Карно равна 300 К. Какой должна быть температура её нагревателя, чтобы КПД машины был равен 40%?

1) 1200 К

3) 600 К

2) 800 К

4) 500 К

4. Тепловая машина за цикл получает от нагревателя количество теплоты 50 Дж и совершает работу 100 Дж. Чему равен КПД тепловой машины?

1) 100%

2) 20%

3) 50%

4) такая машина невозможна

5. Температура нагревателя идеальной тепловой машины 425 К, а температура холодильника 300 К. Двигатель получил от нагревателя количество теплоты 40 кДж. Какую работу совершило рабочее тело?

1) 16,7 кДж

3) 12 кДж

2) 3 кДж

4) 97 кДж

6. Тепловая машина имеет КПД 25%. Средняя мощность передачи энергии холодильнику в ходе её работы составляет 3 кВт. Какое количество теплоты получает рабочее тело машины от нагревателя за 10 с?

1) 0,4 Дж

3) 400 Дж

2) 40 Дж

4) 40 кДж

7. Температуру холодильника тепловой машины, работающей по циклу Карно, увеличили, оставив температуру нагревателя прежней. Количество теплоты, полученное газом от нагревателя за цикл, не изменилось. Как изменились при этом КПД тепловой машины, количество теплоты, отданное газом за цикл холодильнику, и работа газа за цикл?

Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличилась
- 2) уменьшилась
- 3) не изменилась

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

КПД тепловой машины	Количество теплоты, отданное газом холодильнику за цикл работы	Работа газа за цикл

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Явление электризации.

Электрический заряд и его свойства

Электризация тел — процесс получения электрически заряженных макроскопических тел из электронейтральных в результате перераспределения электронов.

Возможны четыре способа электризации: трением; соприкосновением; через влияние; облучением.

Электрический заряд — физическая величина, определяющая способность тел к электромагнитным взаимодействиям.

При электризации нарушается баланс заряженных частиц. Это происходит либо при удалении электронов из электронных оболочек атомов, либо при присоединении дополнительных электронов на внешнюю электронную оболочку. В первом случае тело заряжается положительно, а во втором — отрицательно.

Экспериментально доказано, что одноимённо заряженные тела отталкиваются, а разноимённо заряженные притягиваются (рис. 96 а, б).

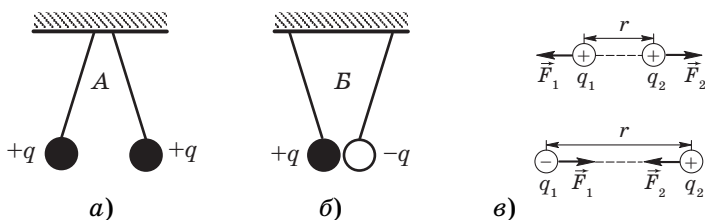


Рис. 96

Опыты по электризации тел показали, что **алгебраическая сумма зарядов электрически изолированной системы постоянна** (закон сохранения электрического заряда).

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const}$$

Суммарный заряд макроскопического тела пропорционален величине минимального заряда e . Электрический заряд дискретен.

Заряд любого заряженного тела $q = \pm ne$, где n — целое число элементарных зарядов в данном теле, e — минимальный неделимый заряд, которым обладают все заряженные элементарные частицы, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Закон Кулона

Шарль Кулон в опыте с крутильными весами установил зависимость силы взаимодействия между заряженными телами от величины зарядов и расстояния между ними.

Сила взаимодействия между двумя неподвижными точечными зарядами, находящимися в вакууме, прямо пропорциональна произведению модулей зарядов, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и направлена по прямой, соединяющей заряды:

$$F_{\text{з}} = k \frac{|q_1| |q_2|}{r^2},$$

где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора системы единиц.

В СИ $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$. $k = 1/4\pi\epsilon_0$.

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2 / \text{Н} \cdot \text{м}^2$ — электрическая постоянная.

Свойства сил Кулона:

1. Сила Кулона — центральная сила (рис. 96, в).

2. Сила Кулона подчиняется третьему закону Ньютона:

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

Электростатическое поле

1. Силовая характеристика электростатического поля. Неподвижный в данной инерциальной системе отсчёта электрический заряд является источником электростатического поля. Поле как форма существования материи может быть зарегистрировано только по его силовому действию. Силовой характеристикой электростатического поля является **вектор напряжённости**.

Напряжённость — векторная физическая величина, численно равная отношению силы, действующей на пробный положительный заряд, помещённый в данную точку поля, к величине этого заряда.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}.$$

Единицы в СИ $[E] = 1 \text{ Н/Кл} = 1 \text{ В/м}$.

Вектор напряжённости подчиняется *принципу суперпозиции*.

Если поле создаётся не одним, а несколькими электрическими зарядами, то напряжённость результирующего поля в данной точке равна векторной сумме напряжённостей полей, созданных каждым зарядом в отдельности (рис. 97).

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

Электростатическое поле может быть изображено с помощью *силовых линий*.

Силовые линии напряжённости — линии, касательные к которым совпадают с направлением вектора напряжённости электростатического поля в данной точке.

Основные свойства силовых линий электростатического поля:

1. Силовые линии не замкнуты (начинаются на положительных зарядах, заканчиваются на отрицательных).
2. Силовые линии никогда не пересекаются.

Существует два способа расчёта напряжённости электрического поля: принцип суперпозиции и теорема Гаусса.

2. Поле точечного заряда (рис. 98 а, б).

$E = k \frac{|q|}{r^2}$, где r — расстояние от заряда q до исследуемой точки.

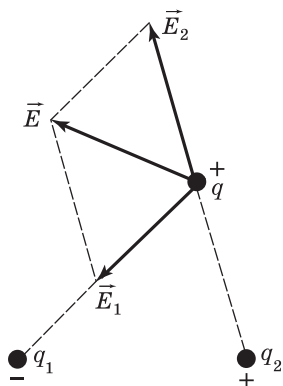


Рис. 97

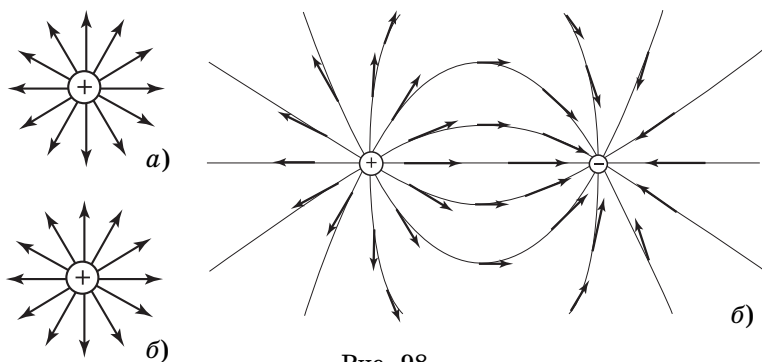


Рис. 98

3. Однородное поле. *Однородным* называется поле, напряжённость которого является неизменной величиной $E = \text{const}$. Силовые линии такого поля параллельны друг другу. Однородное поле создаётся бесконечной равномерно заряженной плоскостью (рис. 99).

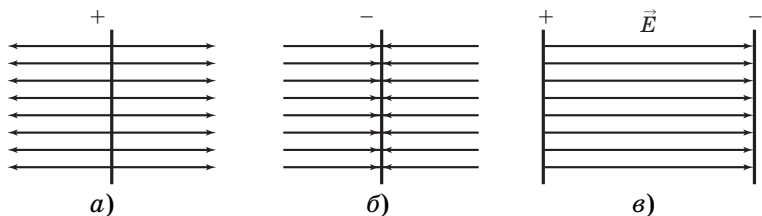


Рис. 99

4. Энергетическая характеристика электростатического поля.

Электростатическое поле *потенциально*, поэтому работа в электростатическом поле равна разности потенциальной энергии заряженного тела в его начальном и конечном положениях:

$$A = W_1 - W_2$$

Начало отсчёта потенциальной энергии электростатического поля выбирается произвольно.

Потенциал электростатического поля в данной точке — физическая величина, равная отношению потенци-

альной энергии, которой обладает пробный положительный заряд, помещённый в данную точку поля, к величине этого заряда:

$$\varphi = \frac{W}{q_0}$$

Единица в СИ $[\varphi] = 1 \text{ Дж/Кл} = 1 \text{ В}$.

Потенциал подчиняется **принципу суперпозиции**:

— если электростатическое поле создаётся не одним, а несколькими электрическими зарядами, то потенциал результирующего поля равен алгебраической сумме потенциалов полей, созданных каждым зарядом в отдельности:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots + \varphi_n$$

Работа, совершаемая при перемещении электрического заряда из точки 1 в точку 2, определяется **разностью потенциалов** $U = \varphi_1 - \varphi_2$ между этими точками:

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU$$

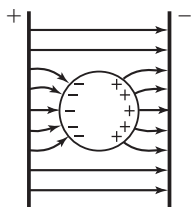


Рис. 100

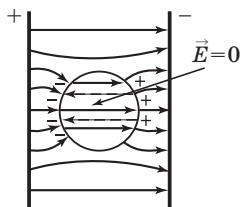


Рис. 101

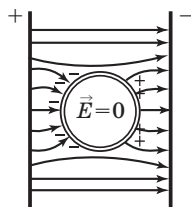


Рис. 102

В однородном электрическом поле работа по перемещению электрического заряда q вдоль силовой линии \vec{E} на расстояние d с одной стороны равна $A = qEd$, а с другой стороны $A = qU$, следовательно, **в однородном электростатическом поле разность потенциалов**:

$$U = Ed$$

5. Проводники в электростатическом поле. В металлических проводниках происходит обобществление валентных электронов, которые свободно перемещаются по всему объёму проводника, — **свободные заряды**.

При помещении проводника во внешнее электрическое поле на его поверхности происходит перераспределение зарядов — *электростатическая индукция* (рис. 100).

В результате этого перераспределения *напряжённость поля внутри проводника становится равной нулю* (рис. 101, 102).

Заряды располагаются на внешней поверхности проводника (рис. 102).

Металлическая поверхность препятствует проникновению внутрь её электростатического поля, обеспечивая *электростатическое экранирование*.

6. Диэлектрики в электростатическом поле. Диэлектрики — вещества, содержащие только *связанные заряды*, т.е. разноимённые заряды, которые входят в состав атомов или молекул и не могут перемещаться под действием поля независимо друг от друга.

Диэлектрики в соответствии со структурой молекул, входящих в их состав, делят на *полярные* и *неполярные*.

В полярных диэлектриках молекулы подобны *диполям*. В отсутствии внешнего электростатического поля диполи ориентированы произвольно, поэтому индуцированное поле в диэлектрике отсутствует (рис. 103).

Во внешнем поле диполи ориентируются по силовым линиям так, что поле связанных зарядов направлено против внешнего поля и ослабляет его (рис. 104).

В молекулах неполярных диэлектриков центры положительного и отрицательного зарядов совпадают (рис. 105).

Во внешнем электростатическом поле происходит деформация молекул, центры положительного и отрицательного зарядов

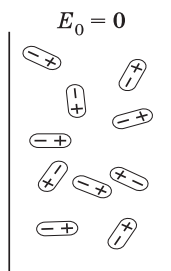


Рис. 103

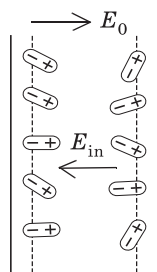


Рис. 104

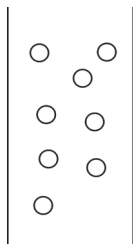


Рис. 105

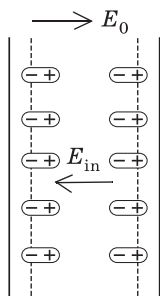


Рис. 106

смещаются друг относительно друга. Молекулы превращаются в диполи и выстраиваются вдоль силовых линий внешнего поля так, что поле связанных зарядов направлено против внешнего поля и ослабляет его (рис. 106).

Как в полярных, так и в неполярных диэлектриках электростатическое поле ослабляется в ε раз: $E_{\text{в}} = E_0 - E_{\text{св}}$

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E_{\text{в}}}$$

где E_0 — напряжённость поля в вакууме, $E_{\text{в}}$ — напряжённость поля в диэлектрике, ε — *относительная диэлектрическая проницаемость среды*.

Конденсаторы

1. Электрическая ёмкость уединённого проводника — физическая величина, равная отношению заряда проводника q к потенциалу φ :

$$C = \frac{q}{\varphi}$$

Единицы в СИ $[C] = 1 \text{ Кл/В} = 1 \text{ Ф (Фарад)}$.

Система проводников, разделённая диэлектриком, с равными по величине и противоположными по знаку зарядами называется **конденсатором**.

Электрическая ёмкость конденсатора — физическая величина, равная отношению заряда q одного из проводников к разности потенциалов U между этими проводниками:

$$C = \frac{q}{U}$$

Электрическая ёмкость плоского конденсатора (система двух плоскопараллельных пластин площадью S , находящихся на расстоянии d друг от друга, пространство между которыми заполнено диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ε).

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}$$

Существуют различные типы соединения конденсаторов.

1. Последовательное соединение конденсаторов (рис. 107).

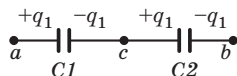


Рис. 107

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}. \text{ Если } C_1 < C_2, \text{ то } C < C_1.$$

2. Параллельное соединение конденсаторов (рис. 108).

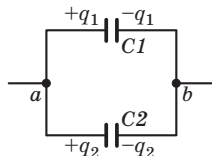


Рис. 108

$$C = C_1 + C_2. \text{ Если } C_1 > C_2, \text{ то } C > C_1.$$

2. Энергия электростатического поля. Энергия электростатического поля, накопленная в конденсаторе, определяется работой, которая была совершена при разделении зарядов, сообщённых пластинам конденсатора.

3. Энергия заряженного конденсатора.

$$W_c = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$$

Единицы в СИ $[W] = 1 \text{ Дж}$.

Объёмная плотность энергии — физическая величина, равная отношению энергии электростатического поля, сосредоточенного в некотором объёме, к величине этого объёма:

$$w = \frac{W}{V}$$

Единицы в СИ $[w] = 1 \text{ Дж/м}^3$.

Объёмная плотность энергии электростатического поля зависит от силовой характеристики поля и свойств среды:

$$w = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2}{2}.$$

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ 19

1. Сила взаимодействия между двумя точечными зарядами равна F . Как изменится сила взаимодействия между зарядами, если каждый заряд увеличить в 4 раза, а расстояние между зарядами не менять?

- 1) увеличится в 4 раза
- 2) уменьшится в 4 раза
- 3) уменьшится в 16 раз
- 4) увеличится в 16 раз

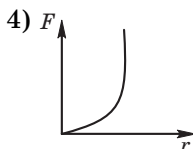
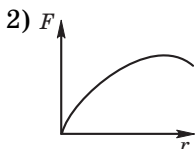
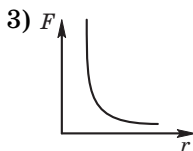
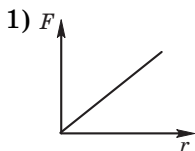
2. Металлический шарик, имеющий отрицательный заряд $-4e$, при освещении потерял шесть электронов. Каким стал заряд шарика?

- 1) $-10 e$
- 2) $+2 e$
- 3) $+6 e$
- 4) $-16 e$

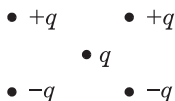
3. Два одинаковых металлических шарика, имеющие заряды 4 мкКл и -6 мкКл соответственно, взаимодействуют с силой 12 мкН . Какой станет сила взаимодействия после того, как шарики приведут в соприкосновение и расположат на прежнем расстоянии?

- 1) 1 мкН
- 2) 24 мкН
- 3) 48 мкН
- 4) $0,5 \text{ мкН}$

4. Какой график соответствует зависимости модуля сил взаимодействия от расстояния между двумя точечными зарядами?



5. Как направлена сила F , действующая на положительный точечный заряд q , помещённый в центр квадрата, в вершинах которого находятся заряды: $-q$, $+q$, $+q$, $-q$.

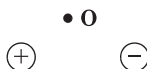


- 1) \uparrow 2) \downarrow 3) \swarrow 4) \rightarrow

6. В однородном, горизонтально направленном, электростатическом поле начинает движение заряженная частица с зарядом 10 мкКл и массой 2 г . Напряжённость электрического поля равна 4 кВ/м . С каким ускорением движется частица?

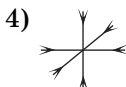
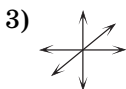
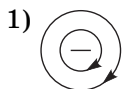
- 1) 10 м/с^2
 2) 20 м/с^2
 3) 5 м/с^2
 4) 25 м/с^2

7. Какое направление в точке O имеет вектор напряжённости электростатического поля E , созданного двумя равными разноименными зарядами?

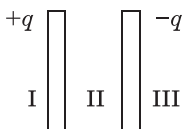


- 1) \uparrow 3) \rightarrow
 2) \downarrow 4) \leftarrow

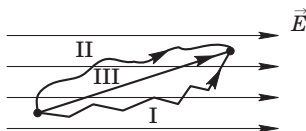
8. На каком рисунке правильно изображена картина линий напряжённости электростатического поля точечного отрицательного заряда?



9. Две очень большие квадратные металлические пластины несут заряды $+q$ и $-q$. В каких областях пространства вне пластин напряжённость электростатического поля, созданного пластинами, равна нулю?



- 1) только в I
 - 2) только в II
 - 3) только в III
 - 4) в I и III
10. Положительный заряд перемещается в однородном электростатическом поле из точки 1 в точку 2 по разным траекториям. При перемещении по какой траектории электростатическое поле совершает наибольшую работу?



- 1) I
 - 2) II
 - 3) III
 - 4) работа одинакова при движении по всем траекториям
11. Электрический заряд на одной пластине конденсатора $+40$ Кл, на другой -40 Кл. Разность потенциалов между пластинами равна 10^5 В. Чему равна электрическая ёмкость конденсатора?

- 1) 80 мкФ
- 2) 4 Ф
- 3) 400 мкФ
- 4) 800 мкФ

- 12.** Плоский конденсатор зарядили и отключили от источника постоянной разности потенциалов. Как изменится электрическая ёмкость конденсатора, напряжённость электростатического поля и энергия заряженного конденсатора при увеличении расстояния между пластинами конденсатора?

Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличивается
- 2) уменьшается
- 3) не изменяется

Ёмкость конденсатора	Напряжённость электрического поля	Энергия конденсатора

- 13.** Плоский конденсатор подключили к источнику разности потенциалов.

Как изменится электрическая ёмкость конденсатора, напряжённость электростатического поля и энергия заряженного конденсатора при введении в конденсатор диэлектрика?

Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличивается
- 2) уменьшается
- 3) не изменяется

Ёмкость конденсатора	Напряжённость электрического поля	Энергия конденсатора

- 14.** Электрически заряженная частица с зарядом $+q$ и массой m влетает со скоростью \vec{v}_0 в однородное электрическое поле \vec{E} , направленное вертикально вниз. Установите соответствие между физическими величинами и формулами, по которым их можно рассчитать.

К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

ФОРМУЛЫ

А) ускорение, с которым движется частица

$$1) \frac{q\vec{E}}{m} + \vec{g}$$

Б) скорость, которую приобретёт частица через время t

$$2) \sqrt{v_0^2 + \left(g + \frac{qE}{m}\right)^2 t^2}$$

$$3) g$$

$$4) v_0 + \left(g + \frac{qE}{m}\right)t$$

Ответ:

А	Б

15. На шёлковой нити подвешен шарик массой 100 г, имеющий заряд 20 мкКл. Какой по величине заряд надо расположить на расстоянии 3 см от шарика, чтобы сила натяжения увеличилась в 2 раза?
16. Какой угол с вертикалью составляет нить, на которой висит заряженный шарик массой 0,8 г, помещённый в однородное электростатическое поле напряжённостью 4 МВ/м, вектор которой направлен горизонтально? Заряд шарика равен 4 нКл.
17. Электрон влетает в однородное электростатическое поле со скоростью 2000 м/с. Напряжённость электростатического поля равна 1,82 В/м. Какое расстояние пройдёт электрон до остановки?
18. Конденсатор ёмкостью 4 мкФ, заряженный до разности потенциалов 100 В, соединили параллельно с конденсатором ёмкостью 2 мкФ. Чему равна разность потенциалов?

ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Постоянный электрический ток

1. Основные определения и понятия.

Электрическим током проводимости называется упорядоченное движение свободных заряженных частиц.

Условия существования электрического тока проводимости:

- наличие свободных электрических зарядов (электроны, положительные и отрицательные ионы);
- существование стационарного электрического поля в проводнике (напряжения на концах проводника);
- замкнутость электрической цепи.

2. Сила тока — физическая величина, численно равная отношению заряда Δq , прошедшего через поперечное сечение проводника за некоторый промежуток времени Δt ,

к этому промежутку времени: $I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t}$, $I = \frac{dq}{dt}$.

Единица в СИ $[I] = 1 \text{ А (Ампер)}$ ($1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot \text{с}$). Напряжение показывает работу, которую совершает электрическое поле при перемещении единичного положительного заряда из одной точки в другую. **Напряжение** — физическая величина, численно равная отношению работы стационарного электрического поля по перемещению пробного заряда q_0 к величине этого заряда: $U = \frac{A_{\text{стац}}}{q_0}$.

Единица в СИ $[U] = 1 \text{ Дж/Кл} = 1 \text{ В (Вольт)}$.

Источник тока — устройство, в котором за счёт работы *сторонних (некулоновских) сил* происходит разделение электрических зарядов.

3. Электродвижущая сила (ЭДС) — энергетическая характеристика источника тока.

ЭДС — физическая величина, численно равная отношению работы сторонних сил по перемещению положительного электрического заряда внутри источника тока от

его отрицательного полюса к положительному, к значению этого заряда: $\varepsilon = \frac{A_{\text{стор}}}{q_0}$.

Единица в СИ $[\varepsilon] = 1 \text{ Дж/Кл} = 1 \text{ В (Вольт)}$.

Сопротивление металлического проводника вычисляется по формуле:

$$R = \frac{\rho l}{S}, \text{ где } \rho \text{ — удельное сопротивление материала про-}$$

водника; l — длина проводника; S — площадь поперечно-го сечения проводника.

Единица в СИ $[R] = 1 \text{ В/А} = 1 \text{ Ом}$.

Законы постоянного тока

1. Закон Ома для однородного участка цепи. Однородным называется участок цепи, не содержащий источник тока (рис. 109).

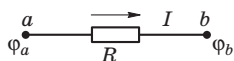


Рис. 109

Сила тока прямо пропорциональна напряжению, приложенному к данному участку цепи, и обратно пропорциональна величине его сопротивления: $I = \frac{U}{R}$.

2. Закон Ома для полной цепи.

Сила тока в цепи прямо пропорциональна ЭДС источника тока и обратно пропорциональна сумме сопротивлений внешнего и внутреннего участков цепи:

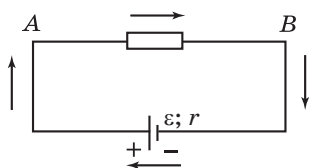


Рис. 110

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

Ток короткого замыкания (рис. 111, а): $R \ll r$; $I_{\text{кз}} = \frac{\varepsilon}{r}$.

Напряжение на зажимах источника тока (рис. 111, б): $U = \varepsilon - Ir$.

При разомкнутой цепи напряжение на зажимах источника тока (рис. 111, в): $U = \varepsilon$.

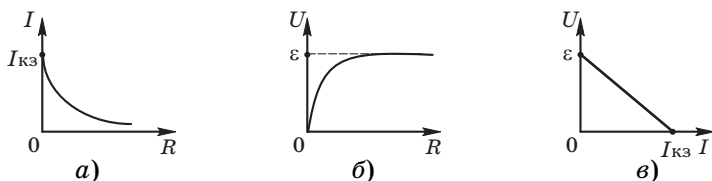


Рис. 111

3. Работа и мощность электрического тока. Закон Джоуля — Ленца. Работа стационарного электрического поля, совершаемая при протекании тока через проводник, прямо пропорциональна величине силы тока, напряжению, приложенному к проводнику, и времени протекания тока:

$$A = IU\Delta t = I^2 R\Delta t = \frac{U^2 \Delta t}{R}.$$

Единицы в СИ $[A] = 1 \text{ Дж} = 1 \text{ Нм}$.

Мощность численно равна работе, совершённой в единицу времени:

$$P = \frac{A}{t} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

Единицы в СИ $[P] = 1 \text{ Дж/с} = 1 \text{ Вт (Ватт)}$.

При протекании электрического тока через металлический проводник вследствие столкновения электронов с положительными ионами, расположенными в узлах кристаллической решётки, происходит его нагревание. Кинетическая энергия электронов превращается во внутреннюю энергию проводника. Изменение внутренней энергии проводника равно количеству теплоты, выделяющемуся в проводнике при протекании тока в нём.

4. Закон Джоуля — Ленца.

Количество теплоты, выделяющееся при прохождении электрического тока по проводнику, прямо пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению проводника и времени прохождения по нему тока:

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

Единицы в СИ $[Q] = 1 \text{ Дж}$.

Используя закон Ома для участка цепи, получим:

$$Q = IU\Delta t \text{ или } Q = \frac{U^2\Delta t}{R}.$$

5. Соединение проводников.

1. Последовательное соединение проводников (рис. 112).

$I = I_1 = I_2$; $U = U_1 + U_2$; $R_0 = R_1 + R_2$. Если $R_1 > R_2$, то $R_0 > R_1$.

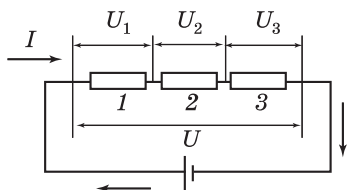


Рис. 112

2. Параллельное соединение проводников (рис. 113).

$I = I_1 + I_2$; $U = U_1 = U_2$; $\frac{1}{R_0} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$. Если $R_1 < R_2$, то $R_0 < R_1$.

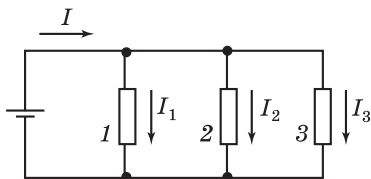
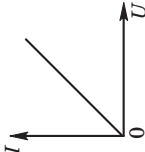
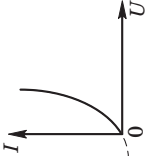
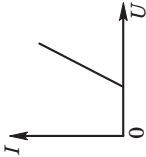
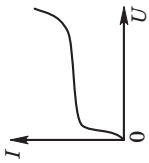
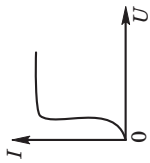


Рис. 113

Токи в различных средах

Название среды	Носители электрического тока	Механизм образования свободных электрических зарядов	Вольт-амперная характеристика	Зависимость сопротивления от температуры	Примечание
Металл	Электроны	Обобществление валентных электронов — электронный газ		С ростом температуры число соударений электронов с положительными ионами кристаллической решётки увеличивается, сопротивление растёт. $R = R_0(1 + \alpha t)$ R_0 — сопротивление проводника при 0 °С, α — температурный коэффициент сопротивления	Сверхпроводимость
Полупроводник	Электроны и «дырки»	При нагревании и облучении электроны приобретают достаточную энергию, чтобы разорвать связи в атоме		С ростом температуры увеличивается число свободных электронов и «дырок». Сопротивление полупроводника уменьшается	Собственная проводимость невелика. Для её увеличения в полупроводник вносят примеси. Донорные примеси увеличивают число

Название среды	Носители электрического тока	Механизм образования свободных электрических зарядов	Вольт-амперная характеристика	Зависимость сопротивления от температуры	Примечание
		При этом образуются свободный электрон и электронная вакансия — «дырка» (собственная проводимость)			свободных электронов. Полупроводник n -типа Акцепторные примеси увеличивают число «дырок». Полупроводник p -типа.
Растворы и расплавы электролитов	Положительные и отрицательные ионы	При растворении в результате электролитической диссоциации молекулы электролита распадутся на положительные и отрицательные ионы		С ростом температуры степень диссоциации электролита увеличивается, т.е. увеличивается число положительных и отрицательных ионов в растворе. Сопровождение электролита уменьшается	Закон Фарадея (закон электролиза) Масса вещества, выделившегося на электроде за некоторое время, прямо пропорциональна заряду, прошедшему через раствор электролита $m = kq$, если ток постоянный $q = It$ $m = kIt$ k — электрохимический эквивалент вещества Единица в СИ $[k] = 1 \text{ кг/Кл}$

Газ	Электронные, положительные и отрицательные ионы	При нагревании и облучении возможно появление свободных электронов и положительных ионов. Нейтральный атом может присоединить электрон — отрицательный ион		При нагревании увеличивается число свободных заряженных частиц и сопротивление газового промежутка уменьшается	Несамостоятельный разряд возможен только в присутствии ионизатора. Самостоятельный разряд начинается при достижении определенного значения напряжения. Электроны приобретают в электрическом поле достаточную энергию, чтобы при соударении ионизировать нейтральные атомы. Число заряженных частиц резко возрастает, разряд будет существовать без ионизатора
Вакуум	Электроны	При нагревании с поверхности металла испускаются электроны — термоэлектронная эмиссия			

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ 20¹

1. Как изменится сопротивление проводника, если его разрезать на две равные части и соединить эти части параллельно?

- 1) Не изменится
2) Уменьшится в 2 раза
3) Уменьшится в 4 раза
4) Увеличится в 2 раза

2. Два резистора, имеющие сопротивления R и $2R$ соответственно, включены последовательно в цепь постоянного тока. Сравните мощности электрического тока на этих резисторах.

- $$\begin{array}{ll} 1) P_1 = P_2 & 3) P_1 = 2P_2 \\ 2) P_1 = \frac{1}{4}P_2 & 4) P_2 = 2P_1 \end{array}$$

3. Два резистора, имеющие сопротивления R и $2R$ соответственно, включены параллельно в цепь постоянного тока. Сравните мощности электрического тока на этих резисторах.

- $$\begin{array}{ll} 1) P_1 = P_2 & 3) P_1 = 2P_2 \\ 2) P_1 = \frac{1}{4}P_2 & 4) P_2 = 2P_1 \end{array}$$

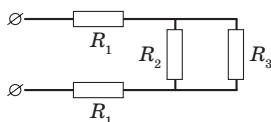
4. Две лампы, рассчитанные на 220 В и имеющие номинальные мощности $P_1 = 40$ Вт, $P_2 = 100$ Вт, включены в сеть последовательно. Сравните количество теплоты, выделенное в лампах.

- 1) $Q_1 = Q_2$
- 2) $Q_1 > Q_2$
- 3) $Q_2 > Q_1$
- 4) Для получения ответа не хватает данных

5. Определите общее сопротивление электрической цепи, если

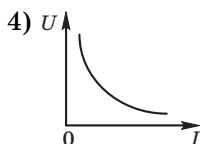
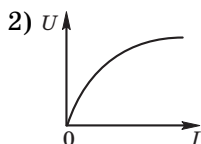
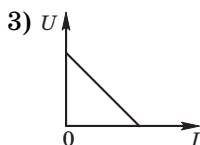
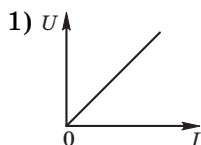
$$R_2 = \frac{3}{2} R_1 \quad R_3 = 3 R_1 \quad R_1 = 2 \text{ Ом.}$$

¹ Законы постоянного тока.

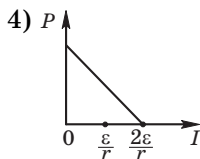
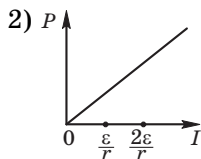
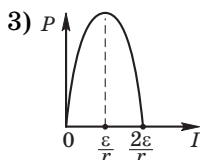
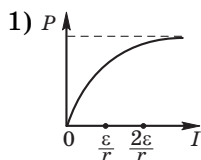


- 1) 4 Ом
- 2) 6 Ом
- 3) 13 Ом
- 4) 20 Ом

6. Какой из приведённых на рисунке графиков представляет зависимость напряжения U от силы тока I во внешней цепи?



7. Какой из приведённых на рисунке графиков представляет зависимость мощности P электрического тока во внешней нагрузке, подключённой к источнику тока от величины силы тока I в этой нагрузке?



8. Два резистора включены в электрическую цепь параллельно. Значения силы тока в резисторах $I_1 = 1,2$ А, $I_2 = 0,4$ А. Для сопротивлений резисторов справедливо соотношение

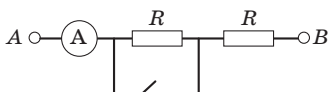
1) $R_1 = \frac{1}{3}R_2$

3) $R_1 = 6R_2$

2) $R_1 = 3R_2$

4) $R_1 = \frac{1}{2}R_2$

9. Как изменится сила тока, протекающего через амперметр при замыкании ключа, если $U_{AB} = \text{const}$. Сопротивлением амперметра пренебречь.



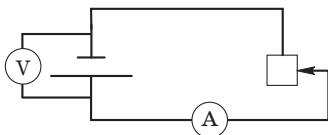
1) увеличится в 2 раза

2) уменьшится в 2 раза

3) не изменится

4) для ответа недостаточно данных

10. В электрической цепи, изображённой на рисунке, ползунок реостата перемещают вверх. Как изменяются при этом показания вольтметра и амперметра? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:



1) увеличивается

3) не изменяется

2) уменьшается

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Показания вольтметра	Показания амперметра

11. В электрической цепи, состоящей из источника тока и резистора, источник тока заменяют другим, с меньшим значением ЭДС, но с тем же значением внутреннего сопротивления. Как изменяются при этом следующие физические величины: напряжение на резисторе, количество теплоты, выделившееся на резисторе в единицу времени.

Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличивается 3) не изменяется
2) уменьшается

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

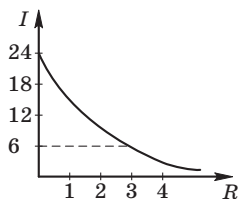
Напряжение на резисторе	Количество теплоты, выделившееся на резисторе

12. Сколько длится нагревание в электрическом чайнике мощностью 1 кВт 4 л воды от 22°C до температуры кипения? КПД чайника равен 85%?

13. Троллейбус массой 12 т движется равномерно со скоростью 54 км/ч. Определите силу тока в обмотке двигателя, если напряжение равно 600 В и КПД 80%. Коэффициент сопротивления движению равен 0,02.

14. Рассчитайте силу тока, протекающего через идеальный амперметр в схеме, представленной на рисунке.

15. К источнику с ЭДС = 24 В подключается реостат. На рисунке показан график изменения силы тока в реостате в зависимости от его сопротивления. Чему равно внутреннее сопротивление источника тока?

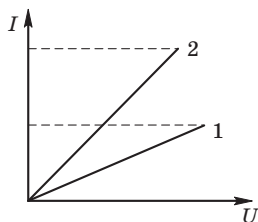


ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ 21¹

1. Какие действия электрического тока сопровождают прохождение тока через электролит?

- 1) только магнитные
- 2) только тепловые
- 3) тепловые и магнитные
- 4) тепловые и химические

2. На рисунке изображены две вольт-амперные характеристики для терморезисторов. В каком случае сопротивление терморезистора меньше? Какой график относится к нагретому терморезистору?

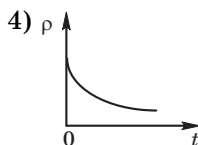
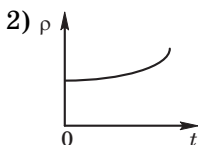
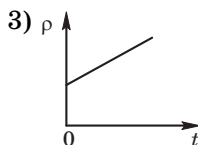
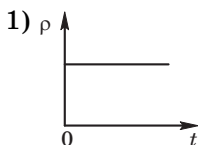


- | | |
|----------------|-----------------|
| 1) в первом; 1 | 3) во втором; 1 |
| 2) в первом; 2 | 4) во втором; 2 |

3. Перенос химического вещества происходит при прохождении электрического тока через

- 1) твёрдые металлы и полупроводники
- 2) полупроводники и электролиты
- 3) газы и твёрдые металлы
- 4) электролиты и газы

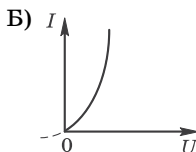
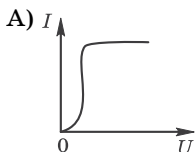
4. Какой из графиков, приведённых на рисунке, соответствует зависимости удельного сопротивления металлического проводника от температуры?



¹ Токи в различных средах.

5. Как изменится масса вещества, выделившегося на катоде при прохождении электрического тока через раствор электролита, при увеличении силы тока в три раза?
- 1) не изменится
 - 2) увеличится в три раза
 - 3) уменьшится в 3 раза
 - 4) увеличится в 6 раз
6. Через раствор CuSO_4 и CuCl_2 пропустили одинаковый заряд. Сравните массы меди, выделившиеся на катоде в обоих случаях.
- 1) $m_1 = m_2$
 - 2) $m_1 = 2m_2$
 - 3) $m_1 = \frac{1}{2}m_2$
 - 4) Среди ответов 1–3 нет правильного
7. В четырёхвалентный кремний в первый раз добавили трёхвалентный индий, а во второй раз — пятивалентный фосфор. Каким типом проводимости в основном будет обладать полупроводник в каждом случае?
- 1) в первом — дырочной, во втором — электронной
 - 2) в первом — электронной, во втором — дырочной
 - 3) в обоих случаях — электронной
 - 4) в обоих случаях — дырочной
8. Основным свойством p – n перехода является:
- 1) увеличение сопротивление при нагревании
 - 2) увеличение сопротивления при освещении
 - 3) односторонняя проводимость
 - 4) среди ответов 1–3 нет правильного
9. Установите соответствие между графиками и физическими величинами, которым соответствуют эти зависимости. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

ГРАФИКИ



ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

- 1) вольт-амперная характеристика полупроводникового диода
- 2) вольт-амперная характеристика вакуумного диода
- 3) вольт-амперная характеристика газового разряда
- 4) зависимость силы тока в проводнике от напряжения на его концах

Ответ:

А	Б

10. Для ионизации атома водорода надо совершить работу $2,17 \cdot 10^{-18}$ Дж. При каком минимальном напряжении можно получить самостоятельный разряд в разреженном водороде?
11. Как изменится сопротивление алюминиевого проводника при изменении температуры от 0°C до -50°C . Температурный коэффициент сопротивления $4,2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.
12. При электролизе, в котором участвуют ионы двухвалентного металла, за 10 мин масса катода увеличилась на 400 мг. Найдите молярную массу осадившегося на катоде металла, если сила тока равна 2 А?

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Магнитное взаимодействие

1. Силовая характеристика магнитного поля. Стационарное магнитное поле создаётся движущимися электрическими зарядами.

Силовой характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции **B**.

Модуль вектора магнитной индукции — величина, равная отношению силы, действующей на проводник с током, помещённый в магнитное поле перпендикулярно вектору магнитной индукции, к силе тока в проводнике и к длине активной части проводника, находящейся в магнитном поле:

$$B = \frac{F}{IL}.$$

Единица в СИ $[B] = 1 \text{ Н/А} \cdot \text{м} = 1 \text{ Тл (Тесла)}$.

Направление вектора магнитной индукции можно определить с помощью **правила буравчика**:

— если вращать ручку буравчика по направлению тока в рамке (витке), то его поступательное движение покажет направление вектора магнитной индукции (рис. 114).

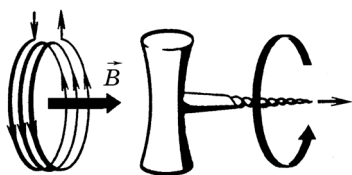


Рис. 114

Направление вектора магнитной индукции прямого проводника с током тоже определяется **по правилу буравчика**:

— если направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то вращение ручки буравчика совпадает с направлением вектора магнитной индукции.

Магнитное поле, так же как и электростатическое поле, можно изобразить с помощью силовых линий — **линий магнитной индукции**.

Линии магнитной индукции — это линии, касательные к которым совпадают по на-

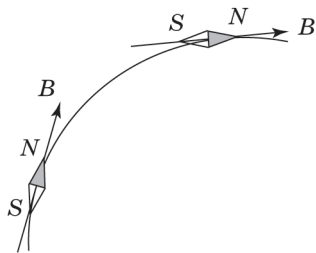


Рис. 115

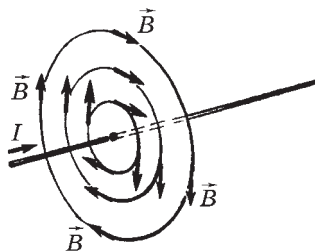


Рис. 116

правлению с вектором магнитной индукции в данной точке поля (рис. 115, 116).

Линии магнитной индукции замкнуты. Это означает, что в природе отсутствуют магнитные заряды. Такое поле называют **вихревым**.

2. Магнитная проницаемость среды. Магнитная проницаемость среды — физическая величина, показывающая во сколько раз отличается магнитная индукция в однородной среде от магнитной индукции в вакууме:

$$\mu = \frac{B}{B_0}.$$

$\mu < 1$ — диамагнитные материалы (диамагнетики);

$\mu > 1$ — парамагнитные материалы (парамагнетики);

$\mu \gg 1$ — ферромагнитные материалы (ферромагнетики).

3. Действие поля на движущиеся заряды.

Сила Ампера. На проводник с током, помещённый в магнитное поле, действует сила, зависящая от силы тока, длины проводника, величины магнитной индукции и угла между направлением тока в проводнике и вектором магнитной индукции. Эту силу называют **силой Ампера**:

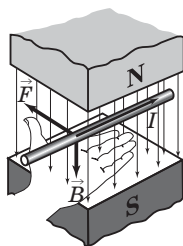


Рис. 117

$$F_A = ILB \sin \alpha$$

Направление силы Ампера определяется **правилом левой руки**:

— если расположить левую руку так, чтобы четыре пальца были направлены по направлению тока в проводнике, составляющая вектора магнитной индукции, перпендикулярная проводнику, входила в ладонь, то отогнутый на 90° большой палец укажет направление силы, действующей на проводник (рис. 117).

Сила Лоренца. На электрически заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле, действует сила, величина которой зависит от величины и направления вектора скорости частицы и вектора магнитной индукции, величины заряда частицы. Эта сила называется **силой Лоренца**:

$$F_{\text{л}} = qvB \sin \alpha$$

Направление силы Лоренца как силы Ампера определяется **по правилу левой руки**:

— руку располагают так, чтобы составляющая вектора магнитной индукции, перпендикулярная вектору скорости частицы, входила в ладонь, четыре пальца указывали направление движения положительно заряженной частицы, при этом направление силы Лоренца совпадает с направлением отогнутого на 90° большого пальца.

В том случае, если заряд частицы отрицателен, сила Лоренца действует в направлении, противоположном направлению, указываемому большим пальцем (рис. 118).

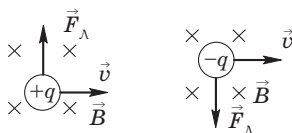
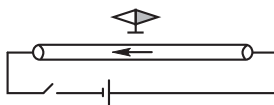


Рис. 118

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ 22

- Около длинного горизонтального проводника поместили магнитную стрелку. Электрическую цепь замкнули. При этом стрелка



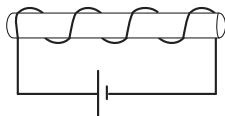
- останется в прежнем положении
- повернется на 180°
- повернется на 90° по часовой стрелке
- повернется на 90° против часовой стрелки

2. На рисунке изображён проволочный виток, по которому течёт электрический ток в направлении, указанном стрелкой.



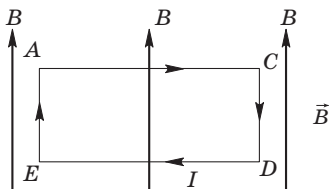
В центре витка вектор индукции магнитного поля направлен

- 1) вертикально вниз
 - 2) вертикально вверх
 - 3) \odot
 - 4) \otimes
3. На лабораторных занятиях ученик собрал простейший электромагнит, намотав на ферромагнитный сердечник изолированный провод, замкнутый на источник тока.



Как расположены полюса такого электромагнита?

- 1) слева — южный полюс
 - 2) слева — северный полюс
 - 3) сверху — южный полюс
 - 4) снизу — южный полюс
4. Прямоугольная рамка $ACDE$ помещена в однородное магнитное поле с индукцией B .



Каков результат действия поля на рамку?

- 1) рамка смещается вверх
- 2) рамка смещается вниз
- 3) рамка поворачивается стороной AC к нам
- 4) рамка поворачивается стороной AC от нас

5. Что нужно сделать, чтобы изменить направление силовых линий магнитного поля катушки с током?

- 1) уменьшить силу тока
- 2) ввести в катушку железный сердечник
- 3) изменить направление тока в катушке
- 4) среди ответов 1–3 нет правильного

6. Сила Лоренца действует

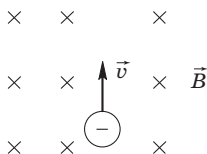
- А. На незаряженную частицу, движущуюся в магнитном поле
- Б. На заряженную частицу, покоящуюся в магнитном поле
- В. На незаряженную частицу, покоящуюся в магнитном поле
- Г. На заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле

- 1) только Б
- 2) только Г
- 3) А и В
- 4) Б и Г

7. Электрон влетает в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. Как изменится период вращения при увеличении его скорости в три раза?

- 1) увеличится в три раза
- 2) не изменится
- 3) уменьшится в три раза
- 4) увеличится в 9 раз.

8. Электрон влетает в магнитное поле. В какую сторону отклонится электрон?

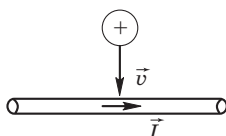


- 1) от наблюдателя
- 2) к наблюдателю
- 3) влево
- 4) вправо

9. Заряженная частица движется в однородном магнитном поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. Работа силы Лоренца за половину периода вращения частицы

- 1) $A > 0$
- 2) $A < 0$
- 3) $A = 0$
- 4) $A = F_{\text{л}} \pi R$

10. Положительно заряженной частице сообщили скорость в направлении бесконечного проводника с током. Сила, действующая на частицу, будет:



- 1) увеличиваться, сохраняя направление
- 2) уменьшаться, сохраняя направление
- 3) увеличиваться, отклоняя частицу вправо
- 4) увеличиваться, отклоняя частицу влево

11. Установите соответствие между записанными в первом столбце физическими величинами и формулами, по которым их можно рассчитать.

К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго и запишите в таблицу выбранные цифры.

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

- А) магнитная индукция
- Б) сила Лоренца

ФОРМУЛЫ

- 1) $F = BIL \sin \alpha$
- 2) $B = \frac{F}{q}$
- 3) $B = \frac{F}{IL \sin \alpha}$
- 4) $F = Bqv \sin \alpha$

Ответ:

А	Б

12. В однородном магнитном поле индукцией B по окружности радиусом R движется частица с зарядом q . Установите соответствие между записанными в первом столбце физическими величинами и формулами, по которым их можно рассчитать.

К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго и запишите в таблицу выбранные цифры.

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

А) импульс частицы

Б) сила, действующая на частицу

ФОРМУЛЫ

1) qBR

2) $\frac{B}{q}R$

3) $q^2 B^2 \frac{R}{m}$

4) $m q B R$

Ответ:

А	Б

13. В однородном магнитном поле индукцией $0,04$ Тл на проводник с током действует сила 24 мН. Длина активной части проводника 20 см, сила тока в нём 6 А. Под каким углом к вектору магнитной индукции расположен проводник?

14. Между полюсами электромагнита в горизонтальном магнитном поле находится проводник, расположенный горизонтально и перпендикулярно вектору магнитной индукции. Определите силу тока, который должен идти через проводник, чтобы он висел, не падая. Магнитная индукция $B = 0,05$ Тл, масса единицы длины проводника $0,004$ кг/м.

15. Электрон влетает в однородное магнитное поле индукцией 50 мкТл перпендикулярно линиям индукции магнитного поля. Найдите частоту вращения электрона.

Связь электрических и магнитных явлений

1. Явление электромагнитной индукции. Электромагнитной индукцией называют явление возникновения электрического тока в замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного поля, пронизывающего этот контур.

Возникающий в этом случае электрический ток называют **индукционным**.

Для описания изменения магнитного поля вводится физическая величина, называемая **магнитным потоком**.

Магнитным потоком через контур называют физическую величину, равную произведению модуля вектора магнитной индукции, площади поверхности контура и косинуса угла между нормалью к плоскости контура и вектором магнитной индукции (рис. 119):

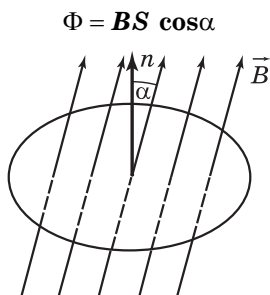


Рис. 119

В системе СИ $[\Phi] = \text{Тлм}^2 = \text{Вб}$ (Вебер).

При увеличении или уменьшении магнитного потока индукционный ток имеет разное направление.

Индукционный ток имеет такое направление, что создаваемый им магнитный поток стремится компенсировать изменение магнитного потока, вызывающего появление индукционного тока. Это положение носит название **правила Ленца**.

Индукционный ток создаётся **электродвижущей силой индукции (ЭДС индукции)**, возникающей в контуре при изменении магнитного потока, пронизывающего этот контур.

2. Закон электромагнитной индукции.

$$\varepsilon_{is} = -n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \quad n — \text{число витков в контуре. Знак «минус»}$$

показывает, что ЭДС индукции вызывает индукционный ток такого направления, что созданный им магнитный поток направлен против изменения магнитного потока, вызывающего индукционный ток.

3. ЭДС индукции в движущемся проводнике (рис. 120).

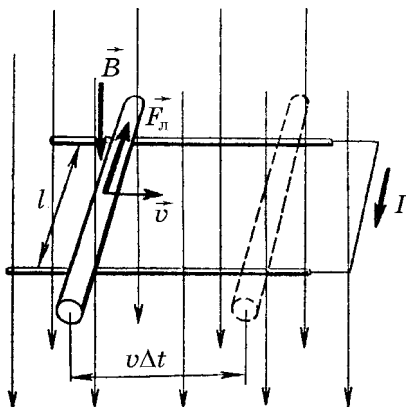


Рис. 120

При движении проводника AB в однородном магнитном поле в контуре $ABCD$ возникает ЭДС индукции:

$$\varepsilon_i = BLv \sin \alpha$$

B — индукция магнитного поля;

L — длина проводника AB ;

v — скорость движения проводника;

α — угол между вектором \vec{B} и вектором скорости \vec{v} .

Направление индукционного тока определяется по **правилу правой руки**:

— если расположить правую руку так, чтобы силовые линии входили в ладонь, отставленный на 90° большой палец совпадал с направлением вектора скорости \vec{v} , то вытянутые четыре пальца укажут направление индукционного тока.

4. Явление самоиндукции. Явление возникновения индукционного электрического тока в замкнутом проводнике при изменении в нём силы тока называют **явлением самоиндукции**.

Магнитный поток, пронизывающий замкнутый контур (катушку), пропорционален силе тока, протекающего через контур: $\Phi \sim I$.

Можно записать, что $\Phi = LI$.

Коэффициент пропорциональности L называют **индуктивностью проводника**.

Индуктивность проводника — физическая величина, равная коэффициенту пропорциональности между магнитным потоком через площадь, ограниченную контуром проводника и силой тока в контуре.

Единицы в СИ $[L] = \text{Вб}/\text{А} = \text{Гн}$ (Генри).

Индуктивностью обладает любой проводник. Величина индуктивности зависит от формы проводника, его линейных размеров, густоты намотки провода и магнитных свойств среды (наличия или отсутствия железного сердечника).

Величина ЭДС самоиндукции, возникающая в проводнике, зависит от **индуктивности** проводника и скорости изменения тока в проводнике:

$$\varepsilon_{\text{si}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

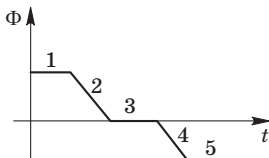
5. Энергия магнитного поля. Для установления в электрической цепи определённого значения силы тока необходимо совершить работу: при нарастании силы тока в цепи нарастает и ЭДС самоиндукции, направленная навстречу ЭДС источника тока. Источник тока совершает работу против сил вихревого электрического поля для того, чтобы сила тока достигла некоторого значения.

При размыкании цепи из-за явления самоиндукции убывающий ток в цепи поддерживается за счёт энергии, запасённой при нарастании тока, т. е. за счёт **энергии магнитного поля**:

$$W_1 = \frac{1}{2} LI^2.$$

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ 23

1. В каком случае в замкнутом контуре возникает индукционный ток?
 - 1) При перемещении контура в одной плоскости перпендикулярно вектору магнитной индукции постоянного однородного магнитного поля.
 - 2) При перемещении контура в одной плоскости параллельно вектору магнитной индукции постоянного однородного магнитного поля.
 - 3) При вращении контура вокруг оси, перпендикулярной вектору магнитной индукции постоянного однородного магнитного поля.
 - 4) При вращении контура вокруг оси, параллельной вектору магнитной индукции постоянного однородного магнитного поля.
2. Катушка замкнута на микроамперметр. В каких случаях в ней возникает электрический ток?
 - А. В катушку вдвигают постоянный магнит.
 - Б. В катушке находится неподвижный постоянный магнит.
 - 1) только А
 - 2) только Б
 - 3) в обоих случаях
 - 4) ни в одном из случаев
3. Магнитный поток, пересекающий замкнутый контур, изменяется с течением времени согласно графику. Какие участки графика соответствуют отсутствию тока в контуре?



- 1) 1 и 5
- 2) только 3
- 3) 1, 3 и 5
- 4) ток в контуре всё время отличен от нуля, изменяется лишь его значение

4. При введении (выведении) с постоянной скоростью полосового магнита в медное замкнутое кольцо в нём возникает индукционный ток, создающий магнитное поле. Каким полюсом обращено магнитное поле кольца к выдвигаемому из него северному полюсу магнита?

- 1) северным
- 2) южным
- 3) нельзя определить, так как вектор индукции магнитного поля кольца перпендикулярен индукции магнитного поля магнита
- 4) среди ответов нет правильного

5. Проводник, согнутый в виде кольца, помещён в однородное магнитное поле, направленное перпендикулярно плоскости кольца, «от читателя».

Индукция магнитного поля уменьшается со временем. Как направлен индукционный ток в проводнике?

- 1) против хода часовой стрелки
- 2) по ходу часовой стрелки
- 3) ток в кольце не возникнет
- 4) направление тока зависит от сопротивления проводника

6. От чего зависит индуктивность катушки?

- 1) только от силы тока, текущего по катушке
- 2) только от формы катушки
- 3) от размеров катушки, количества витков и свойств материала сердечника
- 4) от размеров катушки, свойств материала сердечника и силы тока в катушке

7. Индуктивность контура можно определить по формуле

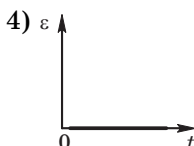
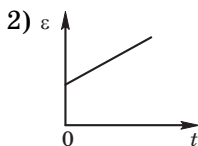
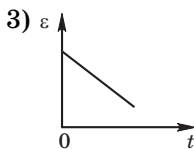
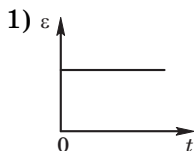
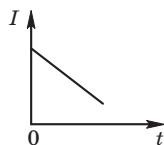
1) $L = \frac{\Phi}{I}$

3) $L = -n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$

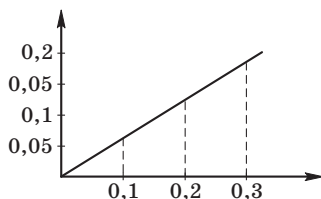
2) $L = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$

4) $L = -R \frac{\Delta I}{\Delta t}$

8. График зависимости силы тока в катушке от времени представлен на рисунке. Какой график соответствует изменению возникающей при этом ЭДС самоиндукции от времени?



9. Сила тока в катушке индуктивностью 10 Гн изменяется с течением времени, как показано на графике.



В катушке возникает ЭДС самоиндукции, равная по величине

- 1) 10 B 3) 1 B
2) 15 B 4) 5 B

10. Индуктивность катушки увеличили в 4 раза, а силу тока уменьшили в 2 раза. Энергия магнитного поля при этом

- 1) увеличится в 2 раза
- 2) уменьшится в 4 раза
- 3) не изменится
- 4) уменьшится в 2 раза

11. Установите соответствие между записанными в первом столбце физическими величинами и формулами, по которым их можно рассчитать.

К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго и запишите в таблицу выбранные цифры.

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

А) ЭДС самоиндукции

Б) заряд q , протекающий за время Δt через замкнутый контур сопротивлением R при изменении магнитного поля, пронизывающего его

ФОРМУЛЫ

1) $\varepsilon = BLv$

2) $\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$

3) $q = L\frac{\Delta B}{\Delta t}$

4) $q = \frac{\Delta\Phi}{R}$

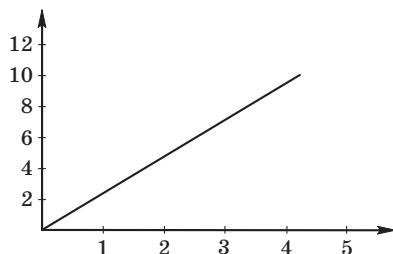
5) $\varepsilon = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$

Ответ:

А	Б

12. Медное кольцо радиусом 15 см из проволоки диаметром 1 мм расположено в однородном магнитном поле, индукция которого изменяется со скоростью 0,2 Тл/с. Плоскость кольца перпендикулярна линиям магнитного поля. Определите силу индукционного тока, возникающего в кольце. Удельное сопротивление меди $1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом · м.

13. На рисунке приведён график зависимости ЭДС самоиндукции от скорости изменения силы тока, протекающей через катушку. Определите индуктивность катушки.



14. Найдите энергию магнитного поля катушки индуктивностью $0,6 \text{ Гн}$ при силе тока в ней 50 мА .
15. В однородном магнитном поле индукцией 5 мТл движется металлический стержень длиной 50 см перпендикулярно вектору магнитной индукции со скоростью 2 м/с . Определите разность потенциалов, возникающую между концами стержня.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Свободные электромагнитные колебания

1. Колебательный контур — замкнутая электрическая цепь, в которой могут возникать свободные (собственные) гармонические колебания заряда, силы тока и напряжения.

Колебательный контур — цепь, состоящая из последовательно включённых катушки индуктивности L и конденсатора ёмкостью C (рис. 121).

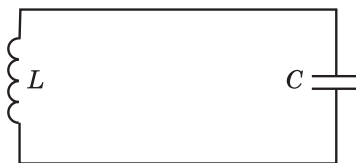


Рис. 121

Сопротивлением проводов катушки можно пренебречь.

Для возбуждения колебаний в контуре конденсатор заряжают, сообщая его обкладкам заряды $\pm q_m$ и энергию электрического поля

$$W_{\text{э}} = \frac{q_m^2}{2C}.$$

(Положение ключа 1 на рис. 122).

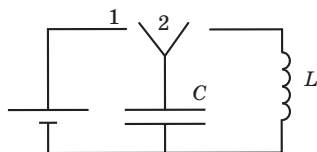


Рис. 122

При переводе ключа в положение 2 в контуре возникают электромагнитные колебания. В отсутствие потерь на нагревание проводов и излучение конденсатора в контуре совершаются гармонические колебания заряда:

$$q = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

Соответственно сила тока в катушке индуктивности изменяется по закону (рис. 123): $I = q' = -I_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$

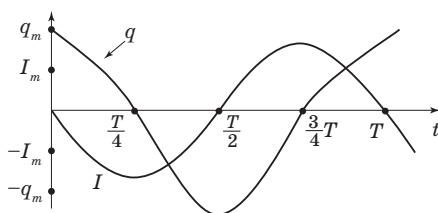


Рис. 123

Энергия электрического поля заряженного конденсатора превращается в энергию магнитного поля катушки.

Полная энергия электромагнитного поля в любой момент сохраняется

$$W = \frac{q^2}{2C} + \frac{1}{2}LI^2 = \frac{q_m^2}{2C}, \quad \frac{q_m^2}{2C} = \frac{1}{2}LI_m^2$$

Учитывая, что $I_m = \omega_0 q_m$, можно показать, что $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$

(ω_0 — частота собственных электромагнитных колебаний в контуре).

T — период собственных колебаний, $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$.

$T = 2\pi\sqrt{LC}$ (формула У. Томсона).

В реальном контуре всегда имеются потери, обусловленные нагреванием проводов и излучением конденсатора. В реальном контуре энергия электромагнитного поля уменьшается, превращаясь в другие виды энергии. Колебания являются затухающими (рис. 124).

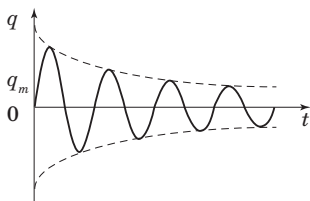


Рис. 124

2. Вынужденные электромагнитные колебания. Чтобы колебания не затухали, необходимо компенсировать потери энергии и подводить к колебательной системе — колебательному контуру энергию извне. Энергия подводится за счёт работы внешней периодической силы. В колебательном контуре периодической внешней силой является периодическая ЭДС.

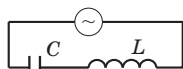


Рис. 125

Электромагнитные колебания, происходящие под действием внешней периодически изменяющейся ЭДС, называют **вынужденными колебаниями** (рис. 125).

3. Свойства вынужденных колебаний.

1. Вынужденные колебания происходят с частотой изменения ЭДС (частотой вынуждающей силы).

2. Амплитуда вынужденных колебаний зависит не только от первоначального запаса энергии, как в случае свободных колебаний, но и от соотношения собственной частоты колебательной системы и частоты внешнего воздействия.

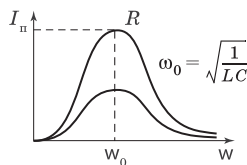


Рис. 126

Резонансом называют явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты

внешнего воздействия с частотой собственных колебаний системы (рис. 126).

Примером вынужденных колебаний является *переменный ток*, широко применяемый в быту и технике.

Переменный электрический ток — вынужденные электромагнитные колебания, при которых сила тока в цепи изменяется со временем по гармоническому закону (рис. 127).

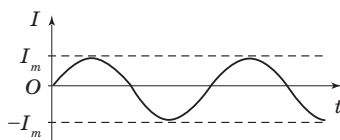


Рис. 127

Для создания переменного тока необходимо получить переменную ЭДС. Для этого можно равномерно вращать проводящую рамку в однородном магнитном поле индукцией \vec{B} (рис. 128).

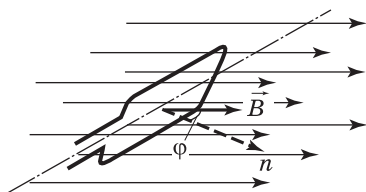


Рис. 128

Если рамка вращается с постоянной частотой ν , то циклическая частота ω равна: $\omega = 2\pi\nu$; угол поворот рамки α равен: $\alpha = \omega t$.

Магнитный поток, пронизывающий контур рамки:

$$\Phi = BS \cos \omega t$$

В соответствии с законом электромагнитной индукции $\varepsilon = -\dot{\Phi}$; $\varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t$.

Амплитудное значение ЭДС: $\varepsilon_m = BS\omega$.

При включении в электрическую цепь источника переменного напряжения в такой цепи возникает переменный ток. Закон изменения электрического тока (рис. 129):

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$$



Рис. 129

I_m амплитуда силы тока; ω — частота изменения напряжения (в России используется переменное напряжение с частотой $\nu = 50$ Гц, $\omega = 100\pi$ рад/с); φ — фазовый сдвиг, зависящий от типа сопротивления.

Для характеристики переменного тока вводится понятие о действующем значении тока и напряжения.

Для тока и напряжения, изменяющегося по гармоническому закону, действующее значение силы переменного тока равно силе постоянного тока, выделяющего в цепи такое же количество теплоты, что и переменный ток за то же время.

$$I_d = \frac{I_m}{\sqrt{2}}; U_d = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

4. Производство и передача электроэнергии. Электроэнергия производится вблизи источников топлива или гидроресурсов, потребители могут быть расположены на очень большом расстоянии. Поэтому возникает потребность в передаче электроэнергии.

При передаче электроэнергии потребителю необходимо передать максимальную полезную мощность и уменьшить потери мощности.

Мощность потери в проводящих проводах зависит от действующего значения силы тока и сопротивления проводов:

$$P_{\pi} = I^2 R_{\pi}$$

При известной мощности генератора $I = \frac{P}{U}$ (U — напряжение на зажимах генератора).

$$\text{Потери мощности: } P_{\pi} = \frac{R_{\pi} P^2}{U^2}.$$

Уменьшить мощность потерь можно за счёт повышения напряжения. Для этой цели используют *трансформаторы*.

Трансформатор — устройство, изменяющее параметры переменного тока (напряжение, сила тока) без изменения его частоты.

Трансформатор (рис. 130) состоит из замкнутого железного сердечника, на который надеты две катушки с проводочными обмотками. Первичная обмотка (число витков n_1) подключается к источнику переменного напряжения. Вторичная обмотка (число витков n_2) подключается к нагрузке.

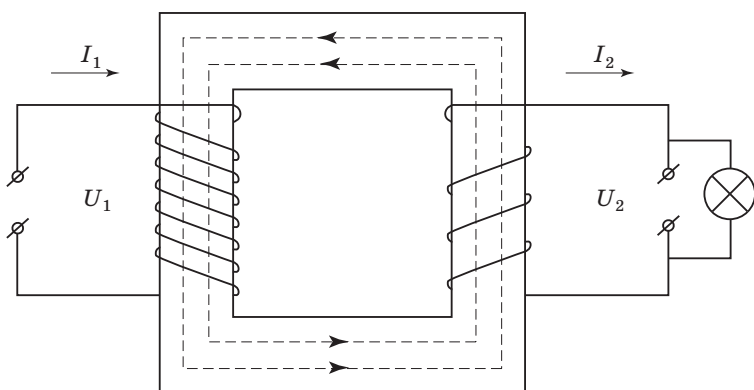


Рис. 130

Принцип работы трансформатора основан на **явлении электромагнитной индукции**. Переменный ток I_1 , протекающий по первичной катушке, создаёт в сердечнике переменное магнитное поле. Так как сердечник замкнут, то магнитный поток во вторичной обмотке такой же, как и в первичной. В каждом витке этих обмоток возникает ЭДС индукции. Результирующие ЭДС индукции в первичной и вторичной обмотках пропорциональны числу витков в них:

$$\varepsilon_1 = -n_1 \Phi' \quad \varepsilon_2 = -n_2 \Phi'$$

Если пренебречь сопротивлением обмоток, $\varepsilon_1 = -U_1$
 $\varepsilon_2 = -U_2$.

Коэффициент трансформации — величина, равная отношению напряжения в первичной и вторичной обмотках трансформатора.

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

Повышающий трансформатор $k < 1$.

Понижающий трансформатор $k > 1$.

Из-за малых тепловых потерь мощность тока во вторичной обмотке трансформатора можно считать равной мощности тока в первичной обмотке трансформатора:

$$I_1 U_1 = I_2 U_2$$

5. Электромагнитные волны. Электромагнитная волна — процесс распространения переменного электромагнитного поля в пространстве.

Условие возникновения электромагнитной волны — ускоренное (в частности, колебательное) движение электрического заряда. Электромагнитная волна является поперечной (рис. 131).

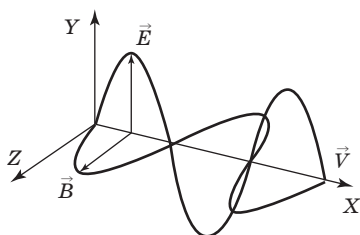


Рис. 131

Расстояние между двумя ближайшими точками, в которых колебания вектора \vec{E} или вектора \vec{B} происходят в одинаковых фазах (точки A и C), называют длиной волны:

$$\lambda = cT \text{ или } \lambda = \frac{c}{\nu}.$$

T — период электромагнитных колебаний в контуре;

ν — частота электромагнитных колебаний;

c — скорость распространения электромагнитной волны.

В вакууме $c = 300\,000$ км/с.

Обычный закрытый колебательный контур практически не излучает электромагнитных волн. Для создания электромагнитных волн используют **открытый колебательный контур**, который получают из закрытого, одновременно уменьшая число витков в катушке, а также площадь обкладок конденсатора и раздвигая их.

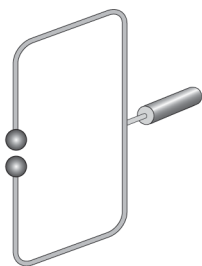


Рис. 132

Вибратор Герца представляет собой открытый колебательный контур, состоящий из проводника с воздушным промежутком посередине — разрядником (рис. 132).

На вибратор возле разрядника подаётся высокое напряжение, в разряднике проскакивает искра. При ускоренном движении электрических зарядов в разряднике возникает электромагнитная волна, которая распространяется в пространстве.

Электромагнитная волна переносит энергию и импульс электромагнитного поля.

6. Спектр электромагнитных волн. По длине волны (или частоте) спектр электромагнитных волн условно делят на восемь диапазонов.

Название диапазона	Частотный диапазон	Диапазон длин волн	Применение
Электромагнитные волны звуковой частоты	$0-2 \cdot 10^4$ Гц	$1,5 \cdot 10^4-\infty$	
Радиоволны	$2 \cdot 10^4-10^9$ Гц	$0,3-1,5 \cdot 10^4$	Радиовещание, мобильная связь, телевидение, радиолокация
СВЧ	$10^9-3 \cdot 10^{11}$ Гц	1 мм — 0,3 м	Космическая связь, бытовые микроволновые печи

Название диапазона	Частотный диапазон	Диапазон длин волн	Применение
Инфракрасное (ИК) излучение	$3 \cdot 10^{11} - 3,85 \cdot 10^{14}$	780 нм — 1 мм	Тепловизионная техника: тепловизоры, тепловизионные бинокли, оптические прицелы ночного видения. В промышленных процессах: для сушки различных материалов. В быту: пульт дистанционного управления электронного устройства
Видимый свет	$3,85 \cdot 10^{14} - 7,89 \cdot 10^{14}$ Гц	380–780 нм	
Ультрафиолетовое (УФ) излучение	$7,89 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{16}$ Гц	10–380 нм	В медицине и косметологии: стерилизация помещений и инструментов; солярии. Детекторы валют и кредитных карт
Рентгеновское излучение	$3 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{20}$ Гц	$10^{-12} - 10^{-8}$ м	В медицине: рентгеновская диагностика. В технике: рентгеноструктурный анализ, дефектоскопия
γ -излучение	$\nu > 3 \cdot 10^{20}$ Гц	$\lambda < 10^{-12}$ м	В медицине: γ -нож в нейрохирургии; лучевая терапия

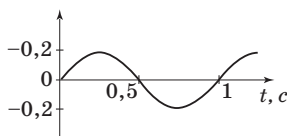
ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ 24

1. Как изменится период электромагнитных колебаний в колебательном контуре, если ввести в катушку железный сердечник?
 - 1) не изменится
 - 2) увеличится
 - 3) уменьшится
 - 4) может как увеличиться, так и уменьшиться
2. Как изменится частота электромагнитных колебаний в колебательном контуре, если увеличить расстояние между пластинами конденсатора?
 - 1) не изменится
 - 2) увеличится
 - 3) уменьшится
 - 4) может как увеличиться, так и уменьшиться
3. Через какую долю периода после замыкания заряженного конденсатора на катушку индуктивности энергия в контуре распределится между катушкой и конденсатором поровну?
 - 1) $\frac{T}{2}$
 - 2) $\frac{T}{4}$
 - 3) $\frac{T}{8}$
 - 4) $\frac{T}{16}$
4. Как изменится частота свободных электромагнитных колебаний в контуре, если и ёмкость конденсатора и индуктивность катушки увеличить в 5 раз?
 - 1) уменьшится в 25 раз
 - 2) увеличится в 5 раз
 - 3) увеличится в 25 раз
 - 4) уменьшится в 5 раз

5. В колебательном контуре ёмкость конденсатора увеличили в 4 раза. Как надо изменить индуктивность катушки, чтобы период электромагнитных колебаний остался прежним?

- 1) увеличить индуктивность в 4 раза
- 2) уменьшить индуктивность в 2 раза
- 3) уменьшить индуктивность в 4 раза
- 4) увеличить индуктивность в 2 раза

6. По какому закону изменяется сила переменного тока, график зависимости которого изображён на рисунке.



- 1) $I = 0,1\sin 2\pi t$
- 2) $I = 0,2\sin 2\pi t$
- 3) $I = 0,1\cos 2\pi t$
- 4) $I = 0,4\cos \pi t$

7. Как изменится ЭДС генератора переменного тока, если число оборотов ротора увеличить в 3 раза?

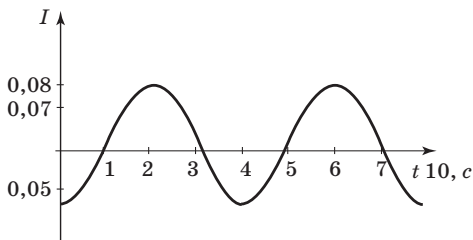
- 1) не изменится
- 2) увеличится в 3 раза
- 3) уменьшится в 3 раза
- 4) увеличится в 6 раз

8. Действующее значение напряжения равно 220 В. Каково амплитудное значение напряжения?

- 1) 310 В
- 2) 157 В
- 3) 110 В
- 4) 440 В

9. В колебательном контуре, индуктивность катушки которого равна 20 мГн, происходят вынужденные электромагнитные колебания. В таблице показано, как изме-

14. По графику изменения силы тока в колебательном контуре от времени определите длину волны, на которую настроен контур.



- 1) 400 м
2) $6 \cdot 10^{-3}$ м
3) 8 км
4) $1,2 \cdot 10^3$ м
15. При распространении в вакууме электромагнитной волны происходит перенос:

А) энергии
Б) импульса

- 1) только А
2) только Б

3) и А, и Б

4) ни А, ни Б

16. Какова взаимная ориентация векторов \vec{E} , \vec{B} , \vec{c} в электромагнитной волне?

- 1) все три вектора взаимно перпендикулярны
2) вектор \vec{E} совпадает по направлению с вектором \vec{B} и перпендикулярен вектору \vec{c}
3) вектор \vec{E} совпадает по направлению с вектором \vec{c} и перпендикулярен вектору \vec{B}
4) вектор \vec{B} совпадает по направлению с вектором \vec{c} и перпендикулярен вектору \vec{E}

17. Установите соответствие между записанными в первом столбце физическими величинами и формулами, по которым их можно рассчитать.

К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго и запишите в таблицу выбранные цифры.

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

- А) длина электромагнитной волны,
излучаемой колебательным кон-
туром
Б) КПД трансформатора

ФОРМУЛЫ

- 1) $\frac{U_2 T_2}{U_1 T_1} \cdot 100\%$
2) $\frac{2\pi\sqrt{LC}}{c}$
3) $\frac{c}{2\pi\sqrt{LC}}$
4) $\frac{U_1 T_1}{U_2 T_2} \cdot 100\%$
5) $2\pi c\sqrt{LC}$

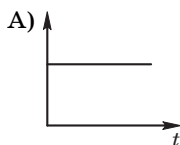
Ответ:

А	Б

18. В идеальном колебательном контуре происходят элек-
тромагнитные колебания с периодом. Графики А и Б
представляют изменения физических величин, харак-
теризующих электромагнитные колебания в контуре.
Установите соответствие между графиками и физиче-
скими величинами, зависимости которых от времени
эти графики могут представлять.

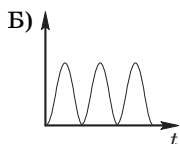
К каждой позиции первого столбца подберите соответ-
ствующую позицию второго и запишите в таблицу вы-
бранные цифры под соответствующими буквами.

ГРАФИКИ



ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

- 1) энергия заряженного конденсатора
2) энергия катушки с током
3) сила тока в контуре
4) период колебаний в контуре



Ответ:

А	Б

19. В колебательном контуре происходят вынужденные электромагнитные колебания. В конденсатор ёмкостью C вводят твёрдый диэлектрик, заполняющий его полностью. Установите, как изменяются амплитуда напряжения на конденсаторе и длина волны, излучаемая этим контуром. Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:
- 1) увеличивается
 - 2) уменьшается
 - 3) не изменяется

Длина волны	Амплитуда напряжения

20. Чему равен период свободных электромагнитных колебаний в контуре, если максимальный заряд конденсатора $q_m = 10^{-6}$ Кл, а максимальная сила тока $I_m = 2 \cdot 10^{-3}$ А?
21. Конденсатор состоит из конденсатора ёмкостью $C = 400$ пФ и катушки индуктивностью $L = 10$ мГн. Найдите амплитуду колебаний силы тока I_m , если амплитуда колебаний напряжения $U_m = 600$ В.
22. Понижающий трансформатор включён в сеть с напряжением 1000 В и потребляет от сети мощность 400 Вт. Каков КПД трансформатора, если сила тока во вторичной обмотке 3,8 А, коэффициент трансформации равен 10?
23. Чему равно расстояние до самолёта, если время между посланным наземным радиолокатором сигналом и принятым после отражения от самолёта $8 \cdot 10^{-4}$ с?
24. При изменении тока в катушке индуктивности на 1 А за время 0,6 с в ней возбуждается ЭДС, равная 0,2 В. Какую длину волны будет иметь радиоволна, излучаемая генератором, контур которого состоит из этой катушки и конденсатора ёмкостью 141 пФ?

ОПТИКА

Геометрическая оптика

1. Основные понятия. Тело, излучающее свет, называют *источником света*. Источники света можно классифицировать.

Источники света	
Естественные	Искусственные
Тепловые	
Солнце, звёзды, молния	Лампа накаливания, свечи, пламя газовой горелки
Люминесцентные	
Светлячки, гнилушки	Люминесцентные и газové лампы
Источники отражённого света Земля, Луна, тела Солнечной системы	

При построении изображения в различных оптических системах пользуются понятием точечного источника света. **Точечным источником света** называют источник света, размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстоянием до оптического прибора или до экрана.

Свет, испускаемый источником, распространяется во все стороны. Используя различные диафрагмы, можно выделить световые пучки определённой формы (рис. 133).

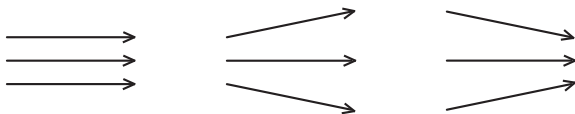


Рис. 133

Световые пучки ограничены *световыми лучами*, которые указывают направление распространения света.

2. Основные законы геометрической оптики и их применение для построения изображений в оптических системах.

Закон прямолинейного распространения света:

— в однородной прозрачной среде свет распространяется прямолинейно.

Закон прямолинейного распространения света позволяет объяснить образование:

— тени от тела, на который падает свет от точечного источника света (рис. 134);

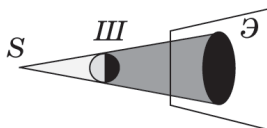


Рис. 134

— тени и полутени от тела, на который падает свет от протяжённого источника света (рис. 135).

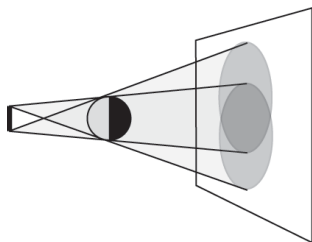


Рис. 135

Закон прямолинейного распространения справедлив только в том случае, если отверстие, выделяющее световой пучок, или преграда, на которую падает свет, имеет размеры много больше длины световой волны, то есть выполняется условие:

$$\lambda \ll \frac{a^2}{l},$$

где λ — длина световой волны, a — размер источника света, l — расстояние до препятствия.

3. Закон отражения света. При падении на границу раздела двух сред свет частично отражается, частично преломляется, частично поглощается второй средой (рис. 136).

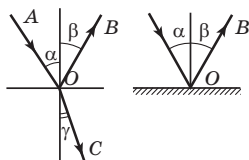


Рис. 136

На рисунке луч AO — падающий луч, OB — отражённый луч, OC — преломлённый луч, угол α — угол падения, угол β — угол отражения, угол γ — угол преломления.

Закон зеркального отражения справедлив только для идеальной плоской поверхности:

- угол падения равен углу отражения;
- падающий луч, отражённый луч и перпендикуляр, восстановленный в точке падения к отражающей поверхности, лежат в одной плоскости.

В случае неровной поверхности возникает *диффузное отражение*, при котором параллельный пучок падающих лучей не преобразуется в параллельный пучок отражённых лучей. При этом в каждой точке поверхности выполняется закон отражения света (рис. 137).

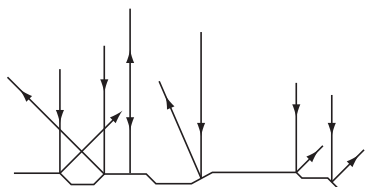


Рис. 137

4. Построение изображений в плоском зеркале. Построение изображения в плоском зеркале основано на использовании закона отражения света (рис. 138).

Для построения точечного источника достаточно использовать два луча. Угол падения луча 1, направленного

перпендикулярно зеркалу, равен нулю, поэтому равен нулю и угол отражения. Луч 2, падающий в точке A' под углом α , отражается под тем же углом. Продолжения расходящихся лучей 1' и 2' пересекаются в точке S' , являющейся мнимым изображением точки S . Найдём расстояние $S'O$. Как видно из построения, $\angle OSA = \alpha$ как накрест лежащие углы при параллельных прямых, $\angle S'A = \alpha$ как соответственные. Следовательно, $\triangle OSA = \triangle OS'A$ (по катету и острому углу). Это означает, что $OS = OS'$ (рис. 138).

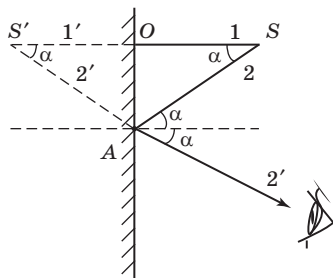


Рис. 138

Мнимое изображение точечного источника в плоском зеркале находится в зеркально симметричной точке.

Изображение источника конечных размеров строится как совокупность изображений всех его точек.

Для построения изображения прямой светящейся стрелки AB достаточно построить изображения крайних точек, которые затем соединяются отрезком прямой $A'B'$. Плоское зеркало даёт **мнимое, прямое и равное по величине изображение** (рис. 139).

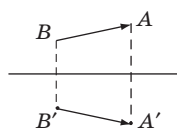


Рис. 139

Мнимым изображением называют такое изображение, которое образуется при пересечении продолжения расходящихся световых лучей.

5. Закон преломления света. Максимальной скоростью распространения взаимодействия является скорость света в вакууме. В любой среде свет распространяется с мень-

шей скоростью. Физическая величина, характеризующая уменьшение скорости распространения света в среде по сравнению со скоростью света в вакууме, называется **абсолютным показателем преломления среды**.

Абсолютный показатель преломления среды — физическая величина, равная отношению скорости света в вакууме к скорости света в данной среде:

$$n = \frac{c}{v}.$$

Для любой среды $n > 1$.

1. Оптически более плотная среда — среда с большим показателем преломления.

2. Оптически менее плотная среда — среда с меньшим показателем преломления.

Закон преломления света. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления равно отношению показателей преломления второй среды к первой:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Падающий луч, преломлённый луч и перпендикуляр к границе раздела двух сред в точке падения лежат в одной плоскости.

Постоянную величину n , равную $n = \frac{n_2}{n_1}$, называют относительным показателем преломления.

Можно показать, что относительный показатель преломления связан с величиной скорости распространения света в данной среде:

$$n = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Из этого соотношения следует, что $n_2 v_2 = n_1 v_1$.

Скорость распространения света в среде может быть выражена через длину волны и частоту света: $v = \lambda \cdot \nu$.

Так как частота света не меняется при переходе из одной среды в другую, то соотношение для длин волн при переходе через границу раздела двух оптических сред будет иметь следующий вид: $n_2 \lambda_2 = n_1 \lambda_1$.

6. Полное внутреннее отражение. Если пучок света переходит из оптически менее плотной среды в оптически более плотную среду ($n_1 < n_2$), то при любом угле падения существует как отражённый, так и преломлённый лучи света (рис. 140).

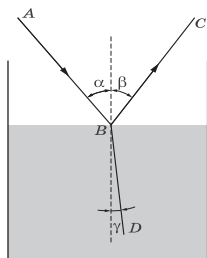


Рис. 140

Рассмотрим подробнее случай, когда свет распространяется от точечного источника S из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду (рис. 141).

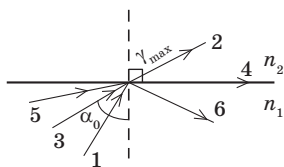


Рис. 141

Если угол падения небольшой, то свет как преломляется, так и отражается. С ростом угла падения α возрастает угол преломления γ .

При некотором угле падения α_0 угол преломления достигает своего максимального значения $\gamma_{\max} = 90^\circ$.

В соответствии с законом преломления света $\frac{\sin \alpha}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{n}$;

$$\alpha_0 = \arcsin\left(\frac{1}{n}\right).$$

Если угол падения $\alpha > \alpha_0$, то преломление света во вторую среду прекращается, свет полностью отражается от границы раздела, как от зеркала — возникает явление **полного внутреннего отражения**.

Полное внутреннее отражение — явление отражения света от оптически менее плотной среды, при котором преломление отсутствует, а интенсивность отражённого света практически равна интенсивности падающего.

7. Ход лучей в призме. Рассмотрим преломление призмой. На рисунке показано сечение трехгранной призмы, плоскостью, перпендикулярной её боковым рёбрам — $\triangle ABC$ (рис. 142).

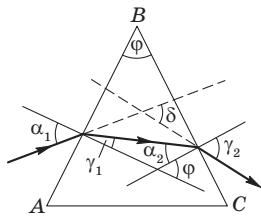


Рис. 142

Угол φ между гранями призмы, на которых происходит преломление света, называют **преломляющим углом призмы**.

Луч света падает из воздуха на грань AB призмы, преломляется, отклоняясь к основанию призмы ($\gamma_1 < \alpha_1$). На грань BC луч падает под углом α_2 , который меньше предельного угла полного внутреннего отражения, преломляется и выходит в воздух, ещё сильнее отклоняясь к основанию призмы ($\alpha_2 < \gamma_2$).

Изучение хода лучей в треугольной стеклянной призме позволяет сделать следующие выводы:

- призма отклоняет луч, падающий на нее из воздуха, к основанию;

- угол отклонения луча тем больше, чем больше преломляющий угол призмы и абсолютный показатель преломления вещества, из которого она сделана.

Если преломляющий угол призмы больше угла полного угла внутреннего отражения, то ход лучей показан на рисунке 143 а, б.

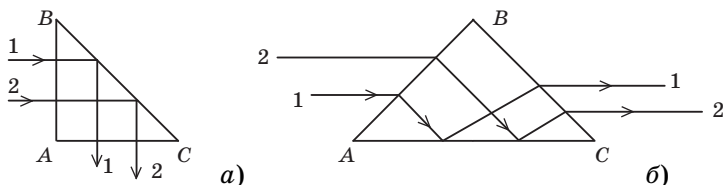


Рис. 143

а — поворотная призма; б — оборотная призма
(для стекла предельный угол полного отражения равен 42°)

Линзы

1. Линзы. Основные линии и точки. Линзы — прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями. Существуют два типа линз.

Собирающие линзы — линзы, преобразующие параллельный пучок световых лучей в сходящийся (рис. 144).

Рассеивающие линзы — линзы, преобразующие пучок

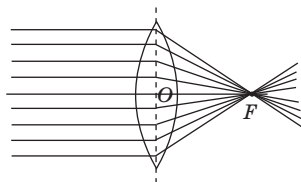


Рис. 144

световых лучей в расходящийся (рис. 145). Точка O — оптический центр линзы.

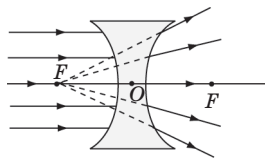


Рис. 145

Главная оптическая ось — прямая, на которой лежат центры сферических поверхностей, ограничивающих линзу.

O_1O_2 — *главная оптическая ось*, все другие прямые, проходящие через оптический центр, называют **побочными оптическими осями** (рис. 146).

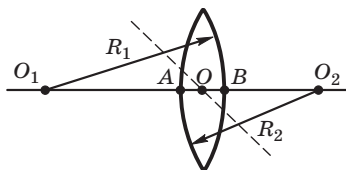


Рис. 146

Тонкая линза — линза, толщина которой пренебрежимо мала по сравнению с радиусами кривизны её поверхности.

Главный фокус собирающей линзы — точка на главной оптической оси, в которой собираются лучи, падающие параллельно главной оптической оси, после преломления их в линзе (рис. 147, а).

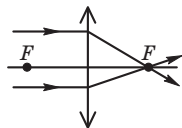


Рис. 147 (а)

Главный фокус рассеивающей линзы — точка на главной оптической оси, через которую проходят продолжения расходящегося пучка лучей, возникшего после преломления в линзе, параллельных главной оптической оси (рис. 147, б).

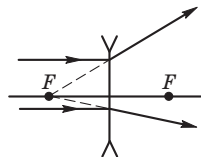


Рис. 147 (б)

Оптическая сила — величина, обратная фокусному расстоянию линзы:

$$D = \frac{1}{F}.$$

$[D] = 1 \text{ м}^{-1} = 1 \text{ дптр}$. 1 дптр — оптическая сила линзы, фокусное расстояние которой 1 м.

2. Формула тонкой линзы. Выражение, связывающее три величины: расстояние d от предмета до линзы, расстояние f от линзы до изображения и фокусное расстояние линзы F .

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$$

или

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = D.$$

Изображение предмета в линзе может быть как больше, так и меньше самого предмета. Для характеристики соотношения размеров предмета и его изображения вводят величину, называемую *увеличением линзы*.

Увеличение линзы Γ равно отношению размеров изображения к размерам предмета

$$\Gamma = \frac{H}{h}.$$

Легко показать, что $\frac{H}{h} = \frac{|f|}{d}$.

Следовательно, увеличение линзы равно $\Gamma = \frac{|f|}{d}$.

Характеристика изображений в собирающих линзах в зависимости от расстояния d от предмета до линзы

Предмет	Изображение			
	Расстояние от линзы f	Тип	Ориентация	Относительный размер
$d > 2F$	$F < f < 2F$	Действительное	Перевёрнутое	$\Gamma < 1$
$d = 2F$	$f = 2F$	Действительное	Перевёрнутое	$\Gamma = 1$
$2F > d > F$	$f > 2F$	Действительное	Перевёрнутое	$\Gamma > 1$
$d = F$	$f = \pm\infty$			
$F > d > 0$	$F < 0; f < d$	Мнимое	Прямое	$\Gamma > 1$

3. Построение изображения в линзах. Основные лучи для собирающей линзы. Рассмотрение преломления световых лучей собирающей тонкой линзой позволяет выделить важнейшие, характерные лучи, достаточные для построения хода любого луча, падающего на линзу, а также для получения изображения предмета в линзе.

На рисунке 148 приведён ход характерных лучей для собирающей линзы.

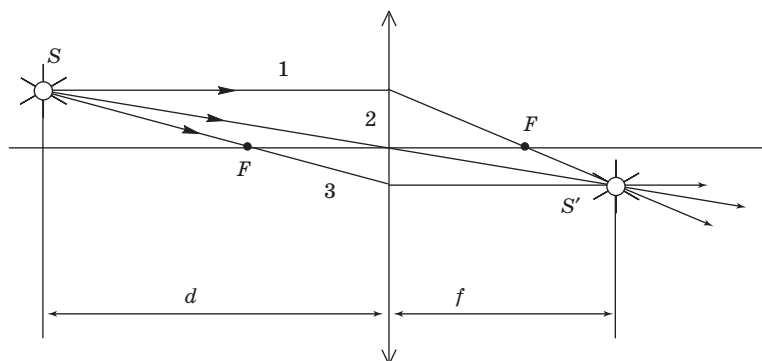


Рис. 148

1. Луч, параллельный главной оптической оси, преломляясь в линзе, проходит через её главный фокус.

2. Луч, проходящий через главный фокус (по принципу обратимости лучей), после преломления в линзе идет параллельно главной оптической оси.

3. Луч, идущий через оптический центр тонкой линзы, проходит через неё, не преломляясь. (Такой луч падает почти на плоскопараллельную пластину. Так как линза тонкая, то незначительным параллельным отклонением преломлённого луча можно пренебречь.)

Если пучок параллельных лучей падает на собирающую линзу под небольшим углом к главной оптической оси, то преломлённые лучи пересекаются в одной точке F' фокальной плоскости линзы, называемой **побочным фокусом**.

Положение побочного фокуса определяется пересечением луча 2, проходящего через оптический центр O лин-

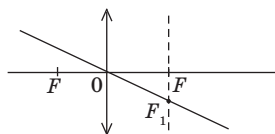


Рис. 149

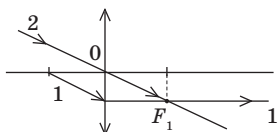


Рис. 150

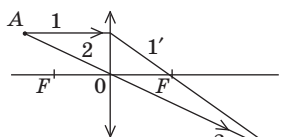


Рис. 151

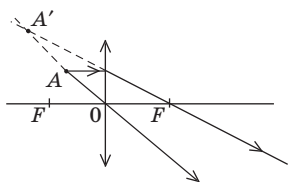


Рис. 152

зы с фокальной плоскостью, находящейся за линзой (рис. 149).

Для построения произвольного луча 1, падающего на собирающую линзу, проведём луч 2 через оптический центр — побочная оптическая ось, до пересечения с фокальной плоскостью, расположенной за линзой. Преломлённый луч 1' проходит через побочный фокус F' (рис. 150).

Изображение протяженного предмета складывается из изображений отдельных точек этого предмета. Поэтому сначала рассмотрим изображение светящейся точки A , находящейся на расстоянии h от главной оптической оси и на расстоянии d ($d > F$) от линзы. Для построения изображения воспользуемся характерными лучами (рис. 151).

Луч 1, падающий параллельно главной оптической оси, и луч 2, проходящий через оптический центр линзы, после прохождения через линзу у пересекаются в точке A' , которая является *действительным* изображением точки A , находящейся на расстоянии f от линзы. На экране, помещенном в точке A' , видна светящаяся точка.

Найдём изображение светящейся точки A , расположенной на расстоянии d ($d < F$) от линзы. Для этого используем те же характерные лучи, что и в предыдущем случае (рис. 152).

Преломляясь, они образуют расходящийся пучок лучей, выходящий из точки A' , являющейся *мнимым* изображением точки A .

Действительное изображение точки A — точка A' , в которой сходится после преломления в линзе пучок лучей, испускаемых точкой A .

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, как бы (мнимо) испускаемых точкой A' .

4. Основные лучи в рассеивающей линзе. Рассмотрение преломления световых лучей рассеивающей линзой позволяет выделить важнейшие *характерные лучи*, достаточные для построения хода любого луча, падающего на линзу, а также для получения изображения предмета в линзе (рис. 153).

1. Луч, параллельный главной оптической оси, преломляясь в линзе, выходит как бы из мнимого главного фокуса.

2. Луч, падающий в направлении мнимого главного фокуса, находящегося за линзой, после преломления в линзе идет параллельно главной оптической оси.

3. Луч, идущий через оптический центр тонкой линзы, проходит через неё без преломления.

Построим ход параллельных лучей, падающих на рассеивающую линзу. Если пучок параллельных лучей падает на тонкую рассеивающую линзу под небольшим углом к главной оптической оси, то продолжения преломлённых лучей пересекаются в одной точке F' фокальной плоскости линзы (*побочный фокус*).

Положение побочного фокуса определяется пересечением луча 2, проходящего через оптический центр O линзы с фокальной плоскостью, находящейся перед линзой (рис. 154).

Для построения произвольного луча 1, падающего на рассеивающую линзу, проведём луч 2 через оптический центр — по-

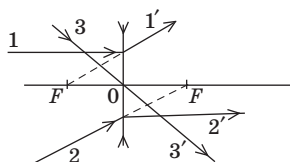


Рис. 153

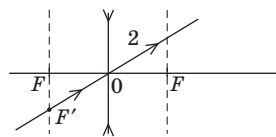


Рис. 154

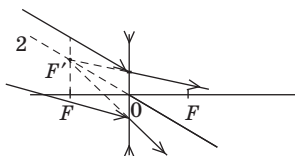


Рис. 155

бочная оптическая ось, до пересечения с фокальной плоскостью, расположенной перед линзой. Продолжение преломлённого луча $1'$ проходит через побочный фокус F' (рис. 155).

Изображение протяжённого предмета складывается из изображений отдельных точек этого предмета. Поэтому сначала рассмотрим изображение светящейся точки A , находящейся на расстоянии h от главной оптической оси и на расстоянии d от линзы.

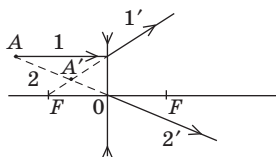


Рис. 156

Для построения изображения воспользуемся характерными лучами. В качестве таких лучей удобно выбрать: луч 1, падающий параллельно главной оптической оси, и луч 2, проходящий через оптический центр O линзы (рис. 156).

Продолжения преломлённых лучей $1'$ и $2'$ пересекаются в точке A' , являющейся *мнимым изображением* точки A , находящейся на расстоянии f от линзы.

Рассеивающая линза всегда создаёт только мнимое изображение (независимо от расстояния между предметом и линзой).

Глаз. Недостатки зрения

1. Строение глаза. Человеческий глаз представляет собой достаточно сложную оптическую систему. Глаз почти сферичен (рис. 157). Внешняя белковая оболочка — *склера* в наружной части глаза становится прозрачной — *роговица* (1). Именно роговица обладает наибольшей оптической силой. После роговицы расположена *передняя камера*, заполненная водянистой влагой. В водяни-

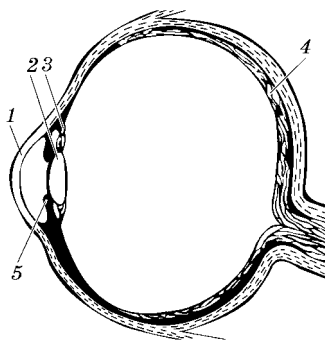


Рис. 157

стую влагу погружена *радужная оболочка* (5) с отверстием — *зрачком*.

Через зрачок свет попадает на *хрусталик* (2) — эластичную двояковыпуклую линзу. Цилиарная мышца (3), управляющая хрусталиком, может изменять его кривизну и соответственно оптическую силу глаза. В полости глаза за хрусталиком находится прозрачное *стекловидное тело*. Роговица, передняя камера, хрусталик, стекловидное тело образуют оптическую систему, аналогичную собирающей линзе. Оптический центр O такой линзы находится приблизительно на расстоянии 17 мм от *сетчатки* (4) — тонкого прозрачного слоя, выстилающего внутреннюю поверхность глаза. На сетчатке возникает перевёрнутое изображение всех предметов. Однако мозг, перерабатывая полученную информацию, воспринимает изображение как прямое.

Расстояние от изображения предмета на сетчатке до оптического центра глаза фиксировано. Единственный способ чётко видеть предметы, находящиеся от глаза на различных расстояниях d — изменение оптической силы линзы.

Аккомодация — способность глаза к изменению его оптической силы.

Очень важной характеристикой глаза является *расстояние наилучшего зрения*.

Расстояние наилучшего зрения — расстояние от объекта до глаза, при котором угол зрения оказывается максимальным, а глаз не утомляется при длительном наблюдении.

Для нормального глаза расстояние наилучшего зрения принимают равным $d_0 = 25$ см.

2. Недостатки зрения и их коррекция.

Близорукость. Расстояние наилучшего зрения близорукого глаза меньше 25 см. Изображение предмета, находящегося на бесконечности, получается не на сетчатке, а в стекловидном теле (рис. 158).

Для коррекции близорукости применяют очки с отрицательной оптической силой (рис. 159).

Дальнозоркость. Расстояние наилучшего зрения дальнорозкого глаза больше 25 см. Изображение предмета, находящегося на бесконечности, получается за сетчаткой (рис. 160).

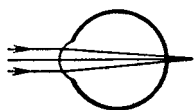


Рис. 158

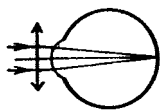


Рис. 159

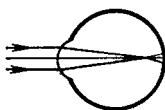


Рис. 160

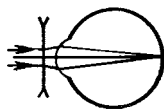


Рис. 161

Для коррекции дальнозоркости применяют очки с положительной оптической силой (рис. 161).

Оптические приборы

1. Проекционный аппарат. Проекционный аппарат даёт на экране увеличенное действительное изображение (диапозитива, кадра, киноплёнки). Для этого предмет помещают между двойным фокусом и фокусом объектива проекционного аппарата (рис. 162).

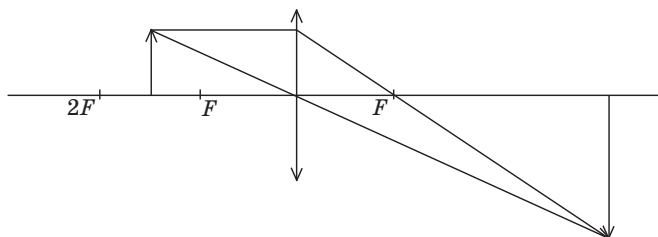


Рис. 162

Поскольку расстояние от проекционного аппарата до экрана может быть различным, то для получения чёткого изображения предмета на экране перемещают объектив, меняя таким образом расстояние от предмета до объектива.

2. Фотоаппарат. Фотоаппарат позволяет получить на плёнке уменьшенное действительное изображение предмета. Для этого предмет должен находиться на расстоянии

много больше двойного фокусного расстояния объектива фотоаппарата, плёнка помещается между двойным фокусом и фокусом, ближе к фокусу (рис. 163).

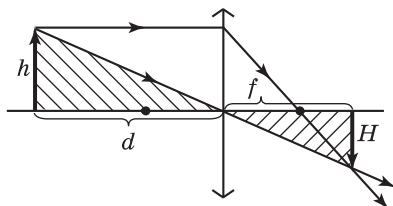


Рис. 163

Чёткого изображения на плёнке фотоаппарата добиваются, изменяя расстояние от плёнки до объектива.

3. Оптические приборы, вооружающие глаз. Оптические приборы, вооружающие глаз человека, можно разделить на приборы для рассматривания мелких объектов и для рассматривания далёких объектов.

К первой группе относятся *лупа* и *микроскоп*, а ко второй — *телескоп*.

Лупа. Лупа представляет собой короткофокусную линзу. Рассматриваемый предмет помещают между линзой и её фокусным расстоянием F , ближе к фокусу (рис. 164, 165).

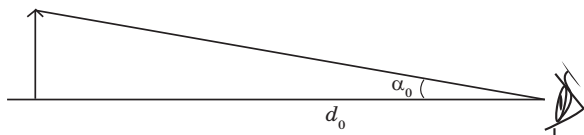


Рис. 164

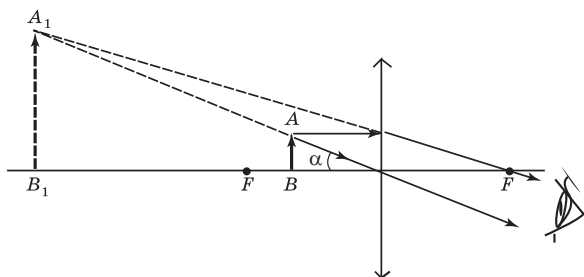


Рис. 165

При этом *увеличенное, прямое, мнимое изображение* предмета будет находиться на бесконечном удалении от глаза. Такое расположение изображения значительно облегчает его наблюдение, так как напряжение глаза в этом случае минимально. Для характеристики увеличения даваемого лупой вводят понятие *углового увеличения*.

Угловое увеличение — отношение угла зрения, полученного с помощью оптического прибора, к углу зрения невооружённого глаза на расстоянии наилучшего зрения

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi_0}.$$

Угловое увеличение лупы равно $\Gamma = \frac{d_0}{F}$.

Микроскоп. Основными элементами микроскопа являются короткофокусные линзы. Линза, которая направлена на предмет, называется *объективом*, а линза, в которую смотрит глаз наблюдателя, — *окуляром* (рис. 166).

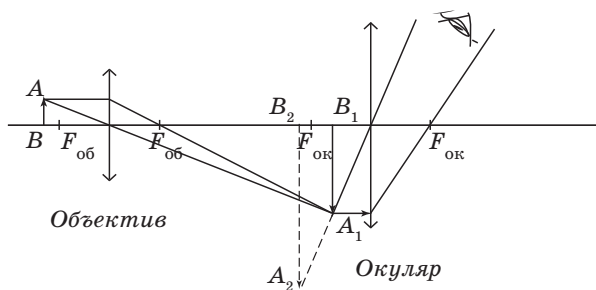


Рис. 166

Предмет AB располагают на расстоянии $F_1 < d < 2F_1$ от объектива ближе к его фокусу для получения максимального угла зрения, т.е. угла, под которым глаз видит предметы. *Угол зрения* — это угол с вершиной в оптическом центре глаза и лучами, направленными на крайние точки предмета. Объектив даёт увеличенное изображение предмета, которое располагается между окуляром и его фокусом. Таким образом, окуляр работает как лупа, то есть формирует *мнимое, увеличенное и прямое* изображение предмета.

Увеличение микроскопа равно: $\Gamma = \frac{\Delta d_0}{F_1 F_2}$, где Δ — длина тубуса.

Телескоп. Телескоп — прибор, служащий для астрономических наблюдений. Существуют различные типы телескопов: зеркальный (телескоп — рефлектор), линзовый (телескоп — рефрактор), радиотелескоп. Рассмотрим принцип действия телескопа-рефрактора.

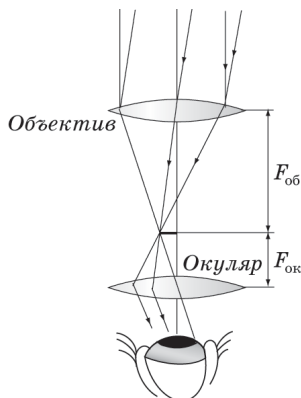


Рис. 167

Оптическая система телескопа рефрактора состоит из объектива и окуляра. Астрономические объекты находятся на большом расстоянии от телескопа, поэтому на объектив падает параллельный пучок лучей света, который собирается в фокальной плоскости объектива. Линза объектива имеет большое фокусное расстояние F_1 . Напротив, для получения максимального увеличения угла зрения окуляр должен быть короткофокусным, тогда изображение, даваемое объективом, будет располагаться между окуляром и его фокусом F_2 , ближе к фокусу. В телескопе положение заднего фокуса объектива и переднего фокуса окуляра совпадают. Окуляр формирует *мнимое, прямое, увеличенное* изображение удаленного объекта (рис. 167).

Увеличение телескопа равно: $\Gamma = \frac{F_1}{F_2}$.

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ 25

1. Как изменится расстояние между предметом и его изображением в плоском зеркале, если зеркало переместить в то место, где было изображение?

- 1) увеличится в 2 раза
- 2) увеличится в 4 раза
- 3) уменьшится в 2 раза
- 4) не изменится

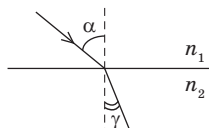
2. Угол падения луча света на плоское зеркало равен 25° . Каков угол между отражённым лучом и зеркалом?

- | | |
|---------------|----------------|
| 1) 75° | 3) 65° |
| 2) 50° | 4) 155° |

3. На какой угол повернётся луч, отражённый от плоского зеркала, при повороте зеркала на угол 24° ?

- 1) 12°
- 2) 24°
- 3) 48°
- 4) отражения не будет

4. Как соотносятся абсолютные показатели преломления двух сред n_1 и n_2 для показанного хода луча света n_1 ?

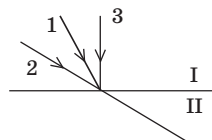


- 1) $n_1 > n_2$
- 2) $n_1 < n_2$
- 3) $n_1 = n_2$
- 4) такой ход лучей принципиально невозможен

5. Как изменится скорость распространения света при переходе из прозрачной среды с абсолютным показателем преломления $n = 1,8$ в вакуум?

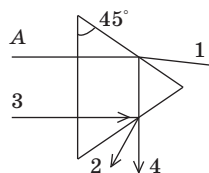
- 1) увеличится в 1,8 раза
- 2) уменьшится в 1,8 раза
- 3) увеличится в 3,6 раз
- 4) не изменится

6. На границу раздела двух сред падают три луча света. Показатель преломления второй среды больше, чем первой. Какой из лучей пойдёт во второй среде так, как показано на рисунке.



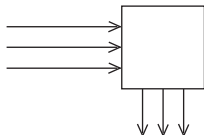
- 1) 1 3) 3
2) 2 4) ни один из лучей
7. Почему небольшие пузырьки воздуха в воде серебристые?
- 1) из-за прямолинейного распространения света
2) из-за огибания светом препятствия сферической формы
3) из-за поглощения света на границе раздела вода — воздух
4) из-за полного отражения солнечных лучей от пузырей
8. Предельный угол полного внутреннего отражения стекла 45° . Каков показатель преломления стекла?

- 1) 1 2) 1,41 3) 2 4) 2,9
9. Луч A падает на стеклянную призму, как показано на рисунке. Показатель преломления стекла равен 1,7. Из призмы выйдут лучи (укажите номер стрелки).



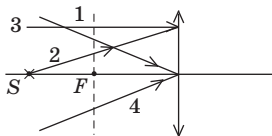
- 1) только 1
2) только 2
3) только 3
4) 1, 2 и 4
10. В какой точке пересекаются параллельные лучи, падающие на собирающую линзу, после преломления в линзе?
- 1) в точке двойного фокуса
2) только в фокусе
3) в оптическом центре линзы
4) в фокальной плоскости

11. Пройдя некоторую оптическую систему, параллельный пучок света поворачивается на 90° . Оптическая система представляет собой



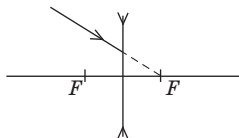
- 1) собирающую линзу
- 2) рассеивающую линзу
- 3) плоское зеркало
- 4) стеклянную пластину

12. Какие из лучей удобно использовать для построения изображения светящейся точки S в собирающей линзе?



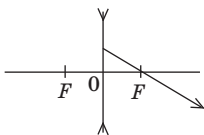
- 1) 1 и 2
- 2) 2 и 4
- 3) 2 и 3
- 4) 1, 2 и 3

13. На рассеивающую линзу падает луч AB .

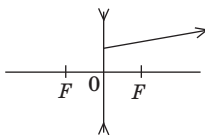


На каком из рисунков правильно показан ход луча после преломления?

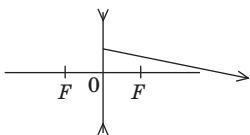
1)



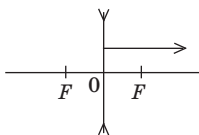
3)



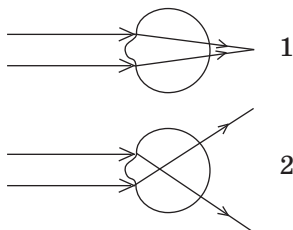
2)



4)



14. На рисунке представлены схемы хода лучей в глазу человека при дальнозоркости и близорукости. Какая из схем характеризует близорукость и очки, с каким 2 знаком оптической силы нужны для исправления данного дефекта зрения?



- 1) 1, $D < 0$
- 2) 2, $D < 0$
- 3) 1, $D > 0$
- 4) 2, $D > 0$

15. Светящаяся стрелка помещена на расстоянии $d > F$ от собирающей линзы. Линза даёт увеличенное в Γ раз изображение. Установите соответствие между физическими величинами и формулами, по которым их можно рассчитать.

К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ	ФОРМУЛЫ
А) положение изображения	1) $\Gamma - \frac{1}{\Gamma d}$
Б) оптическая сила линзы	2) $\frac{d}{\Gamma}$
	3) $\frac{\Gamma}{(\Gamma - 1)d}$
	4) Γd
	5) $\frac{\Gamma + 1}{\Gamma d}$

Ответ:

А	Б

16. Фокусное расстояние собирающей линзы равно 50 см. Чему равно минимальное расстояние между предметом и его действительным изображением?

17. Какое увеличение слайда даёт объектив проектора с фокусным расстоянием $0,2$ м, если экран удалён от объекта на расстояние 3 м?
18. Расстояние от предмета до переднего фокуса линзы в 9 раз меньше, чем расстояние от заднего фокуса до изображения. Каково увеличение линзы?
19. Угол падения луча света на границу раздела двух сред равен 30° , а угол между отражённым и преломлёнными лучами равен 135° . Чему равен показатель преломления второй среды относительно первой?
20. Точечный источник света находится в сосуде с жидкостью на глубине 1 м, показатель преломления жидкости $n = 1,5$. За какое минимальное время свет от источника выйдет из слоя жидкости на поверхность.

ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

Интерференция света

Интерференция света. Законы геометрической оптики не могли объяснить явление отклонения света от прямолинейного распространения, открытое во второй половине XVII в. итальянским учёным Франческо Гримальди. Для объяснения этого явления Гримальди должен был приписать свету волновые свойства.

Решающий шаг в обосновании волновой природы света был сделан Христианом Гюйгенсом, сформулировавшим принцип, который позволил в рамках волновой теории обосновать законы отражения и преломления света.

Явления *интерференции* и *дифракции* могут наблюдаться только в том случае, если рассматриваемый процесс является волновым. Поэтому столь велико значение опытов Т. Юнга и О. Френеля, изучивших экспериментально и объяснивших явления интерференции и дифракции света.

Интерференцией света называется явление наложения волн от двух или нескольких когерентных источников, вследствие которого наблюдается устойчивое во времени усиление или ослабление интенсивности света в различных точках пространства.

Когерентными называются источники, частота колебаний которых одинакова, а разность фаз постоянна.

Независимые источники естественного света некогерентны, поэтому от таких источников невозможно наблюдать устойчивую интерференционную картину. Однако любой источник естественного света может быть когерентен самому себе: одна часть его излучения может интерферировать с другой. Для этого световой поток, излучаемый одним источником, необходимо разделить на два потока, идущих как бы от двух источников, которые являются когерентными.

Впервые подобный опыт по наблюдению интерференции был поставлен Томасом Юнгом.

Опыт Юнга. Кольца Ньютона

Опыт Юнга. Естественный свет падает на экран с узкой щелью S . Прошедшая через эту щель световая волна падает на экран с двумя отверстиями S_1 и S_2 , находящимися на расстоянии d друг от друга (рис. 168).

От двух когерентных источников свет падает на экран, находящийся на расстоянии L от двух отверстий в ширме (рис. 169).

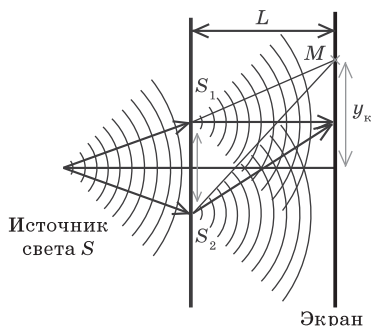


Рис. 168

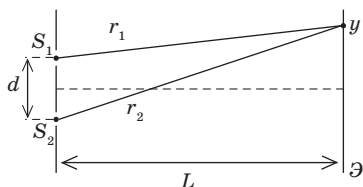


Рис. 169

Результат интерференции в точке с координатой y зависит от геометрической разности хода световых волн: $\Delta = r_2 - r_1$.

Легко показать, что $y_k = \frac{\Delta L}{d}$.

Если $\Delta = k\lambda$ (разность хода **равна целому числу волн**), то в этой точке наблюдается усиление света, то есть **интерференционный максимум**.

Если $\Delta = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$ (разность хода **равна нечётному числу** полуволн), то в этой точке наблюдается ослабление света, т. е. **интерференционный минимум**.

Так как положение интерференционного максимума зависит от длины световой волны, то положение максимума одного порядка для красного света не совпадает с максимумом фиолетового света, поэтому, если наблюдение ведётся в белом свете, только интерференционный максимум в точке O будет белым, все остальные максимумы будут окрашены.

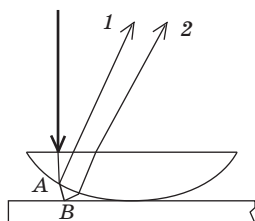
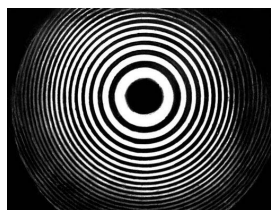


Рис. 170

Если же наблюдение ведётся в монохроматическом свете, т. е. свете одной длины волны, то максимумы будут наблюдаться в одном цвете.

Шириной интерференционной картины называется расстояние между двумя ближайшими интерференционными максимумами или минимумами.

$$b = \frac{\lambda L}{d}$$



Кольца Ньютона, интерференционные полосы равной толщины

Рис. 171

Кольца Ньютона. Явление, которое впервые описал Ньютон — **кольца Ньютон**, представляет собой интерференционную картину, возникающую в тонком слое воздуха между плоской стеклянной пластиной большого радиуса кривизны R , наложенной на эту пластину (рис. 170).

Кольца можно наблюдать в монохроматическом и белом свете.

В отражённом и проходящем свете (рис. 171).

Рассмотрим механизм возникновения интерференционной картины в отражённом свете (рис. 173).

Две когерентные волны образуются при отражении падающей волны от сферической поверхности линзы и от поверхности пластины. Геометрическая разность хода равна удвоенной толщине воздушного зазора в месте падения луча 1.

$$\Delta = 2h$$

Оптическая разность хода отличается от геометрической, так как необходимо учесть различия в условиях отражения 1 и 2 лучей.

$$\delta = 2h + \frac{\lambda}{2}$$

Значение геометрической разности хода зависит от радиуса кривизны поверхности линзы R . Можно показать, что

$$2h = \frac{r_k^2}{R}$$

Следовательно, $\delta = \frac{r_k^2}{R} + \frac{\lambda}{2}$, где r_k — радиус k -того тёмного или светлого кольца. Получим выражение для радиуса k -того тёмного кольца (k — порядковый номер кольца).

Для интерференционного минимума $\delta = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$, таким образом, $(2k+1)\frac{\lambda}{2} = \frac{r_k^2}{R} + \frac{\lambda}{2}$; $r_k = \sqrt{Rk\lambda}$.

Применение интерференции света

Явление интерференции широко используется в технике. Применяя установку «кольца Ньютона», измерив радиус k -того тёмного кольца, можно вычислить длину волны.

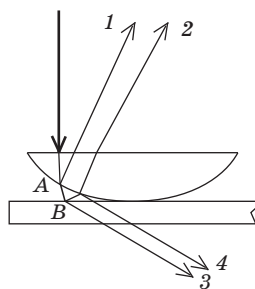


Рис. 172

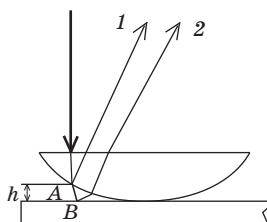


Рис. 173

С помощью специальных приборов — *интерферометров* определяют показатели преломления и длины световых волн.

Применение интерференции позволяет с большой точностью определять качество обработки поверхностей.

Используется интерференция и для *просветления оптики* в оптических приборах. Для уменьшения световых потерь на поверхность оптического стекла наносят плёнку — тонкий слой вещества, показатель преломления которого меньше показателя преломления стекла.

Толщину плёнки подбирают таким образом, чтобы отражённые от двух поверхностей пленки волны вследствие интерференции ослабляли друг друга (для них должно выполняться условие минимумов).

При этом энергия световой волны перераспределяется, и большая часть света проходит сквозь стекло.

Толщину покрытия можно выразить через длину волны света в воздухе:

$$h = \frac{\lambda}{4n}.$$

При просветлении оптики невозможно обеспечить условие минимума для световых волн всех длин. По этой причине обычно используют плёнки такой толщины, чтобы необходимые условия выполнялись для волн, длина которых соответствует средней части спектра. Это оттенки зелёного цвета, длина волны которых близки к значению $\lambda = 5,5 \cdot 10^{-7}$ м. Красный и фиолетовый участки спектра ослабляются незначительно, объективы с просветлённой оптикой имеют фиолетовый оттенок.

Дифракция света. Явление огибания волной препятствия называют **дифракцией** (рис. 174).

Теория дифракции света была разработана в 1816 г. французским учёным О. Френелем, развившим идеи Х. Гюйгенса.

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 в следующий момент времени.

Принцип Гюйгенса позволяет найти направление распространения фронта волны. Френель дополнил принцип Гюйгенса идеей об интерференции вторичных волн. Сформулированный Френелем *принцип Гюйгенса — Френеля* звучит так:

— возмущение в любой точке пространства является результатом интерференции когерентных вторичных волн, излучаемых каждой точкой фронта волны.

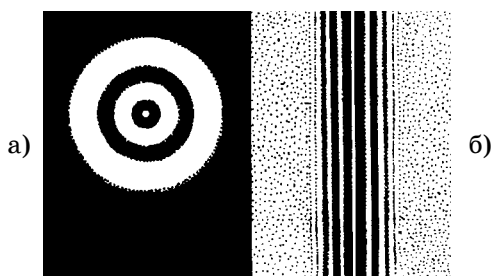


Рис. 174

а — свет проходит через круглое отверстие на экране;

б — свет проходит через узкую щель

Решить задачу дифракции — значит найти распределение интенсивности света на экране в зависимости от размеров и формы препятствий, вызывающих дифракцию.

Дифракционная решётка. Дифракционная решётка представляет собой совокупность большого числа очень узких щелей, разделённых непрозрачными промежутками.

Периодом дифракционной решётки d называется сумма ширины прозрачной щели a и непрозрачного промежутка b (рис. 175).

$$d = a + b$$

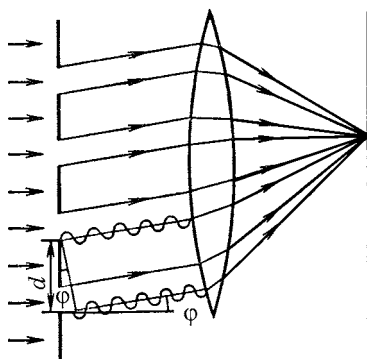


Рис. 175

Число щелей в решётке обозначим через N . Каждая щель является источником когерентных вторичных волн. Выясним условие, при котором вторичные волны, идущие от различных щелей под углом φ , усиливают друг друга.

Расстояние между соответственными источниками A_1 и B_1 равно периоду решётки d , а разность хода между ними $B_1C_1 = \Delta = d\sin\varphi$.

Главные максимумы будут наблюдаться под углом φ , определяемым условием

$$d\sin\varphi = k\lambda, \quad k = \pm 1; \pm 2; \dots$$

Чем больше длина волны, тем дальше располагаются соответствующие максимумы от центрального максимума. Положение центрального максимума не зависит от длины волны, поскольку он соответствует значению $k = 0$.

Так как положение максимумов определяется длиной волны, проходя сквозь решётку, белый свет разлагается в спектр.

Дифракционная решётка применяется в спектральных приборах для определения длины световой волны.

Дисперсия света. Дисперсия света — зависимость показателя преломления света в среде от длины волны.

Дисперсия была открыта **И. Ньютоном** в 1666 г.

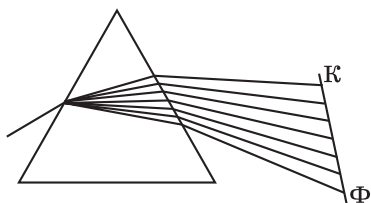


Рис. 176

Если пучок белого света падает на боковую грань призмы, то в призме происходит разложение белого света на монохроматические составляющие. Причиной такого разложения является зависимость показателя преломления от длины волны. Это означает, что показатель преломления для световых пучков красного цвета не равен показателю преломления световых пучков фиолетового цвета. Поэтому

при одном и том же угле падения углы преломления для световых пучков разного цвета будут разными (рис. 176).

Знание о сложной структуре белого света позволяет объяснить многообразие красок в природе.

Явление дисперсии применяется при создании спектральных приборов, служащих для изучения спектров излучения.

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ 26

1. Явление интерференции наблюдается

- 1) при огибании светом препятствий
- 2) при изменении направления распространения света при падении на границу двух однородных сред
- 3) при наложении когерентных световых волн
- 4) при наложении световых волн от спонтанных источников излучения

2. Две световые волны являются когерентными, если

- | | |
|-----------------------------------|--|
| 1) $v_1 = v_2$ | 3) $\Delta\varphi = 0$ |
| 2) $\Delta\varphi = \text{const}$ | 4) $v_1 = v_2, \Delta\varphi = \text{const}$ |

3. В повседневной жизни легче наблюдать:

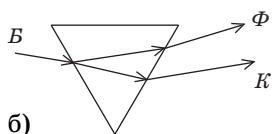
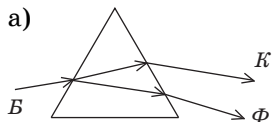
- 1) дифракцию световых волн, так как $\lambda_{\text{св}} \ll \lambda_{\text{зв}}$
- 2) дифракцию звуковых волн, так как звуковые волны — продольные, а световые — поперечные
- 3) дифракцию звуковых волн, так как $\lambda_{\text{зв}} \gg \lambda_{\text{св}}$
- 4) одинаково легко наблюдать как дифракцию звуковых, так и дифракцию световых волн

4. Дифракционная решётка с периодом d освещается нормально падающим светом с длиной волны λ . Второй главный максимум наблюдается под углом

- | | |
|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 1) $\sin\varphi = \frac{2\lambda}{d}$ | 3) $\cos\varphi = \frac{2\lambda}{d}$ |
| 2) $\sin\varphi = \frac{d}{2\lambda}$ | 4) $\cos\varphi = \frac{d}{2\lambda}$ |

5. На каком рисунке правильно представлен ход лучей при разложении белого света стеклянной призмой?

- 1) а
- 2) б
- 3) а и б
- 4) ни а, ни б



6. В опыте Юнга расстояние между отверстиями в первом экране d , расстояние до экрана, на котором наблюдается интерференционная картина L .

Установите соответствие между физическими величинами и формулами, по которым их можно рассчитать. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

- А) расстояние от центрального максимума до третьей светлой полосы
Б) ширина интерференционной полосы

ФОРМУЛЫ

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

Ответ:

А	Б

7. Свет переходит из воздуха в стекло. Как меняется частота света и длина волны? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличивается
- 2) уменьшается
- 3) не изменяется

Частота света	Длина волны

8. В опыте Юнга два отверстия освещались монохроматическим светом длиной волны 500 нм . Расстояние между отверстиями 1 мм , расстояние от отверстия до экрана 3 м . Найдите расстояние от центра экрана до первой светлой полосы.
9. Определите угол отклонения лучей зелёного света (550 нм) в спектре первого порядка, полученном с помощью дифракционной решётки, период которой равен $0,02\text{ мм}$.
10. Определите длину волны для линии в дифракционном спектре третьего порядка, совпадающей с линией спектра четвёртого порядка с длиной волны 510 нм .

ОСНОВЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

ОСНОВЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ (СТО)

1. Развитие электродинамики и оптики привело к пересмотру представлений о пространстве и времени.

Специальная теория относительности Альберта Эйнштейна — это новое учение о пространстве и времени, пришедшее на смену классическим представлениям.

В основу этой теории положены два постулата.

Принцип относительности — первый постулат специальной теории относительности:

— все физические явления при одинаковых начальных условиях протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчёта.

Это означает, что во всех инерциальных системах физические законы имеют одинаковую форму. Принцип относительности классической механики обобщается на все процессы в природе, в том числе и на электромагнитные.

Постулат постоянства скорости света — второй постулат специальной теории относительности:

— скорость света в вакууме одинакова во всех направлениях и не зависит ни от движения источника, ни от движения наблюдателя.

Следствия постулатов СТО.

Событие — физическое явление, происходящее в некоторой пространственной точке в определённый момент времени.

Два события, одновременные в одной инерциальной системе отсчёта, не являются одновременными в другой ИСО (следствие второго постулата).

Замедление времени. Собственное время — время, измеренное наблюдателем в системе отсчёта, движущееся вместе с часами — Δt_0 .

Можно показать, что неподвижный наблюдатель обнаружит замедление хода часов по сравнению с такими же часами, но находящимися в покое: $\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$.

Сокращение длин. В разных системах отсчёта один и тот же стержень имеет различную длину. Максимальную длину l_0 (собственная длина) он имеет в той системе отсчёта, в которой покоится. В системе отсчёта, по отношению к которой он движется, его длина тем меньше, чем больше скорость движения: $l = \frac{l_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$.

Релятивистский закон сложения скоростей. В СТО при переходе от одной системы отсчёта к другой закон преобразования скоростей записывается иначе, чем в классической механике: $v = \frac{v' + V}{1 + \frac{V \cdot v'}{c^2}}$, где v — скорость тела в неподвижной ИСО, v' — скорость тела в движущейся ИСО, V — скорость подвижной ИСО.

2. Элементы релятивистской динамики. Закон движения в теории относительности имеет тот же вид, что и в классической механике: $\Delta p = F \Delta t$.

Однако выражение для импульса является иным. В теории относительности релятивистский импульс имеет вид:

$$\vec{p} = \frac{m \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Релятивистским законом динамики пользуются при расчёте движения частиц в ускорителях, где скорость движения частиц близка к скорости света.

3. Взаимосвязь массы и энергии. Одним из важнейших следствий специальной теории относительности является связь между энергией и массой, играющая одну из самых главных ролей в ядерной физике и физике элементарных частиц.

Энергия тела в релятивистской механике записывается следующим образом: $E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$.

Энергия покоящегося тела (или собственная энергия частицы): $E_0 = mc^2$.

Можно показать, что между энергией покоя, импульсом и энергией свободной частицы существует связь:

$$E^2 + E_0^2 = (pc)^2.$$

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ 27

1. Какие из приведённых ниже утверждений являются постулатами СТО?

А) Скорость света в вакууме одинакова для всех инерциальных систем отсчета.

Б) Скорость света в вакууме является максимальной скоростью.

1) только А

3) А и Б

2) только Б

4) ни А, ни Б

2. Два автомобиля движутся навстречу друг другу со скоростями v_1 и v_2 относительно поверхности земли. Чему равна скорость света от фар второго автомобиля в системе отсчёта, связанной с первым автомобилем?

1) $c + (v_1 - v_2)$

3) c

2) $c - (v_1 - v_2)$

4) $c - (v_1 + v_2)$

3. Опыты по наблюдению явления электролиза раствора сернокислой меди проводились дважды. Первый раз в лаборатории на Земле, второй раз в космическом корабле, движущемся относительно Земли с постоянной скоростью. Массы серебра, выделившегося на катоде

1) существенно различаются

2) одинаковы

3) в лаборатории на Земле, чуть-чуть меньше, чем на корабле

4) на корабле равна 0

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Гипотеза Планка

Гипотеза Планка. Тела, нагретые до достаточно высокой температуры, приобретают способность светиться, излучая электромагнитные волны.

Тепловое излучение — электромагнитное излучение, испускаемое нагретыми телами за счёт своей внутренней энергии.

При решении задачи о тепловом излучении стало очевидно, что результаты, полученные с применением классической электродинамики и термодинамики, резко расходятся с экспериментом. Методы классической физики оказались недостаточными для объяснения характеристик теплового излучения. Поэтому расхождение результатов классической волновой теории с экспериментом в конце XIX в. получило название «ультрафиолетовой катастрофы».

В 1900 г. решение этой задачи было получено **Максом Планком**, который предположил, что энергия излучения и его частота связаны друг с другом. При этом излучении электромагнитных волн атомами и молекулами вещества происходит не непрерывно, а дискретно, т.е. отдельными порциями — *квантами*. Энергия излучения кванта прямо пропорциональна частоте излучения:

$$E = h\nu,$$

где $h = 6,62 \cdot 10^{-24}$ Дж · с, постоянная Планка.

Теория теплового излучения, разработанная Планком с учётом квантовой гипотезы, прекрасно согласовывалась с экспериментом.

Явление внешнего фотоэффекта. В 1897 г. Г. Герц открыл явление электризации металлических поверхностей при их освещении. Это явление получило название *фотоэффекта*.

Фотоэффект — явление вырывания электронов из твёрдых и жидких веществ под действием света.

Позднее А. Г. Столетов установил основные положения закона фотоэффекта. Принципиальная схема для исследования фотоэффекта приведена на рисунке 177.

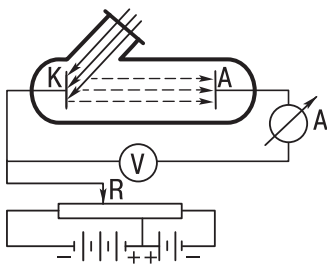


Рис. 177

Электроны, вырывающиеся с поверхности катода, попадают на анод. Через гальванометр, включённый во внешнюю цепь между катодом и анодом, начинает протекать ток даже в отсутствии разности потенциалов между ними. С увеличением разности потенциалов между анодом и катодом сила тока возрастает. При некотором напряжении все фотоэлектроны достигают анода: сила тока достигает максимального значения, называемого фототоком насыщения $I_{\text{нас}}$.

Законы внешнего фотоэффекта

1. Фототок насыщения прямо пропорционален интенсивности света, падающего на катод.
2. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно зависит от частоты света и не зависит от его интенсивности.
3. Для каждого вещества существует минимальная частота света (максимальная длина волны), называемая **красной границей фотоэффекта**, ниже которой фотоэффект невозможен.

Теоретическое объяснение явления фотоэффекта было предложено в 1905 г. А. Эйнштейном с помощью квантовой

теории. Энергия поглощённого фотона $h\nu$ идёт на совершение работы $A_{\text{вых}}$ и на сообщение кинетической энергии вылетевшему электрону.

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{m_e \cdot v^2}{2}$$

Работа выхода — минимальная работа, которую надо совершить, чтобы удалить электрон из металла.

Согласно квантовой теории свет следует рассматривать как поток фотонов. Интенсивность света пропорциональна числу фотонов и энергии каждого из них. Фотон поглощается целиком одним электроном, поэтому число фотоэлектронов пропорционально числу фотонов, следовательно, фототок насыщения пропорционален интенсивности света (рис. 178).

U_3 — задерживающее напряжение, I_n — ток насыщения.

Максимальная кинетическая энергия пропорциональна частоте света (рис. 179).

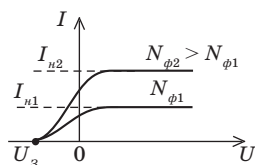


Рис. 178

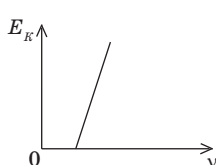


Рис. 179

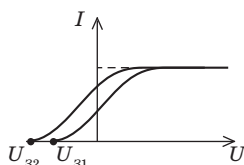


Рис. 180

Если изменить полярность источника напряжения, электрическое поле между катодом и анодом будет тормозить фотоэлектроны. При задерживающем напряжении U_3 фототок становится нулю. Задерживающее напряжение линейно зависит от частоты (рис. 180).

Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов всегда положительна. Поэтому фотоэффект будет наблюдаться для частот: $\nu \geq \frac{A_{\text{вых}}}{h}$; $\nu_{\min} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}$.

Красной границе фотоэффекта соответствует длина волны: $\lambda_{\max} = \frac{c}{\nu_{\min}} = \frac{ch}{A_{\text{вых}}}$.

Корпускулярно-волновой дуализм

Классическая физика всегда разграничивала объекты, имеющие волновую и квантовую природу. Квантовая физика не противопоставляет волновые и квантовые свойства света. Свет есть поток частиц — фотонов, обладающих как волновыми, так и квантовыми свойствами.

Чем больше фотонов попадает в окрестность данной точки, тем больше интенсивность света в ней. В область дифракционных максимумов попадает много фотонов, а в области минимумов их мало.

Корпускулярно-волновой дуализм — проявление в поведении одного и того же объекта как корпускулярных, так и волновых свойств.

Это означает, что частица массой m , движущаяся со скоростью v , характеризуется не только координатами, импульсом p и энергией E , но и подобно фотону частотой и длиной волны: $E = h\nu$; $p = \frac{h}{\lambda_B}$.

Эта гипотеза принадлежит французскому физiku де Бройлю.

Длина волны де Бройля. $\lambda_A = \frac{h}{p}$; $\lambda_A = \frac{h}{mv}$.

Наличие волновых свойств у микрочастиц означает, что можно наблюдать их интерференцию и дифракцию.

Волновые свойства электрона используют в электронном микроскопе, позволяющие получать изображение вирусов.

Соотношение неопределённостей Гейзенберга. Обнаружение волновых свойств частиц привело в 1927 г. немецкого физика В. Гейзенберга к открытию закона, управляющего всеми явлениями мира микрочастиц, — *соотношению неопределённостей*. Смысл данного соотношения заключается в том, что на уровне микромира принципиально невозможно получение точной экспериментальной информации о физических величинах, описывающих движение частицы. Так, при любой попытке всё более точного определения её координаты всё менее определёнными будут сведения об её импульсе, и наоборот, попытка точного определе-

ния импульса частицы приведёт к неопределённости её координаты.

$$\Delta x \Delta p_x \sim h$$

Согласно принципу неопределённостей теряет смысл одно из важнейших понятий классической механики — понятие траектории частицы. Ньютоновское описание движения в микромире становится невозможным.

Большую роль играет соотношение неопределённостей для энергии и времени. Чем меньше промежуток времени Δt , в течение которого протекает процесс, тем больше неопределённость в значении энергии частицы ΔE : $\Delta E \Delta t \geq h$.

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ 28

1. В каком случае электроскоп, заряженный отрицательным зарядом, быстрее разрядится? При освещении
 - А) видимым светом
 - Б) ультрафиолетовым излучением
 - 1) А
 - 2) Б
 - 3) одновременно
 - 4) электроскоп не разрядится в обоих случаях
2. Как изменится скорость фотоэлектронов при увеличении частоты падающего света, без изменения мощности излучения?
 - 1) увеличится
 - 2) уменьшится
 - 3) не изменится
 - 4) ответ неоднозначен
3. Какие из перечисленных ниже явлений можно количественно описать с помощью волновой теории?
 - А) Фотоэффект
 - Б) Световое давление

- 1) только А
 - 2) только Б
 - 3) и А, и Б
 - 4) ни А, ни Б
4. Какой из фотонов, соответствующий жёлтому или синему свету, имеет больший импульс?
- 1) жёлтому
 - 2) синему
 - 3) импульсы обоих фотонов одинаковы
 - 4) ответ неоднозначен
5. Как изменится максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов, вырываемых с поверхности катода, при увеличении частоты падающего излучения в 2 раза?
- 1) не изменится
 - 2) увеличится в 2 раза
 - 3) увеличится более чем в 2 раза
 - 4) увеличится менее чем в 2 раза
6. Как изменится максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов, вырываемых с поверхности катода, при увеличении освещенности поверхности катода в 2 раза?
- 1) не изменится
 - 2) увеличится в 2 раза
 - 3) увеличится более чем в 2 раза
 - 4) увеличится менее чем в 2 раза
7. Один лазер излучает монохроматический свет с длиной волны 300 нм, другой — с длиной волны 450 нм. Отношение масс фотонов m_1/m_2 , излучаемых лазерами, равно
- 1) 3,0
 - 2) 1,5
 - 3) 0,67
 - 4) 2,0

8. Импульс рентгеновского фотона увеличился. Как при этом изменяется длина волны фотона и энергия фотона? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличивается
- 2) уменьшается
- 3) не изменяется

Длина волны	Энергия фотона

9. Установите соответствие между записанными в первом столбце физическими величинами и формулами, по которым их можно рассчитать. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго и запишите в таблицу выбранные цифры.

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

- А) длина волны де Бройля
- Б) масса фотона

ФОРМУЛЫ

- 1) $\frac{h\nu}{c}$
- 2) $\frac{hc}{\nu}$
- 3) $\frac{hc}{m\nu}$
- 4) $\frac{h}{m\nu}$
- 5) $\frac{h}{c\lambda}$

Ответ:

А	Б

10. Работа выхода электронов из кадмия равна 4,08 эВ. Какова частота света, если максимальная скорость фотоэлектронов равна $7,2 \cdot 10^5$ м/с?

11. Определить массу фотонов с длиной волны $1,6 \cdot 10^{-10}$ м.

12. Сколько фотонов с длиной волны 520 нм в вакууме будут иметь энергию $E = 10^{-3}$ Дж?
13. Красная граница фотоэффекта для материала катода $3 \cdot 10^{14}$ Гц. Чему равна работа выхода для этого материала? Чему равна задерживающая разность потенциалов при поглощении катодом излучения с частотой $6 \cdot 10^{14}$ Гц.

ФИЗИКА АТОМА

Планетарная модель атома

Модель атома, появившаяся в результате экспериментального изучения внутренней структуры атома, была предложена в 1913 г. **Эрнстом Резерфордом**.

В соответствии с этой моделью в центре атома расположено положительно заряженное атомное ядро, в котором сосредоточена почти вся масса атома, вокруг ядра вращаются электроны. Они движутся вокруг ядра, подобно тому, как планеты обращаются вокруг Солнца. Поэтому эту модель называют *планетарной моделью*. Так как атом нейтрален, то число внутриатомных электронов, как и заряд ядра, равны порядковому номеру элемента в периодической системе (рис. 181).

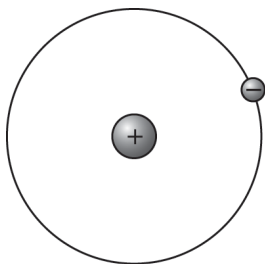


Рис. 181

Планетарная модель атома совершенно необходима для объяснения опытов по рассеянию α -частиц. Но на основе этой модели нельзя объяснить факт существования атома, его устойчивость. Движение электрона вокруг ядра по круговой орбите происходит с ускорением. Ускоренно движущаяся частица в соответствии с законами электродинамики Максвелла должна излучать электромагнитные волны. Так как излучение сопровождается потерей энергии, то электрон должен приближаться к ядру и в конце концов упасть на него. Атом должен прекратить своё существование.

В действительности этого не происходит. Атомы устойчивы и в невозбуждённом состоянии могут существовать неограниченно долго, не излучая электромагнитные волны.

К явлениям, происходящим внутри атома, законы классической физики не применимы.

Постулаты Бора

1. Выход из затруднительного положения в теории атома был найден в 1913 г. **Нильсом Бором**. В основу теории Н. Бора были положены следующие факты:

1. Квантовый характер излучения и поглощения света.
2. Планетарная модель атома.

Н. Бор в виде постулатов сформулировал основные положения новой теории.

Первый постулат — постулат стационарных состояний.

Атом может находиться только в стационарных состояниях, каждому из которых соответствует определённая энергия E_n . В стационарном состоянии атом не излучает.

В устойчивом атоме электрон может двигаться лишь по стационарным орбитам.

Правило квантования орбит: на стационарной орбите момент импульса электрона квантуется, т.е., кратен постоянной Планка.

$$m_e v r = n \cdot \frac{h}{2\pi} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

Второй постулат — правило частот.

Излучение света происходит при переходе из стационарного состояния с большей энергией E_k в стационарное состояние с меньшей энергией E_n . Энергия излученного фотона равна разности энергий стационарных состояний.

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

При поглощении света атом переходит из стационарного состояния с меньшей энергией в стационарное состояние с большей энергией.

Н. Бор применил постулаты для построения теории простейшей атомной системы — атома водорода и получил дискретные (прерывные) значения энергий стационарных состояний атома (энергетические уровни) (рис. 182).

$$E_i = -\frac{1}{n^2} \cdot \frac{me^4 2\pi^2}{h^2}$$

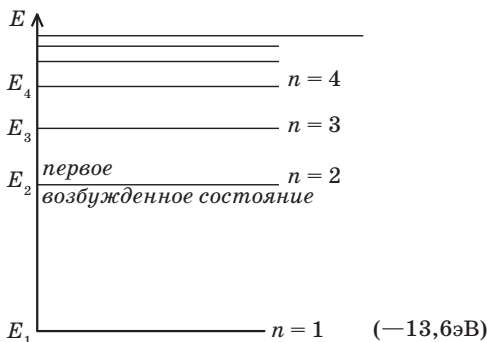


Рис. 182

На рисунке эти значения энергий отложены на вертикальных осях. В низшем энергетическом состоянии ($n = 1$)

$$E_1 = -\frac{2\pi^2 \cdot me^4}{h^2}$$

$$E_1 = -2,168 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} = -13,6 \text{ эВ.}$$

В этом состоянии атом может находиться сколь угодно долго.

Энергия ионизации — минимальная энергия, которую нужно затратить для перевода электрона из основного состояния атома в свободное состояние.

$$E_u = |E_1|$$

Для того чтобы ионизовать атом водорода, ему нужно сообщить энергию 13,6 эВ.

Спектр уровней энергии атома водорода может быть представлен следующим образом:

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} (\text{эВ}) \quad n = 1, 2, 3 \dots$$

2. Линейчатые спектры. Постулаты Бора и построенная им теория атома водорода получили блестящее подтверждение в объяснении линейчатых спектров водорода.

Из второго постулата Бора можно определить частоту электромагнитного излучения атома водорода при переходе электрона из стационарного состояния с энергией E_k в стационарное состояние с энергией E_n

$$\nu = \frac{(E_k - E_n)}{h}.$$

Спектры излучения атома водорода были изучены до того, как стало известно строение атома. Все частоты излучений атома водорода образуют ряд серий.

Название серии	Формула для вычисления частоты	Область для наблюдения
Серия Бальмера	$\nu_{kn} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{k^2} \right)$	Видимый свет
Серия Лаймана	$\nu_{kn} = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{k^2} \right)$	УФ
Серия Пашена	$\nu_{kn} = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{k^2} \right)$	ИК
Серия Пфунда	$\nu_{kn} = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{k^2} \right)$	ИК
Серия Брэкетта	$\nu_{kn} = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{k^2} \right)$	ИК

Все спектральные закономерности соответствуют переходам атомов из различных возбуждённых стационарных состояний в то или иное состояние с меньшей энергией (рис. 183).

Серия Лаймана соответствует переходу атомов из возбуждённых состояний в основное стационарное состояние ($n = 1$), серия Пашена — переходу атомов из возбуждённых

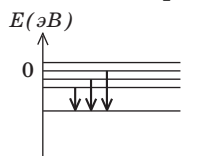


Рис. 183

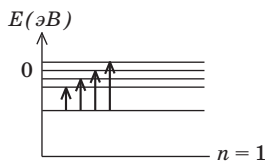


Рис. 184

состояний в стационарное состояние, соответствующее $n = 3$.

Поглощение света — процесс, обратный излучению. Атом, поглощая свет, переходит из низших энергетических состояний в высшие. При этом он поглощает излучение той же самой частоты, которую излучает, переходя из высших энергетических состояний в низшие. На рисунке изображены стрелками переходы атома из одних состояний в другие с поглощением света.

Спектральный анализ

Метод определения химического состава вещества по его спектру называют **спектральным анализом**.

Спектр		
Испускания		Поглощения
Линейчатый	Сплошной	На цветной полосе сплошного спектра находятся тёмные линии. Линии спектра поглощения располагаются в тех же местах, в которых находятся линии спектра испускания для данного вещества
Дают все вещества в газообразном состоянии	Дают раскалённые тела в твёрдом или жидком состоянии	

Лазер

Лазер — источник излучения, усиливаемого в результате индуцированного излучения.

Принцип действия лазера основан на применении вынужденного излучения, возможность существования которого была предсказана **А. Эйнштейном** в 1917 г.

Рассмотрим возможные процессы взаимодействия атомов с фотоном.

1. Поглощение света. Электрон атома, находящегося в основном состоянии с энергией E_1 , может поглотить фотон

и перейти в возбуждённое состояние (рис. 185) с энергией $E_2 > E_1$.

2. Спонтанное излучение. В отсутствие внешнего воздействия электрон, находящийся в возбуждённом состоянии, через время порядка 10^{-8} – 10^{-7} с самопроизвольно возвращается в основное состояние (рис. 186).

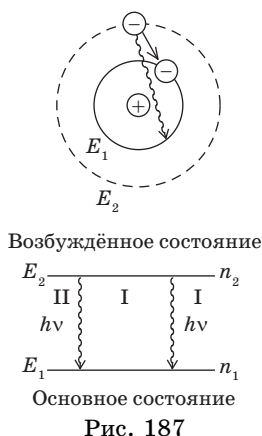
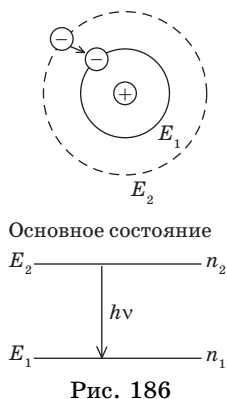
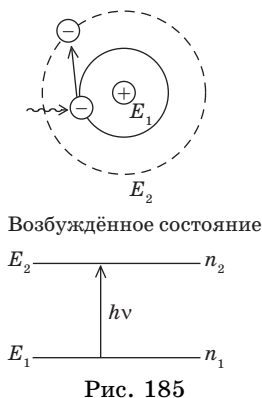
3. Индуцированное излучение. Возбуждённый атом может излучать под действием падающего на него света (рис. 187).

Спонтанное излучение — излучение, испускаемое при самопроизвольном переходе атома из возбуждённого состояния в основное.

Индуцированное излучение — излучение атома, возникающее при его переходе на более низкий энергетический уровень под действием внешнего электромагнитного излучения.

Интенсивность индуцированного излучения пропорциональна концентрации атомов, находящихся в возбуждённом состоянии. Усиление индуцированного излучения, падающего на среду, возникает тогда, когда интенсивность индуцированного излучения превысит интенсивность поглощённого излучения. Это произойдёт в случае *инверсной населённости*, если в возбуждённом состоянии находится больше частиц, чем в основном.

Инверсная населённость энергетических уровней — неравновесное состояние среды, при котором кон-



центрация атомов в возбуждённом состоянии больше, чем концентрация атомов в основном состоянии.

Спонтанное излучение препятствует накоплению атомов в возбуждённом состоянии. Этого можно избежать, создав *метастабильное состояние*.

Метастабильное состояние — возбуждённое состояние электрона в атоме, в котором он может находиться достаточно долго по сравнению с обычным возбуждённым состоянием.

В твёрдотельном рубиновом лазере с помощью мощного импульса лампы-вспышки ионы хрома переводятся из основного состояния E_1 в возбуждённое состояние E_3 (рис. 188).

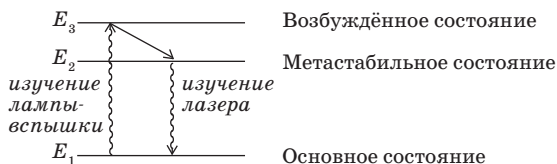


Рис. 188

Через 10^{-8} с ионы, передавая часть энергии кристаллической решётке, переходят на метастабильный энергетический уровень $E_2 < E_3$, на котором они начинают накапливаться. Случайный фотон с энергией $h\nu = E_2 - E_1$ может вызвать лавину индуцированных когерентных фотонов.

Индуктированное излучение, распространяющееся вдоль оси цилиндрического кристалла рубина, многократно отражается от его торцов и быстро усиливается.

Один из торцов рубинового стержня делают зеркальным, а другой — частично прозрачным. Через него выходит мощный импульс когерентного монохроматического излучения красного цвета с длиной волны 694,3 нм.

Особенности лазерного излучения:

- лазерное излучение обладает исключительной монохроматичностью и когерентностью;

- пучок света лазера имеет очень малый угол расхождения;

— лазер — наиболее мощный искусственный источник света.

Применение лазеров: космическая связь, светолокаторы, лазерный нож, лазерная сварка.

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ 29

1. Какое из приведённых ниже утверждений неверно описывает результаты опыта Резерфорда?

- 1) основная часть альфа-частиц рассеивалась на углы меньше 90°
- 2) основная часть альфа-частиц проходила сквозь фольгу, не меняя направления
- 3) часть альфа-частиц отклонялась на углы больше 90°
- 4) большая часть альфа отклонялась на углы больше 90°

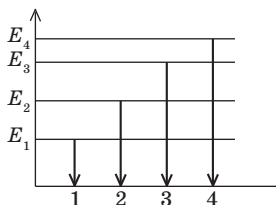
2. Атом нейтрален, когда

- 1) число протонов равно числу нейтронов
- 2) число нейтронов равно числу электронов
- 3) число протонов равно числу электронов
- 4) число нейтронов равно порядковому номеру данного элемента в таблице Менделеева

3. Чему равна частота фотона, излучаемого при переходе из возбужденного состояния E_1 в основное состояние E_0 ?

- | | |
|--------------------|----------------------------|
| 1) $\frac{E_1}{h}$ | 3) $\frac{(E_1 - E_0)}{h}$ |
| 2) $\frac{E_0}{h}$ | 4) $\frac{(E_1 + E_0)}{h}$ |

4. На рисунке представлена диаграмма энергетических уровней атома. Какой цифрой обозначен переход с излучением фотона максимальной частоты?



5. Сколько фотонов с различной частотой могут испускать атомы водорода, находящиеся во втором возбуждённом состоянии?

2 _____
1 _____
0 _____

1) 1 2) 2 3) 3 4) 6

6. Энергия ионизации атома водорода равна E_0 . Какую минимальную энергию нужно затратить, чтобы электрон перешёл из основного в первое возбуждённое состояние?

1) $\frac{E_0}{4}$ 2) $\frac{E_0}{2}$ 3) $\frac{3}{4} \cdot E_0$ 4) $\frac{7}{8} \cdot E_0$

7. В каких агрегатных состояниях и при каких условиях вещество испускает свет с линейчатым спектром?

1) в газообразном состоянии, при высокой температуре
2) в газообразном состоянии, при низкой температуре
3) в жидком состоянии, при высокой температуре
4) в любом состоянии, при высокой температуре

8. Установите соответствие между записанными в первом столбце физическими величинами формулами, по которым их можно рассчитать.

К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго и запишите в таблицу выбранные цифры.

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

А) длина волны де Бройля

Б) частота фотона, излучаемого при переходе из возбуждённого состояния E_2 в основное состояние E_1

ФОРМУЛЫ

1) $\frac{(E_2 + E_1)}{h}$

2) $\frac{E_1}{hc^2}$

3) $\frac{ch}{E_1}$

4) $\frac{E_1}{h}$

5) $\frac{(E_2 - E_1)}{h}$

Ответ:

А	Б

9. Определите импульс фотонов, излучаемых атомом водорода при переходе из стационарного состояния с энергией $E_m = -0,85$ эВ в состояние с энергией $E_n = -3,4$ эВ.
10. Покоившийся атом водорода испустил фотон при переходе из стационарного состояния с энергией $E_m = -1,51$ эВ в состояние с энергией $E_n = -13,6$ эВ. Какую скорость приобрёл атом водорода, если его масса равна $1,67 \cdot 10^{-27}$ кг?

ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

Протонно-нейтронная модель ядра

В 1932 г. Д.Д. Иваненко и В. Гейзенберг предложили протонно-нейтронную модель ядра. Согласно этой модели, атомное ядро состоит из **нуклонов**. По представлениям современной физики нуклон может находиться в двух зарядовых состояниях.

		Масса	Заряд	Обозначение
Нуклон	Протон	$1,6726231 \cdot 10^{-27}$ кг = $= 1,007276470$ а.е.м.	$+1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл	${}^1_1\text{p}$
	Нейтрон	$1,6749286 \cdot 10^{-27}$ кг = $= 1,008664902$ а.е.м.	0	${}^1_0\text{n}$

Так как атом нейтрален, то число Z протонов в ядре (зарядовое число), имеющих заряд $(+Ze)$, равно числу Z электронов с полным зарядом $(-Ze)$, движущихся вокруг ядра.

A — число нуклонов в ядре.

Z — число протонов в ядре.

N — число нейтронов в ядре.

$A = Z + N$; A — массовое число.

${}_Z^AX$ — обозначение ядра химического элемента.

Изотопы. Энергия связи ядер. Ядерные силы

1. Изотопы. Существуют ядра атомов с одинаковым числом протонов, но различным числом нейтронов — это *изотопы* $Z_1 = Z_2$; $N_1 \neq N_2$; $A_1 \neq A_2$.

Химические свойства изотопов одинаковы, но физические свойства у них различны.

2. Энергия связи ядер. Ядерные силы. Протоны и нейтроны удерживаются в ядре в результате сильного ядерного взаимодействия. Это взаимодействие притяжения.

Основные свойства ядерных сил:

— короткодействие (на расстоянии 10^{-15} м ядерные силы примерно в 100 раз больше электростатического взаимодействия, на расстоянии 10^{-14} м эти силы становятся ничтожно малыми);

— зарядовая независимость.

Важнейшую роль в ядерной физике играет понятие *энергии связи ядра*.

Энергию, необходимую для полного разделения ядра на отдельные нуклоны, называют энергией связи ядра.

На основании закона сохранения энергии верно и обратное утверждение: *энергия связи ядра равна той энергии, которая выделяется при образовании ядра из отдельных частиц*.

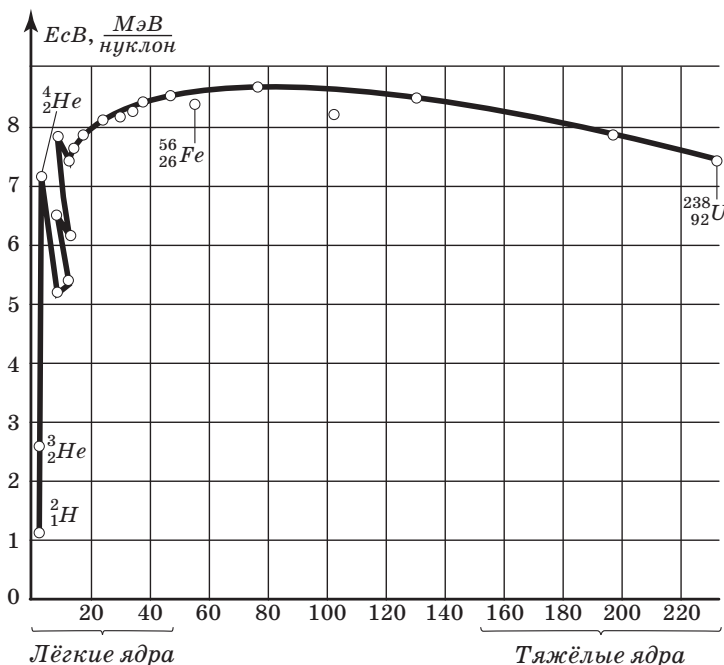
Для каждого химического элемента характерна собственная энергия связи, зависящая от числа входящих в его состав нуклонов. Разделив полную энергию связи ядра на число нуклонов в нём, получим *удельную энергию связи*. Эта физическая величина характеризует устойчивость атомных ядер и определяется экспериментально.

При расщеплении тяжёлых ядер образуются ядра более лёгких элементов. Выделяющаяся в этом процессе энергия равна разности энергий связи вновь образовавшихся элементов и распавшегося ядра.

При синтезе двух лёгких ядер может образоваться новое более тяжёлое ядро, энергия связи которого существенно больше. В этом случае также выделяется значительная энергия.

Энергия связи ядра рассчитывается по формуле:

$$\Delta E = (Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}})c^2$$



Зависимость удельной энергии связи
от числа нуклонов в ядре

Радиоактивность. Закон радиоактивного распада

1. Радиоактивностью называется процесс превращения ядер атомов одних химических элементов в ядра атомов других, сопровождающейся испусканием частиц и электромагнитным излучением.

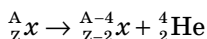
Процесс, происходящий самопроизвольно, называется **естественной радиоактивностью**. Такой вид радиоактивности наблюдается у нестабильных изотопов с зарядовым числом $Z > 83$ или массовым числом $A > 209$, существующих в природе.

Искусственная радиоактивность — самопроизвольный распад атомных ядер, полученных искусственным путем через соответствующие ядерные реакции.

Э. Резерфорд, пропустив радиоактивное излучение через магнитное поле, установил неоднородность радиоактивного излучения.

α -распад — самопроизвольный распад атомного ядра на дочернее ядро и α -частицу (ядро атома гелия ${}^4_2\text{He}$).

Правило смещения для α -распада:



β^- — бета-минус-распад — это радиоактивный распад, сопровождающийся испусканием из ядра электрона и электронного антинейтрино. Электрон не входит в состав ядра, а рождается в процессе распада. В основе β^- -распада процесс превращения нейтрона в протон: ${}_0^1 n \rightarrow {}_1^1 p + {}_{-1}^0 e + \nu_e$

Правило смещения для β^- -распада: ${}_Z^A x \rightarrow {}_{Z+1}^A x + {}_{-1}^0 e$

Существуют другие типы β -распада. В β^+ -бета — плюс распада (позитронном распаде) ядро испускает позитрон и электронное нейтрино: ${}_1^1 p \rightarrow {}_0^1 n + {}_{+1}^0 e + \nu_e$.

Правило смещения для β^+ -распада ${}_Z^A x \rightarrow {}_{Z-1}^A x + {}_{+1}^0 e$.

γ -распад — электромагнитное излучение (длина волны $\lambda = 10^{-10}$ – 10^{-3} м), возникает при переходе ядра из возбуждённого состояния в более низкое энергетическое состояние.

Образующиеся в результате α - и β -распадов дочерние ядра могут быть также радиоактивными. Эти ядра будут распадаться до тех пор, пока не образуется стабильное ядро.

Вся совокупность радиоактивных изотопов, возникающих в серии радиоактивных превращений, образует **радиоактивное семейство**.

2. Закон радиоактивного распада.

N_0 — число нераспавшихся ядер, содержащихся в образце в начальный момент времени ($t = 0$).

N — число нераспавшихся ядер, содержащихся в образце в произвольный момент времени t .

Период полураспада — промежуток времени, за которое распадается половина первоначального числа атомов $\left(T_{\frac{1}{2}}\right)$.

В произвольный момент времени t число нераспавшихся радиоактивных ядер:

$$N = N_0 2^{-t/T}$$

Закон убывания числа радиоактивных ядер со временем — **закон радиоактивного распада** (рис. 189).

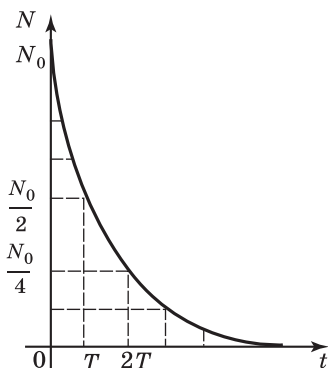


Рис. 189

Число распавшихся за время t ядер: $|N| = N_0 - N$

$$|\Delta N| = N_0 (1 - 2^{-t/T})$$

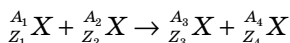
Ядерные реакции

Искусственные превращения атомных ядер, вызванные их взаимодействием с различными частицами или друг с другом, называют **ядерными реакциями**.

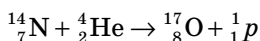
Ядерные реакции протекают в соответствии с законами сохранения электрического заряда и массового числа:

$$\begin{aligned} Z_1 + Z_2 &= Z_3 + Z_4 \\ A_1 + A_2 &= A_3 + A_4 \end{aligned}$$

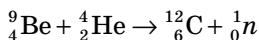
Общая схема ядерной реакции:



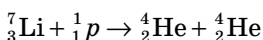
Первая ядерная реакция была осуществлена Э. Резерфордом в 1919 г.



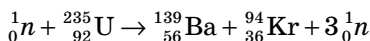
В 1932 г. Дж. Чэдвик экспериментально доказал существование нейтрона. Частица возникала в ядерной реакции при облучении бериллия α -частицами:



Первое расщепление ядра, выполненное с помощью быстрых протонов, было осуществлено на реакции:



Особый тип реакций на медленных нейтронах. При бомбардировке ядра изотопа урана-235 медленными нейтронами образуются элементы, расположенные в средней части таблицы Д.И. Менделеева. Реакция деления ядер урана может быть, например, следующей:



Впервые подобная реакция была осуществлена в конце 30-х годов прошлого века российскими физиками Г.Н. Флёровым и К.Л. Петряком и немецкими физиками О. Ганном и Ф. Штрассманом.

Особенно важным является то, что в результате распада ядер урана образуются новые нейтроны. Эти нейтроны при определённых условиях могут продолжить деление ядер урана. Реакцию, в которой частицы, вызывающие её, образуются как продукты реакции, называют *цепной ядерной реакцией* (рис. 190).

Минимальную массу урана, при которой возможна управляемая цепная реакция, называют *критической массой*.

При делении ядер урана на два осколка освобождается энергия примерно 1 Мэв/нукл. Всего при делении ядра урана, содержащего более 200 нуклонов, выделяется энергия порядка 200 Мэв. При делении ядер, содержащихся в 1 г урана, выделяется $5 \cdot 10^{23}$ Мэв.

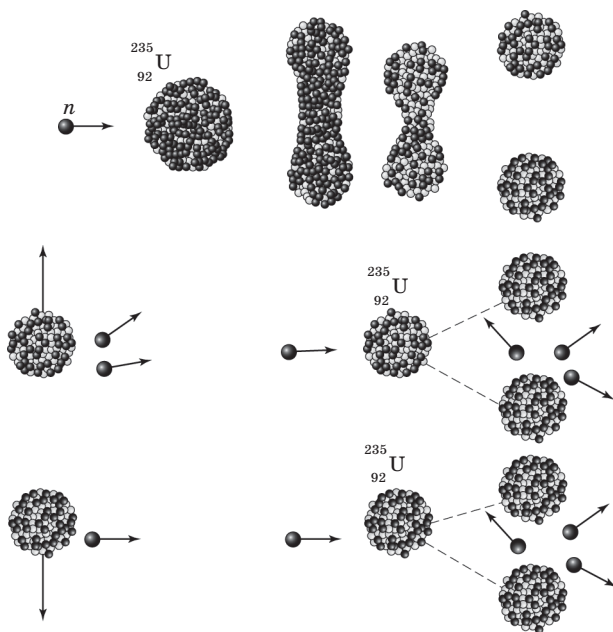
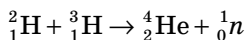


Рис. 190

Энергия выделяется и в реакциях соединения лёгких ядер. Для слияния одноимённо заряженных протонов в ядро необходимо преодолеть кулоновские силы отталкивания. Это возможно только при достаточно больших скоростях сталкивающихся частиц, т.е. при температурах порядка 10^8 К. Поэтому реакция синтеза атомных ядер при очень высоких температурах называется **термоядерной**.

Наиболее энергетически эффективной является синтез ядер гелия из ядер изотопов водорода — дейтерия и трития:



Выделяющаяся энергия в расчёте на один нуклон составляет 3,5 МэВ, т.е. приблизительно в 3,5 раза больше, чем в ядерной реакции деления. При синтезе 1 г гелия выделяется энергия $2,6 \cdot 10^{14}$ МэВ.

Такие реакции в природных условиях могут происходить в недрах звёзд. В центре Солнца она достигает примерно 13 млн градусов, при этом вещество находится в состоянии плазмы. При столкновении быстро движущихся частиц плазмы происходит ядерный синтез. Высвобождающаяся в результате реакции энергия поддерживает высокую температуру плазмы, и реакции термоядерного синтеза продолжают бесконечно.

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ 30

1. Ядро атома можно однозначно описать с помощью массового числа A и зарядового Z . Сколько протонов входит в состав ядра?

- | | |
|------------|------------|
| 1) Z | 3) $A + Z$ |
| 2) $A - Z$ | 4) $Z - A$ |

2. Чему равно число протонов и нейтронов в изотопе бора ${}^{11}_5\text{B}$?

- | | |
|-------------------------|------------------------|
| 1) $Z = 5 \quad N = 11$ | 3) $Z = 5 \quad N = 6$ |
| 2) $Z = 11 \quad N = 5$ | 4) $Z = 6 \quad N = 5$ |

3. При радиоактивном превращении ядра оно не изменяет своего заряда и полного числа нуклонов. Какая частица вылетает из ядра при таком превращении?

- 1) протон
- 2) фотон
- 3) нейтрон
- 4) альфа-частица

4. Между протонами в ядре действуют кулоновские F_K , гравитационные F_G и ядерные $F_{\text{я}}$ силы. Каковы соотношения между модулями этих сил?

- 1) $F_{\text{я}} > F_K \gg F_G$
- 2) $F_{\text{я}} \approx F_K \gg F_G$
- 3) $F_{\text{я}} \approx F_K \approx F_G$
- 4) $F_K > F_{\text{я}} \gg F_G$

5. Что представляет собой альфа-излучение?

- 1) поток ядер водорода
- 2) поток нейтронов
- 3) поток ядер гелия
- 4) поток быстрых электронов

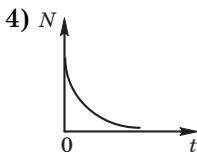
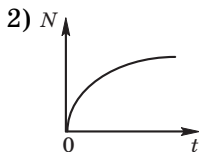
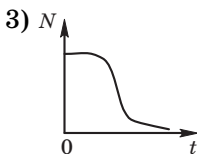
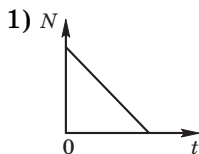
6. Какой порядковый номер в таблице Менделеева имеет элемент, который получен в результате альфа-распада ядра элемента с порядковым номером Z ?

- 1) $Z + 2$
- 2) $Z - 2$
- 3) $Z - 4$
- 4) $Z + 4$

7. Какие параметры химического элемента изменяются при испускании гамма-кванта?

- 1) изменяется только энергия ядра атома
- 2) изменяется только порядковый номер
- 3) изменяется только массовое число
- 4) изменяется и массовое число и порядковый номер

8. Какой из графиков соответствует зависимости числа N нераспавшихся ядер радиоактивного образца от времени t ?



9. Ядро какого элемента образуется после двух последовательных альфа-распадов из ядра $^{252}_{102}\text{No}$?

- 1) $^{248}_{98}\text{Cf}$
- 2) $^{248}_{100}\text{Fm}$
- 3) $^{248}_{96}\text{Cm}$
- 4) $^{244}_{98}\text{Cf}$

10. Через какое время число атомов радиоактивного изотопа уменьшится в 4 раза, если T -период полураспада?

- 1) $\frac{T}{2}$ 2) T 3) $2T$ 4) $4T$

11. Какая энергия выделяется при аннигиляции электрона и позитрона?

- 1) $m_e c$ 2) $\frac{m_e c^2}{2}$ 3) $m_e c^2$ 4) $2m_e c^2$

12. В ядерном реакторе цепочка ядерных реакций начинается с захвата быстрого нейтрона. Как изменяются при захвате нейтрона следующие характеристики ядра: массовое число (А) и заряд ядра (Б)?

Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличится
2) уменьшится
3) не изменится

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры могут повторяться.

Ответ:

А	Б

13. Активность радиоактивного элемента уменьшилась в 4 раза за 8 дней. Найти период полураспада.

14. Атомная электростанция мощностью 500 МВт имеет КПД 20%. Сколько ядерного горючего расходуется станцией за сутки, если принять, что один атом ${}_{95}^{235}\text{U}$ при делении на два осколка выделяет 200 МэВ энергии?

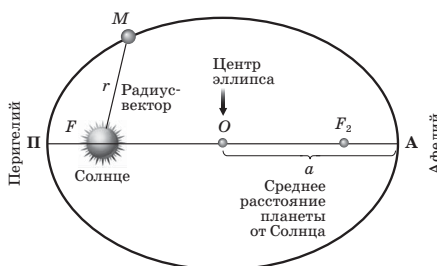
ЭЛЕМЕНТЫ АСТРОНОМИИ

НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА

1. Эллипс. Свойства эллипса

Эллипсом называют замкнутую кривую линию на плоскости, обладающую следующим свойством: сумма расстояний от каждой её точки до двух данных точек F_1 и F_2 , называемых фокусами, есть величина постоянная.

Эксцентриситетом называют отношение расстояния между фокусами эллипса к его большой оси:



$$e = F_1 F_2 / 2a$$

$0 < e < 1$ — эллипс

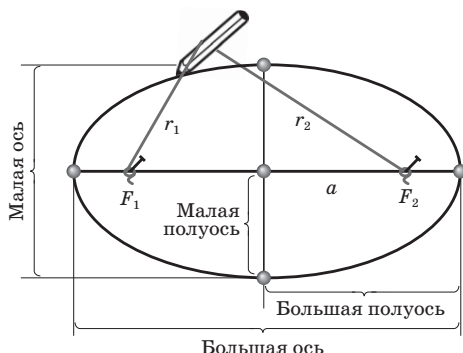
$e > 1$ — гипербола

$e = 0$ — окружность

$e = 1$ — парабола

2. Законы движения планет

Первый закон Кеплера. Орбита каждой планеты есть эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце.

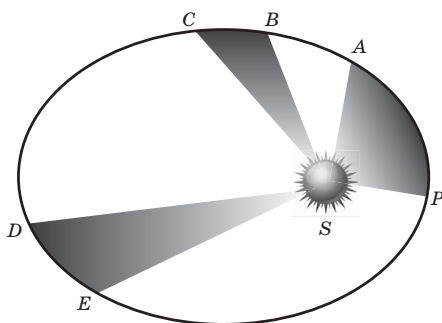


На рисунке 2 изображена орбита планеты M в виде эллипса с Солнцем в одном из фокусов F_1 . Центр эллипса находится в точке O , большая ось $AP = 2a$, полуось $AO = OP = a$.

Ближайшую к Солнцу точку P орбиты называют **перигелием**, а наиболее удалённую точку A — **афелием**.

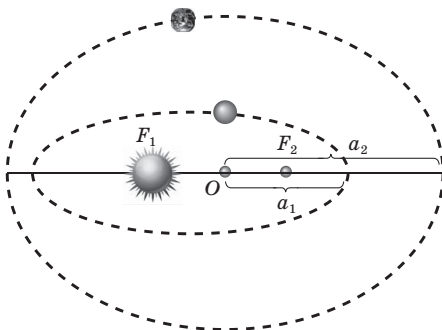
При движении планеты M вокруг Солнца её гелиоцентрическое расстояние (расстояние от Солнца) равно модулю радиус-вектора: $r = F_1M$. Перигельное расстояние $q = a(1 - e)$, афелие расстояние $Q = a(1 + e)$. Первому закону Кеплера подчиняются также движения комет и астероидов.

Второй закон Кеплера. Радиус-вектор каждой планеты описывает за равные промежутки времени равные площади.



Третий закон Кеплера. Квадраты периодов обращения планет относятся как кубы больших полуосей их орбит.

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}.$$



3. Ускорение свободного падения

$$g = G \frac{M}{(R+h)^2} \text{ при } h = 0, \text{ т.е. на поверхности планеты.}$$

$$g = G \frac{M}{R^2}, \quad G \text{ — гравитационная постоянная.}$$

Если планета шар радиуса R , имеющая среднюю плотность ρ , то масса планеты $M = \rho V$, а её объём $V = 4\pi R^3/3$. Ускорение свободного падения на поверхности планеты

$$g = 4\pi G \rho \frac{R}{3}$$

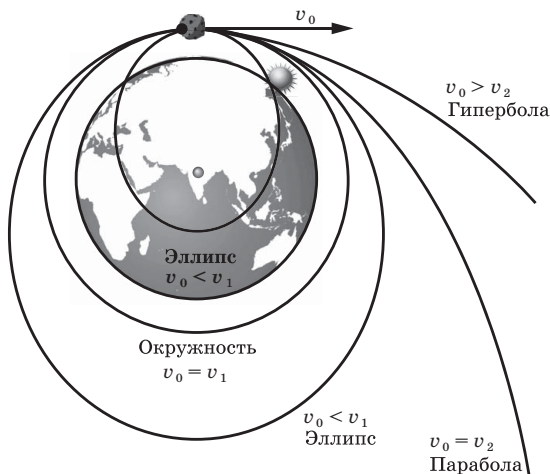
4. Космические скорости

Первая космическая скорость. Чтобы тело не упало на планету, а стало искусственным спутником, т. е. двигалось вокруг планеты по круговой орбите и не высоко над её поверхностью, ему нужно сообщить первую космическую скорость.

$$v_1 = v_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{GM}{R}}.$$

Вторая космическая скорость. Чтобы тело могло покинуть поле тяготения планеты, ему необходимо сообщить вторую (параболическую) скорость.

$$v_2 = v_n = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{2} \cdot v_1.$$



СТРОЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

1. Характеристики планет Солнечной системы

На- звание плане- ты	Сред- нее рас- стояние от Солнца (в а.е.)	Диа- метр в рай- оне эква- тора, км	На- клон оси вра- щения	Период обра- щения вокруг Солнца (сутки)	Период враще- ния во- круг сво- ей оси	Сред- няя плот- ность, г/см ³	Первая косми- ческая ско- рость, км/с
Планеты земной группы							
Мер- курий	0,39	4 878	28	87,97	58,6 су- ток	5,43	2,97
Вене- ра	0,72	12 104	3	224,7	243 суток 3 часа 50 минут	5,25	7,25
Зем- ля	1,00	12 756	2 327	365,3	23 часа 56 ми- нут	5,52	7,89
Марс	1,52	6 794	2 359	687	24 часа 37 ми- нут	3,93	3,55
Планеты-гиганты							
Юпи- тер	5,2	142 800	305	11 лет 314 суток	9 часов 55,5 минут	1,33	42,1
Са- турн	9,54	119 900	2 644	29 лет 168 суток	10 часов 40 минут	0,71	25,0
Уран	19,19	51 108	8 205	83 года 273 суток	17 часов 14 минут	1,24	15,7
Неп- тун	30,52	49 493	2 848	164 года 292 суток	17 часов 15 минут	1,67	17,5

1 а.е. =150 000 000 км

2. Современные представления о Солнечной системе

Солнечная система простирается почти до границы облака Орта и кончается там, где притяжение Солнца сравнивается с притяжением соседних звёзд.

Планеты Земной группы. Планеты Земной группы состоят из тяжёлых химических элементов. Медленно вращаются, имеют мало спутников. Меркурий, Венера и Марс по внутреннему строению похожи на Землю.

	Меркурий	Венера	Земля	Марс
Масса	0,056МЗ	0,815МЗ	1	0,107МЗ
Атмосфера	нет	есть (96% CO ₂)	есть (78% N ₂ , 21% O ₂)	есть (95% CO ₂)
Температура	На дневной стороне планеты в афелии — 287 °С, в перигелии — 417 °С. На ночной стороне — 173 °С	Самая горячая планета до 480 °С		средняя –65 °С на полюсах до –150 °С
Спутники	нет	нет	1 (Луна)	2 (Фобос и Деймос)
Магнитное поле	нет	нет	есть	есть

Планеты-гиганты. Планеты-гиганты состоят в основном из лёгких химических элементов — водорода и гелия, удерживают вокруг себя по несколько десятков спутников. Быстро вращаются. Обладают сильным магнитным полем и все имеют гигантские кольца вокруг себя.

	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун
Масса	318МЗ	95,2МЗ	14,5МЗ	17,2МЗ
Спутники	63	56	26	13

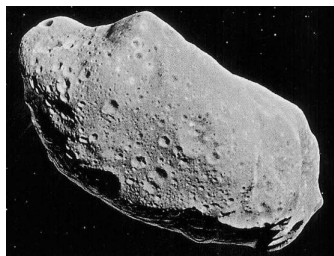
	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун
Атмосфера	Мощные протяжённые атмосферы, состоящие в основном из молекулярного водорода и содержащие также гелий, метан, аммиак и воду.			
Магнитное поле	есть	есть	есть	есть
Кольца	есть	есть	есть	есть

Планеты-карлики. За орбитой Нептуна располагаются объекты нового класса планет-карликов. (Плутон и другие объекты с размерами 1–2 тыс. км). К ним относится астероид Церера.



Малые тела Солнечной системы

Астероиды. Между орбитами Марса и Юпитера движутся около 100 000 астероидов. На их движение большое влияние оказывает притяжение Юпитера.



Исследования показали, что астероиды — небольшие бесформенные тела.

Самый крупный из них — Паллада — имеет в поперечнике 610 км. Некоторые астероиды имеют орбиту, пересекающую орбиту Земли.

Общая масса всех астероидов существенно меньше массы любой планеты.

Кометы. Яркие кометы наблюдаются сравнительно редко, в среднем одна комета за 10–15 лет. Слабые же по блеску кометы появляются часто; на фотографиях звёздного неба ежегодно обнаруживают десятки комет.

На больших расстояниях от Солнца кометы представляют собой глыбы твёрдого вещества из льда, застывших газов и пыли, частиц метеорного вещества. При приближении к Солнцу лёд начинает таять и испаряться, вокруг ядра кометы, размеры



которого не превышают десятков километров, образуется протяжённая оболочка — **кома**. Под действием давления солнечного света и солнечного ветра часть газов и пылинок комы отталкивается в сторону, противоположную Солнцу, образуя хвост кометы.

Массы комет оцениваются в 10^{15} – 10^{18} кг. В конце концов комета теряет вещество и разрушается на части.

Метеоры и метеориты. Метеоры — это вспыхивающие в земной атмосфере при вторжении в неё извне мельчайшие твёрдые частицы.

В межпланетном пространстве хаотически движется множество таких частиц, получивших общее название **метеорных тел**, или микрометеоритов. Массы подавляющего большинства таких тел измеряются десятками и тысячными долями грамма и в редких случаях — несколькими граммами. Скорости их движения относительно Земли различны, но обычно не превышают 10–15 км/с. Попадая в земную атмосферу, они не испытывают резкого торможения и либо остаются взвешенными в ней, либо медленно оседают на земную поверхность. Но если в атмосферу влетает частица со скоростью свыше 30 км/с, то из-за трения о воздух она быстро раскаляется, вспыхивает и порождает метеор.

Чем больше масса и скорость частицы, тем ярче метеорная вспышка. В среднем по всему небу за 1 час появляются 5–6 ярких метеоров.

Большинство метеоров вспыхивает на высоте 70–80 км над земной поверхностью, полностью распыляясь в атмосфере. При своём движении в атмосфере метеорные частицы вызывают свечение молекул воздуха. Поэтому яркие метеоры оставляют после себя светящиеся следы, иногда видимые на протяжении нескольких секунд.

Помимо отдельных метеорных частиц, вокруг Солнца движутся целые их рои, называемые метеорными потоками. Они порождены распадающимися или уже распавшимися кометами. Каждый метеорный рой обращается вокруг Солнца с постоянным периодом, равным периоду обращения породившей этот рой кометы, и многие из них в определённые дни года встречаются с Землёй. В эти дни число метеоров значительно возрастает, а если метеорный рой компактный, то наблюдаются метеорные, или звёздные, дожди, когда в одной ограниченной области неба за одну минуту вспыхивают сотни метеоров.

Многие метеорные потоки связаны с кометами. Так, помимо пыли и мелких частиц, в межпланетном пространстве движется множество твёрдых тел размерами от нескольких сантиметров до десятков метров (условной границей считается 30 м). Они получили название **метеороидов**. Самый крупный железный метеорит Гоба найден на территории Намибии; он имеет размеры $3 \times 3 \times 1$ м и массу 60 т.

По химическому составу метеориты делятся на три группы: каменные, железокаменные и железные. В каменных метеоритах содержится около 70% кислорода и кремния, немного железа, магния и других элементов. В железокаменных — около половины железа, 40% кислорода, магния и кремния. Железные метеориты на 91% состоят из железа и на 8% — из никеля. Никаких новых химических элементов, неизвестных на Земле, в метеоритах не найдено, что полностью подтверждает единство вещества как на Земле, так и вне её.

На месте падения крупных метеоритов образуются метеоритные кратеры значительных размеров. Такие кратеры обнаружены в Аризоне (США), Канаде, на Таймыре (Россия) и в других местах. Например, Аризонский метеоритный кратер имеет диаметр 1207 м, глубину 174 м и высоту окружающего его вала от 40 до 50 м.









Метеориты падают не только на Землю, но и на другие планеты и их спутники. При отсутствии у планет и их спутников атмосферы даже небольшие метеориты, падающие с большой скоростью на поверхность этих тел, взрываются, плавят поверхность и образуют на ней кратеры внушительных размеров. Крупные метеориты могут образовать кратеры диаметром в несколько десятков километров. Это подтверждается обилием метеоритных кратеров на поверхностях Луны, Меркурия, Марса и спутников Марса, Юпитера, Сатурна и Урана.

ЗВЁЗДЫ

1. Характеристики звёзд

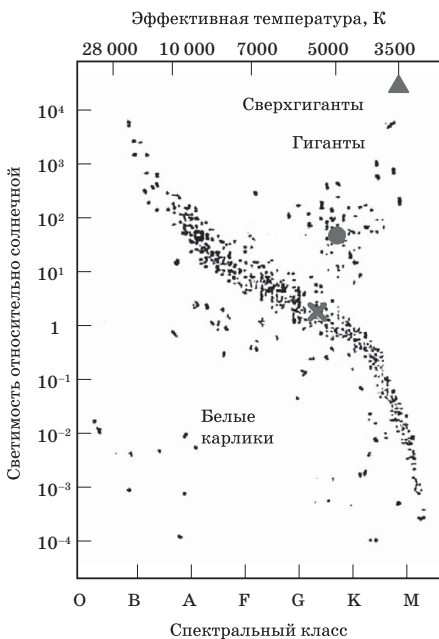
Звезда — это пространственно обособленный гравитационно связанный непрозрачный для излучения космический объект, в котором в значительных масштабах происходили, происходят или будут происходить термоядерные реакции превращения водорода в гелий.

По температуре, цвету и виду спектра все звёзды разбили на спектральные классы, которые обозначаются буквами О, В, А, F, G, К, М.

ζ Pup		О Наос
γ Ori		В Беллактрис
α CMa		А Сириус
α CMi		F Процион
α Aur		G Капелла
α Boo		К Арктур
α Ori		М Бетельгейзе
ο Cet		М Мира

Спектральная классификация звёзд

Спектральный класс	Цвет	Температура, К	Типичные звёзды
O	Голубой	40 000	Наос (ζ Кормы)
B	Белый, голубой	25 000	Беллактрис (γ Ориона)
A	Белый	10 000	Сириус
F	Жёлтый, белый	8000	Альтаир (α Орла)
G	Жёлтый	6000	Солнце
K	Жёлтый, оранжевый	4500	Альдебаран (α Тельца)
M	Оранжевый, красный	3000	Бетельгейзе (α Ориона)



- ✕ — Солнце
- — Поллукс
- ▲ — Бетельгейзе

2. Диаграмма «Спектр — светимость» (диаграмма Герцшпрунга — Рессела). Существует связь между спектральным классом звезды и её светимостью, которая представляется в виде диаграммы «Спектр — светимость».

На диаграмме чётко выделяются четыре группы звёзд:

- **главная последовательность.** На неё ложатся параметры большинства звёзд. К звёздам главной последовательности относятся Солнце, Сириус. Плотности звёзд главной последовательности сравнимы с солнечной плотностью;

- **красные гиганты.** К этой группе в основном относятся звёзды красного цвета с радиусами, в десятки раз превышающими солнечный, например звезда Арктура (α Волопаса), радиус которой превышает солнечный в 25 раз, а светимость — в 140 раз;

- **сверхгиганты.** Звёзды со светимостями, в десятки и сотни тысяч раз превышающими солнечную. Радиусы этих звёзд в сотни раз превышают радиус Солнца. К сверхгигантам красного цвета относится Бетельгейзе. При массе примерно в 15 раз больше солнечной её радиус превышает солнечный почти в 1000 раз. Средняя плотность этой звезды составляет всего $2 \cdot 10^{-4}$ кг/м³, что более чем в 60 000 раз меньше плотности воздуха;

- **белые карлики.** Группа звёзд в основном белого цвета со светимостями в сотни и тысячи раз меньше солнечной. Эти звёзды имеют радиусы почти в сто раз меньше солнечного и по размерам сравнимы с планетами. Примером белого карлика служит звезда Сириус В — спутник Сириуса. При массе, почти равной солнечной, и размере в 2,5 раза больше Земли имеет гигантскую среднюю плотность $\rho = 3 \times 10^5$ т/м³.

- **коричневые карлики.** Новый многочисленный класс звёзд с низкой температурой поверхности, излучающих в основном в инфракрасных лучах, имеют массы, всего в десятки раз превышающих массу планеты Юпитер. Так, самый холодный коричневый карлик, обнаруженный в созвездии Лиры, имеет температуру поверхности от -23 °С до 127 °С.

3. Массы звёзд

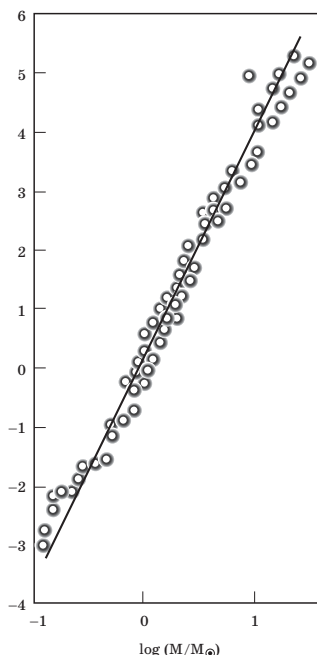
Массы звёзд удалось измерить только у звёзд, входящих в состав двойных систем. Масса определялась по параметрам орбит звёзд и периоду их обращения вокруг друг друга с использованием третьего обобщённого закона Кеплера. Оказалось, что массы всех звёзд лежат в пределах $0,05M_e < M < 100M_e$.

Для звёзд главной последовательности имеется связь между массой звезды и её светимостью: чем больше масса звезды, тем больше её светимость.

$$L \approx L_e \cdot \left(\frac{M}{M_e} \right)^4.$$

Так, звезда спектрального класса В имеет массу около $M \approx 20M_e$ и её светимость почти в 100 000 раз больше солнечной.

**Диаграмма «Масса — светимость»
для звёзд главной последовательности**

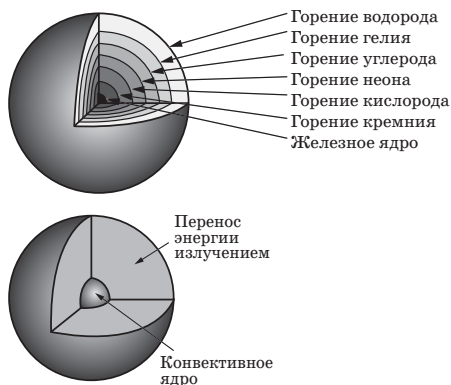


4. Внутреннее строение звёзд

У всех звёзд главной последовательности источником энергии являются термоядерные реакции синтеза гелия из водорода. Но эффективность этих реакций сильно зависит от температуры: чем больше масса звезды, тем выше температура в её недрах и тем выше темп выделения энергии.

Строение звёзд, главные последовательности. Звёзды с массами, меньшими или сравнимыми с солнечной, устроены, как Солнце. При температурах в центре выше 16×10^6 К темп энерговыделения настолько велик, что излучение не успевает уносить энергию из центральных областей звезды, и происходит *конвективный перенос*.

Нагретые массы вещества поднимаются к верхним слоям звезды, а охлаждённые опускаются вниз и вновь нагреваются, т.е. у звёзд более массивных, чем Солнце, отсутствует зона лучистого переноса энергии, а конвективная зона начинается прямо из центра звезды.



Звёзды главной последовательности

Строение красных гигантов и сверхгигантов. Отличительной особенностью этих звёзд является отсутствие ядерных реакций в самом центре, несмотря на высокие температуры. Ядерные реакции протекают в тонких слоях вокруг плотного центрального ядра.

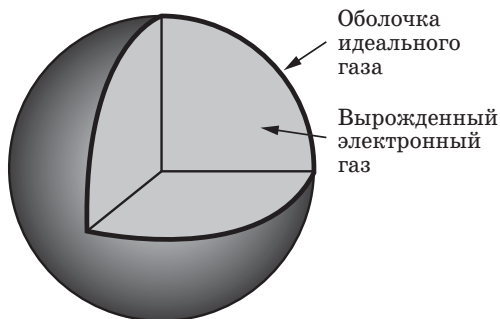
Температура звезды уменьшается к поверхности, и в каждом слое идёт определённый тип термоядерных реакций. В самых внешних слоях ядра, где температура составляет около 15 млн К, из водорода образуется гелий. Глубже, где температура выше, из гелия образуется углерод, далее из углерода — кислород. В самых глубоких слоях у очень массивных звёзд при термоядерных реакциях образуется железо.



Красный гигант

Белые карлики. Размеры белых карликов небольшие, всего лишь тысячи и десятки тысяч километров, т.е. сравнимы с размерами Земли. Но их массы близки к массе Солнца, и поэтому их средняя плотность — сотни килограммов в кубическом сантиметре.

БЕЛЫЙ КАРЛИК



Примером такой звезды служит спутник Сириуса, обозначаемый обычно как Сириус В. У этой звезды с температурой поверхности 25 000 К диаметр чуть превышает

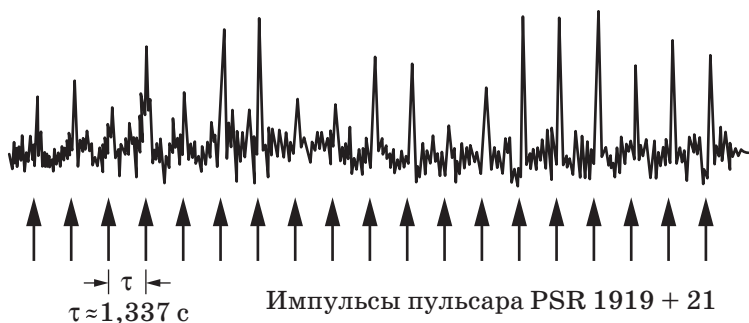
диаметр Земли, а масса равна солнечной, так что средняя плотность превышает 100 кг/см^3 .

Из-за высокой плотности атомы внутри белых карликов раздавлены, электроны не связаны с ядрами и ведут себя независимо от них. В отличие от других звёзд термоядерные реакции в недрах белых карликов не протекают. Их недра состоят из ядер гелия и других тяжёлых элементов.

Эти звёзды светят за счёт запасов тепловой энергии, выработанной в процессе предыдущих этапов эволюции. Через миллиарды лет запасы такой энергии иссякнут, белые карлики остынут и перестанут светиться.

Нейтронные звёзды. В 1967 г. астрономы с помощью радиотелескопов обнаружили удивительные радиоисточники, которые испускали периодические импульсы радиоизлучения. Эти объекты называли **пульсарами**.

Периоды импульсов пульсаров, которых сейчас известно около 1800, заключены в пределах от нескольких секунд до 0,001 с. Удивляла высокая стабильность повторения импульсов. Так, первый открытый пульсар, который обозначается как PSR 1919, расположенный в неярком созвездии Лисички, имел период повторения импульсов $T = 1,33730110168 \text{ с}$.



В конце концов было доказано, что за явление пульсара ответственны быстро вращающиеся нейтронные звёзды с сильным магнитным полем.

Узконаправленное радиоизлучение формируется в области магнитных полюсов. Поэтому период следования импульсов радиоизлучения равен периоду вращения ней-

тронной звезды. Эти необычные звёзды имеют радиусы около 10 км и массы, сравнимые с солнечной. Плотность нейтронной звезды фантастическая:

$$\rho = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{2 \cdot 10^{30} \text{ кг}}{\frac{4}{3}\pi (10^4 \text{ м})^3} = 4,8 \cdot 10^{17} \text{ кг/м}^3$$

она сравнима с плотностью вещества в ядрах атомов. При такой плотности вещество звезды состоит из плотно упакованных нейтронов. По этой причине такие звёзды получили название **нейтронных** звёзд.

5. Эволюция звёзд

В Млечном Пути наблюдаются газопылевые облака. Некоторые из них настолько плотные, что начинают сжиматься под действием собственного тяготения. По мере сжатия плотность и температура облака повышается, и оно начинает обильно излучать в инфракрасном диапазоне спектра, на этой стадии сжатия облако получило название протозвёзды. Когда температура в недрах протозвезды повышается до нескольких миллионов кельвинов, в них начинаются термоядерные реакции превращения водорода в гелий, протозвезда превращается в обычную звезду главной последовательности. Продолжительность пребывания звёзд на главной последовательности определяется мощностью излучения звезды (светимостью) и запасами ядерной энергии. В таблице приведено время жизни звёзд различных спектральных классов.

<i>Спектральный класс</i>	О	В	А	F	G	К	М
<i>Время жизни, лет</i>	< 106	107	108	109	1010	1011	> 1011

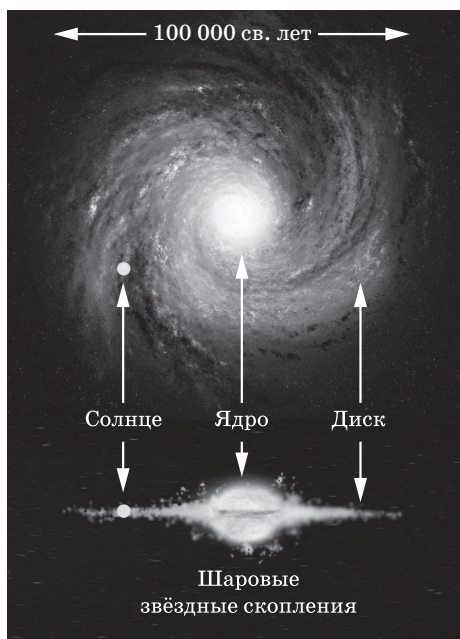
После выгорания водорода в недрах звезды она раздувается и становится красным гигантом или сверхгигантом в зависимости от массы. Раздувшаяся оболочка звезды небольшой массы уже слабо притягивается ядром и, постепенно удаляясь от него, образует планетарную туманность. После окончательного рассеяния оболочки остаётся лишь

горячее ядро звезды — белый карлик. У звезды типа Солнца останется белый карлик, состоящий из углерода, так как в процессе эволюции Солнца температура в его недрах повысится настолько, что будут протекать реакции синтеза углерода из гелия.

Эволюция массивных звёзд происходит более бурно. В конце своей жизни такая звезда может взорваться сверхновой, а её ядро, резко сжавшись, превратится в сверхплотный объект — *нейтронную звезду* или даже в *чёрную дыру*. Сброшенная оболочка, обогащённая гелием и тяжёлыми элементами, образовавшимися в недрах звезды, рассеивается в пространстве и служит материалом для формирования звёзд нового поколения. В частности, есть основания полагать, что Солнце — звезда второго поколения.

Наша Галактика — Млечный Путь

Млечный Путь тянется серебристой полосой по обоим полушариям, замыкаясь в звёздное кольцо.



Исследование распределения звёзд, газа и пыли показали, что наша Галактика — Млечный Путь представляет собой плоскую систему, имеющую спиральную структуру.

В Галактике около 100 млрд звёзд, её границы прослеживаются до расстояния 65 000 св. лет. Среднее расстояние между звёздами в Галактике около 5 св. лет. Диаметр Млечного Пути составляет 30 кпк. В центре Галактики, в её ядре концентрация звёзд значительно выше и расстояние между звёздами в сотни раз меньше, чем среднее. Центр Галактики, находящийся в созвездии Стрельца, скрыт от нас большим количеством газа и пыли. Так как газ и пыль плохо поглощают излучение в инфракрасном (ИК) диапазоне, то именно в этом диапазоне хорошо видно ядро Галактики.

Скорость обращения звёзд вокруг центрального сгущения по мере удаления от него сначала возрастает, достигая в окрестностях Солнца наибольшего значения примерно 220 км/с, а к периферии Галактики медленно убывает. По этой скорости и расстоянию Солнца от центра Галактики ($r = 8000$ пк) не трудно вычислить период обращения Солнца, близкий к 200 млн лет называемый *галактическим годом*.

Можно рассчитать массу Галактики M_r , сосредоточенную внутри орбиты Солнца. Центростремительное ускорение, которое испытывает Солнце под действием притяжения Галактики:

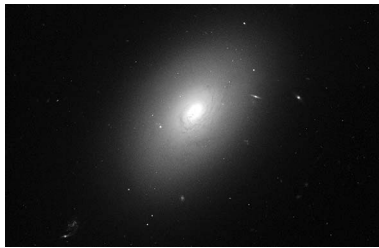
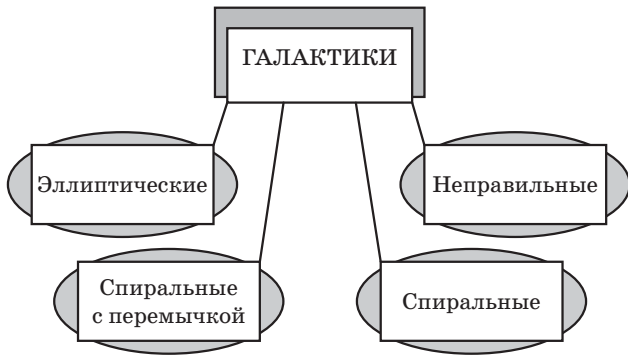
$$a = v^2/r \quad a = G \frac{M}{r^2}$$

$$M = \frac{v^2 r}{G} \quad M_r = 1,7 \times 10^{41} \text{ кг}$$

Объекты, входящие в спиральные ветви Галактики, образуют плоскую подсистему Галактики. К ней относятся яркие звёзды спектральных классов скопления, *O* и *B*, рассеянные звёздные скопления, газопылевые туманности. Шаровые звёздные скопления, красные сверхгиганты и некоторые другие типы звёзд разбросаны почти по всему объёму Галактики, вплоть до расстояний в 10 000 пк от галактической плоскости, окружая со всех сторон центральное сгущение звёздной системы.

ГАЛАКТИКИ

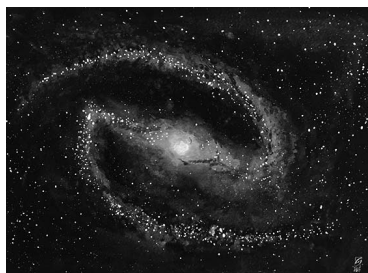
1. Классификация галактик



• Эллиптические галактики не вращаются, почти не содержат газа и пыли и молодых горячих звёзд. Массы самых крупных эллиптических галактик достигают 10^{13} масс Солнца.



Спиральные галактики

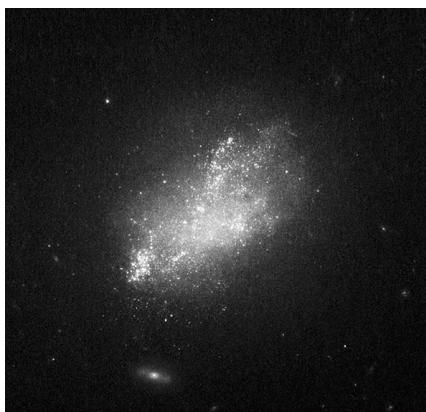


Спиральные галактики с перемычкой

- Спиральные галактики и спиральные галактики с перемычкой вращаются, имеют много газа и пыли, много молодых массивных горячих звёзд, расположенных в спиральных рукавах, в которых идёт активный процесс образования звёзд. Массы спиральных галактик составляют от 10^{10} до 10^{12} масс Солнца.

- К неправильным галактикам относятся те, у которых отсутствует чётко выраженное ядро и не обнаружена вращательная симметрия.

Неправильные галактики медленно вращаются, содержат много молодых горячих звёзд.



Неправильные галактики

Активные галактики. Радионаблюдения за галактиками показали, что большинство из них являются слабыми

источниками радиоизлучения, основная доля их излучения приходится на свет звёзд галактики.

Однако существуют такие галактики, радиоизлучение которых не только сравнимо, но и значительно превышает их оптическое излучение. Эти галактики получили название **радиогалактик**.



Радиогалактика

На фотографии показана одна из мощнейших радиогалактик — Центавр А. Галактика пересечена полосой поглощающего вещества.

Анализ свойств радиоизлучения показывает, что оно вызывается облаками горячей плазмы, выброшенными из ядра галактики и двигающимися со скоростью, близкой к скорости света.

2. Квазары

Ещё более мощными источниками радиоизлучения являются квазары (*англ. quasar — QUASi stellar radio source*, т.е. похожий на звезду радиоисточник).

Примером такого источника является ближайший к нам квазар С273 в созвездии Девы. Его светимость достигает $10^{12}L_{\odot}$.

Светимости большинства квазаров в десятки и сотни раз превышают светимости обычных галактик.

Квазары являются также мощными источниками инфракрасного, рентгеновского и гамма-излучения.

А вот размеры квазаров оказались небольшими, примерно 100–1000 а.е., т.е. всего лишь в десятки раз больше размеров Солнечной системы.

3. Красное смещение

Наблюдения показывают, что линии в спектрах всех известных галактик смещены к красному концу.

Это явление было названо **красным смещением**. При этом отношение смещения спектральной линии $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ к длине волны λ_0 оказалось для всех линий одинаковым в спектре данной галактики. Количественно красное смещение характеризуется величиной

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0},$$

где λ_0 — длину волны спектральной линии, наблюдаемой в лаборатории, назвали красным смещением.

Общепринятая интерпретация этого явления связана с эффектом Доплера, согласно которому смещение спектральных линий вызвано движением (удалением) излучающего объекта (галактики) со скоростью v по направлению от наблюдателя.

Линии поглощения
в спектре Солнца



Линии поглощения
в спектре скопления
галактик



При малых красных смещениях ($z = 1$) скорость объекта может быть найдена по формуле Доплера:

$$v = A \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = c \cdot z,$$

где $c = 3 \times 10^5$ км/с — скорость света.

После того как по красному смещению были найдены скорости галактик, известный астроном Э. Хаббл установил интересную зависимость, называемую **законом Хаббла**:

скорость удаления галактик возрастает прямо пропорционально расстоянию до них:

$$v = H_0 r.$$

В этой формуле коэффициент пропорциональности H называют *постоянной Хаббла*, численное значение которой зависит от выбранных единиц. Если в законе Хаббла скорость выражена в километрах в секунду, а расстояние в мегапарсеках (1 мегапарсек = 10^6 парсеков), то постоянная Хаббла $H = 75$ км/ (с·Мпк).

КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВСЕЛЕННОЙ

В зависимости от средней плотности вещества Вселенная должна либо расширяться, либо сжиматься. При расширении Вселенной скорость разбегания галактик должна быть пропорциональна расстоянию до них — вывод, подтверждённый Э. Хабблом открытием красного смещения в спектрах галактик. Критическое значение плотности вещества, от которой зависит характер движения и геометрия Вселенной, равно:

$$\rho_{\text{кр}} = \frac{3H^2}{8\pi G},$$

где G — гравитационная постоянная, $H = 75$ км/с · Мпк — постоянная Хаббла.

Помня, что 1 пк = $3,08 \times 10^{13}$ км, и поэтому 1 Мпк = $3,08 \times 10^{19}$ км, найдём $H = 2,4 \times 10^{-18}$ с⁻¹. Тогда критическая плотность вещества

$$\rho_{\text{кр}} = \frac{3(2,4 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1})^2}{8 \cdot 3,14 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м} / (\text{кг} \cdot \text{с}^2)} \approx 10^{-26} \text{ кг/м}^3,$$

или $\rho_{\text{кр}} = 10^{-29}$ г/см³.

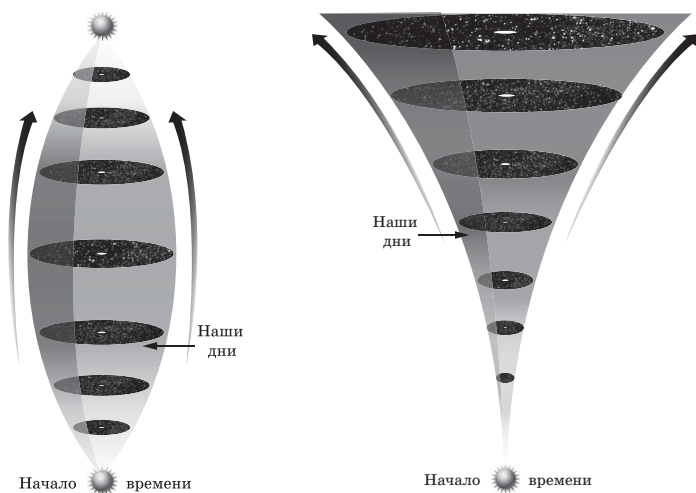
Если средняя плотность вещества во Вселенной больше критической ($\rho > \rho_{\text{кр}}$), то в будущем расширение Вселенной сменится сжатием, а при средней плотности, равной или меньшей критической ($\rho \leq \rho_{\text{кр}}$), расширение не прекратит-

ся. Вне зависимости от плотности гравитация с большей или меньшей силой тормозит расширение Вселенной.

Что касается геометрических свойств Вселенной, то при $\rho > \rho_{кр}$ во Вселенной будут работать законы геометрии Римана. В частности, в ней сумма углов в треугольнике больше 180° , как в геометрии на сфере.

Если $\rho < \rho_{кр}$, то во Вселенной будут работать законы геометрии Лобачевского, в ней сумма углов в треугольнике меньше 180° , как геометрия типа поверхности седла.

Если $\rho = \rho_{кр}$, то во Вселенной будут работать законы хорошо знакомой нам геометрии Евклида, где сумма углов в треугольнике равна 180° , как на плоскости.



МОДЕЛИ ВОЗМОЖНОЙ ЭВОЛЮЦИИ ВСЕЛЕННОЙ

Мы не знаем средней плотности вещества во всей Вселенной, но можем подсчитать эту плотность в доступной изучению части Вселенной — в *метагалактике*.

Радиус метагалактики легко оценить с помощью закона Хаббла. Максимальная скорость не может превышать скорости света, поэтому максимальное расстояние, до которого

можно наблюдать небесные тела, соответствует скорости разбегания галактик $v = c = 3 \times 10^5$ км/с, отсюда

$$R_M = \frac{c}{H} = \frac{3 \cdot 10^5 \text{ км/с}}{75 \text{ км/(с} \cdot \text{Мпк)}} = 4 \cdot 10^3 \text{ Мпк} = 1,3 \cdot 10^{10} \text{ свет.лет},$$

или $R_M = 1,24 \times 10^{26}$ м.

Как уже отмечалось, в видимой части Вселенной наблюдается около 100 млрд крупных галактик ($N = 10^{11}$), похожих и непохожих на нашу Галактику. Каждая из них состоит примерно из $n = 10^{11}$ звёзд. Принимая массы звёзд, в среднем близкими к массе Солнца $M_e = 10^{30}$ (большинство звёзд имеют массу меньше или сравнимую с солнечной), находим, что в объёме

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3$$

содержится масса $M = NnM_e$, откуда средняя плотность вещества

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{NnM_e}{\frac{4}{3} \pi R^3} = \frac{10^{11} \cdot 10^{11} \cdot 10^{30} \text{ кг}}{\frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot (1,24 \cdot 10^{24} \text{ м})^3} = 1,3 \cdot 10^{-27} \text{ кг/м}^3, \text{ или}$$

$$\rho = 1,3 \times 10^{-30} \text{ г/см}^3.$$

Следовательно, наблюдаемая средняя плотность Вселенной примерно в 8 раз меньше критической плотности и Вселенная должна расширяться вечно.

Возраст Вселенной. Если наблюдения пока не позволяют нам с определённой точностью сказать о характере будущего расширения Вселенной, то время, когда в прошлом это расширение началось, мы можем оценить из закона Хаббла.

Действительно, если наблюдаемая нами галактика удаляется со скоростью v и сейчас, после начала расширения, находится на расстоянии r от нас, то своё удаление от нас она начала примерно в момент

$$t_{\text{Вс}} = \frac{r}{V} = \frac{r}{Hr} = \frac{1}{H} = \frac{1}{2,4 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}} = 0,42 \cdot 10^{18} \text{ с} = 13 \cdot 10^9 \text{ лет}.$$

Эти рассуждения применимы для любой галактики. Таким образом, около 13 млрд лет назад всё вещество Все-

ленной было сосредоточено в небольшом объёме и плотность вещества была настолько высокой, что ни галактик, ни звёзд не существовало. Не существовало ни атомов, ни молекул, а была сверхплотная смесь элементарных частиц.

Пока не ясны ни природа физических процессов, протекавших до этого сверхплотного состояния вещества, ни причины, вызвавшие расширение Вселенной. Ясно одно, что со временем расширение привело к значительному уменьшению плотности вещества, и на определённом этапе расширения стали формироваться галактики и звёзды.

Некоторые видят в наблюдаемом разбегании галактик аналогию с разлётом вещества во время взрыва, поэтому описанная теория расширения Вселенной получила название **теории Большого взрыва**, а время

$$t_b = 1/H = 13 \text{ млрд лет,}$$

прошедшее с начала этого взрыва, называют **возрастом Вселенной**.

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ 31

1. Рассмотрите таблицу, содержащую характеристики некоторых спутников планет Солнечной системы.

Название спутника	Радиус спутника, км	Радиус орбиты, тыс. км	Средняя плотность, г/см ³	Вторая космическая скорость, м/с	Планета
Луна	1737	384,4	3,35	2038	Земля
Фобос	~12	9,38	2,20	11	Марс
Ио	1815	422,6	3,57	2560	Юпитер
Европа	1569	670,9	2,97	2040	Юпитер
Каллисто	2400	1883	1,86	2420	Юпитер
Титан	2575	1221,9	1,88	2640	Сатурн
Оберон	761	587,0	1,50	770	Уран

На- звание спутни- ка	Радиус спутни- ка, км	Радиус орбиты, тыс. км	Средняя плот- ность, г/см ³	Вторая космиче- ская ско- рость, м/с	Плане- та
Тритон	1350	355,0	2,08	1450	Неп- тун

Выберите два утверждения, которые соответствуют ха-
рактеристикам планет.

- 1) Ускорение свободного падения на Обероне равно $7,7 \text{ м/с}^2$.
- 2) Масса Луны меньше массы Ио.
- 3) Объём Титана почти в 2 раза больше объёма Тритона.
- 4) Ио находится дальше от поверхности Юпитера, чем Каллисто.
- 5) Первая космическая скорость для Тритона составляет примерно $1,03 \text{ км/с}$.

Ответ:

--	--

2. Рассмотрите таблицу, содержащую характеристики не-
которых астероидов Солнечной системы.

На- звание асте- роида	При- мерный радиус астерои- да, км	Боль- шая полу- ось ор- биты, а.е.*	Период обращения вокруг Солнца, земных лет	Экс- центри- ситет орбиты e**	Масса, кг
Веста	265	2,37	3,63	0,091	$3,0 \cdot 10^{20}$
Эвно- мия	136	2,65	4,30	0,185	$8,3 \cdot 10^{18}$
Цере- ра	466	2,78	4,60	0,077	$8,7 \cdot 10^{20}$
Пал- лада	261	2,78	4,61	0,235	$3,2 \cdot 10^{20}$
Юнона	123	2,68	4,36	0,256	$2,8 \cdot 10^{19}$
Геба	100	2,42	3,76	0,202	$1,4 \cdot 10^{19}$

Название астероида	Примерный радиус астероида, км	Большая полуось орбиты, а.е.*	Период обращения вокруг Солнца, земных лет	Эксцентриситет орбиты e**	Масса, кг
Аквитания	54	2,79	4,53	0,238	$1,1 \cdot 10^{18}$

*1 а.е. составляет 150 млн км.

** Эксцентриситет орбиты определяется по формуле:

$$e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}},$$

где b — малая полуось, a — большая полуось орбиты, $e = 0$ — окружность, $0 < e < 1$ — эллипс.

Выберите два утверждения, которые соответствуют характеристикам астероидов.

1) Астероид Геба вращается по более «вытянутой» орбите, чем астероид Веста.

2) Большие полуоси орбит астероидов Церера и Паллада одинаковы, значит они движутся по одной орбите друг за другом.

3) Средняя плотность астероида Церера составляет 400 кг/м^3 .

4) Первая космическая скорость для астероида Юнона составляет более 8 км/с .

5) Орбита астероида Аквитания находится между орбитами Марса и Юпитера.

Ответ:

--	--

3. Используя таблицу, содержащую сведения о ярких звёздах, выполните задание.

Наименование звезды	Температура, К	Масса (в массах Солнца)	Радиус (в радиусах Солнца)	Созвездие, в котором находится звезда
Капелла	5200	3	2,5	Возничий

Окончание табл.

Наименование звезды	Темпе- ратура, К	Масса (в мас- сах Солнца)	Радиус (в радиу- сах Солн- ца)	Созвездие, в котором находится звезда
Менкалинан (β Возничего А)	9350	2,7	2,4	Возничий
Денеб	8550	21	210	Лебедь
Садр	6500	12	255	Лебедь
Бетельгейзе	3100	20	900	Орион
Ригель	11 200	40	138	Орион
Альдебаран	3500	5	45	Телец
Эльнат	14 000	5	4,2	Телец

Выберите два утверждения, которые соответствуют характеристикам звёзд.

1) Звёзды Капелла и Менкалинан относятся к одному созвездию, значит, они находятся на одинаковом расстоянии от Солнца.

2) Звезда Денеб является сверхгигантом.

3) Звёзды Альдебаран и Эльнат имеют одинаковую массу, значит, они относятся к одному и тому же спектральному классу.

4) Звезда Бетельгейзе относится к красным звёздам спектрального класса М.

5) Температура на поверхности Ригеля в 2 раза ниже, чем на поверхности Солнца.

Ответ:

--	--

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. Фундаментальные физические постоянные

Элементарный заряд	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Масса покоя электрона	$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса покоя протона	$m_p = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса покоя нейтрона	$m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Удельный заряд электрона	$e/m = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$
Скорость света в вакууме	$c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Гравитационная постоянная	$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м};$ $1/(4\pi\epsilon_0) = 9 \cdot 10^9 \text{ м/Ф}$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Постоянная Планка	$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Первый боровский радиус	$a_0 = 5,28 \cdot 10^{-11} \text{ м}$
Молярная газовая постоянная	$R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$
Постоянная Фарадея	$F = 9,648 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}$

2. Некоторые астрофизические характеристики

Средний радиус Земли	$6,371 \cdot 10^6$ м
Масса Земли	$5,98 \cdot 10^{24}$ кг
Время полного оборота Земли вокруг своей оси	23 ч 56 мин 4,09 с
Радиус Солнца	$6,96 \cdot 10^8$ м
Масса Солнца	$1,99 \cdot 10^{30}$ кг
Радиус Луны	$1,74 \cdot 10^6$ м
Масса Луны	$7,35 \cdot 10^{22}$ кг
Расстояние от центра Земли до центра Солнца	$1,49 \cdot 10^{11}$ м
Расстояние от центра Земли до центра Луны	$3,84 \cdot 10^8$ м
Период обращения Луны вокруг Земли	27 сут 7 ч 43 мин
Ускорение свободного падения (на широте Парижа, на уровне моря)	$9,807$ м/с ²
Ускорение свободного падения на поверхности Луны	$1,623$ м/с ²

3. Электрические свойства диэлектриков

Вещество	Удельное электрическое сопротивление, Ом · м	Диэлектрическая проницаемость
Алмаз	$10^{10}-10^{11}$	5,7
Бумага	10^{10}	2,0–3,5
Вода дистилли- рованная	10^4	81
Вода морская	0,3	2,5–3,0
Воск	$2 \cdot 10^{13}$	Нет данных
Гетинакс	10^9-10^{12}	5–8
Дерево сухое	10^9-10^{13}	2–5
Капрон	10^8-10^9	3,6–5,0
Мрамор	10^5-10^8	8–10
Органическое стекло	10^{13}	3–4
Парафин	10^{14}	2
Полистирол	$10^{13}-10^{15}$	2,5
Полиэтилен	$10^{13}-10^{15}$	2,3
Резина электроизоля- ционная	10^{13}	3–6
Слюда	$10^{11}-10^{15}$	4–10
Стекло	10^9-10^{13}	3–15
Титанат бария	Нет данных	1200
Фарфор	$10^{10}-10^{14}$	4–10
Эбонит	$10^{12}-10^{16}$	2,5–4
Янтарь	$10^{15}-10^{18}$	3

ОТВЕТЫ

Номер вопроса	Примеры заданий								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	3	2	1	2	3	3	2	3	1
2	1	4	4	4	3	3	1	3	1
3	3	3	3	1	2	4	1	2	3
4	2	3	1	1	4	3	2	3	2
5	3	1	3	3	4	2	3	2	3
6	1	2	1	4	2	1	2	4	4
7	121	23	2	1	3	2	2	1	1
8	51	42	24	331	3	2	133	213	2
9	13	112	15	342	332	43	212	23	35
10	—	—	—	—	—	131	—	—	14

Номер вопроса	Примеры заданий								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1	4	4	2	1	3	3	4	2
2	1	1	4	1	4	4	3	1	3
3	1	1	1	2	3	3	3	1	4
4	2	4	1	2	1	4	4	2	4
5	1	3	4	4	4	3	2	4	3
6	2	1	2	1	1	3	3	4	4
7	1	3	2	3	3	2	2	1	212
8	3	3	1	2	3	3	2	2	—
9	14	51	121	312	213	331	14	221	—
10	23	24	23	45	43	212	34	14	—

Номер вопроса	Примеры заданий					
	19	20	21	22	23	24
1	4	3	4	3	3	2
2	2	4	4	3	1	2
3	4	3	4	2	3	3
4	3	2	3	3	2	4
5	2	2	2	3	2	3
6	2	3	1	2	3	2
7	3	3	1	2	1	2
8	4	1	3	4	1	1
9	4	1	21	3	1	4
10	4	21	14 В	4	3	2
11	3	22	Увеличит- ся в 1,2 раза	34	54	2
12	231	26 мин	0,064 кг/ моль (медь)	13	0,693 А	2
13	131	75 А	—	30°	40 мГн	3
14	12	4,5 Вт	—	0,8 А	0,75 мДж	4
15	5 нКл	1 Ом	—	1395 кГц	5 мВ	3
16	2	—	—	—	—	1
17	6,25 мкм	—	—	—	—	51
18	67 В	—	—	—	—	42
19	—	—	—	—	—	13
20	—	—	—	—	—	$3,14 \cdot 10^{-3} \text{ с}$
21	—	—	—	—	—	0,12 А
22	—	—	—	—	—	95%
23	—	—	—	—	—	120 км
24	—	—	—	—	—	7750 м

Номер вопроса	Примеры заданий						
	25	26	27	28	29	30	31
1	2	3	3	2	4	1	35
2	3	4	3	1	3	3	15
3	3	3	2	2	3	2	24
4	2	1	1	2	4	1	—
5	1	3	2	3	2	3	—
6	4	54	0,88 м/с	1	3	2	—
7	4	32	—	1,5	1	1	—
8	2	1,5 км	—	21	35	4	—
9	3	$\varphi \approx 1,5^\circ$	—	45	$1,36 \cdot 10^{-27}$	4	—
10	4	340 нм	—	$1,35 \cdot 10^{15}$ Гц	3,9 м/с	3	—
11	3	—	—	$1,38 \cdot 10^{-32}$ кг	—	4	—
12	2	—	—	$26 \cdot 10^{14}$ кг	—	13	—
13	3	—	—	$2 \cdot 10^{19}$ Дж; U = 1,25 В	—	2,65 кг	—
14	2	—	—	—	—	—	—
15	45	—	—	—	—	—	—
16	200 см	—	—	—	—	—	—
17	14	—	—	—	—	—	—
18	3	—	—	—	—	—	—
19	1,93	—	—	—	—	—	—
20	$5 \cdot 10^{-9}$ с	—	—	—	—	—	—
21	—	—	—	—	—	—	—
22	—	—	—	—	—	—	—
23	—	—	—	—	—	—	—
24	—	—	—	—	—	—	—

Справочное издание

**Пурышева Наталия Сергеевна
Ратбиль Елена Эммануиловна**

ФИЗИКА

НОВЫЙ ПОЛНЫЙ СПРАВОЧНИК ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЕГЭ

Редакция «Образовательные проекты»

Ответственный редактор *Е. Маталина*
Художественный редактор *Н. Федорова*
Технический редактор *Г. Этманова*
Компьютерная верстка *А. Григорьев*
Корректор *И. Андрианова*

Подписано в печать 21.08.2020. Формат 84×108¹/₃₂.

Усл. печ. л. 18,48

(Новый полный справочник для подготовки к ЕГЭ)

Тираж экз. Заказ №

(Самый популярный справочник для подготовки к ЕГЭ)

Тираж экз. Заказ №

Общероссийский классификатор продукции ОК-034-2014 (КПЕС 2008);
58.11.1 — книги, брошюры печатные

Произведено в Российской Федерации.

Дата изготовления: сентябрь 2020 г.

Изготовитель: ООО «Издательство АСТ»

Адрес места осуществления деятельности по изготовлению продукции:

123317, Москва, Пресненская наб., д. 6, строение 2.

Деловой комплекс «Империя», 14, 15 этажи

ООО «Издательство АСТ»

129085, г. Москва, Звёздный бульвар, дом 21,
строение 1, комната 705, пом. I, 7 этаж.

Наш электронный адрес: www.ast.ru

e-mail: stelliferovskiy@ast.ru; www.book24.ru



По вопросам приобретения книг обращаться по адресу:

123317, г. Москва. Пресненская наб., д. 6, стр. 2,

Деловой комплекс «Империя», а/я № 5

ЕДИНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭКЗАМЕН

Вниманию выпускников и абитуриентов предлагается новое учебное пособие для подготовки к ЕГЭ по физике.

В справочнике в полном объёме дан материал курса «Физика», который проверяется на государственной итоговой аттестации.

Структура справочника соответствует современному кодификатору элементов содержания по предмету, на основе которого составлены экзаменационные задания ЕГЭ. В справочнике представлены все темы курса:

«Механика», «Молекулярная физика. Термодинамика», «Электродинамика», «Оптика», «Основы специальной теории относительности», «Квантовая физика», «Физика атома», «Элементы астрофизики».

Теоретический материал изложен в краткой и доступной форме. Чёткость изложения и наглядность учебного материала позволяют эффективно подготовиться к экзамену.

Практическая часть справочника включает образцы тестовых заданий, которые по форме и содержанию соответствуют реальным вариантам ЕГЭ.

Ответы к тестовым заданиям помогут выпускникам объективно оценить свой уровень знаний, умений и навыков.



ISBN 978-5-17-132977-8



WWW.AST.RU