

СПРАВОЧНИК по ФИЗИКЕ

для поступающих
в вузы



« НАУКОВА ДУМКА »

А. И. Гаевой, Н. П. Калабухов,
Л. Е. Левашова, В. Г. Чепуренко

СПРАВОЧНИК ПО ФИЗИКЕ ДЛЯ ПОСТУПАЮЩИХ В ВУЗЫ

Под редакцией проф.
Н. П. КАЛАБУХОВА



КИЕВ — 1968

Основное назначение настоящего справочника — помочь абитуриенту лучше усвоить курс физики. Приводятся типовые задачи, предлагаемые на вступительных экзаменах в вузах, ответы на контрольные вопросы и подробные решения задач. Материал расположен в соответствии с программой для поступающих в высшие учебные заведения, утвержденной Министерством высшего и среднего специального образования.

Предназначен для лиц, готовящихся к вступительным экзаменам по физике в высшие учебные заведения. Может быть также полезен учащимся старших классов и преподавателям средних школ.

Гаевой Андрей Иосифович, Чепуренко Василий Григорьевич, Левашова Людмила Евгеньевна, Калабухов Николай Петрович

СПРАВОЧНИК ПО ФИЗИКЕ ДЛЯ ПОСТУПАЮЩИХ В ВУЗЫ

Редакторы *А. Н. Карнаух, Н. Д. Чепур*. Художественный редактор *В. М. Тепляков*. Оформление художника *Г. М. Балюна*. Технический редактор *А. М. Колодиева*.
Корректоры *В. С. Танцюра, Т. Я. Губарь*.

БФ 01399. Зак. № 8-487. Изд. № 158.
Тираж 1 000 000 (250 001 — 400 000). Бумага № 3, 70×108¹/₃₂.
Печ. физ. листов 11,25. Условн. печ. листов 15,75. Учетно-изд. листов 24. Подписано к печати 26/VII 1968 г.
Цена 75 коп.

Издательство «Наукова думка», Киев, Репина, 3.

2 — 3 — 7 Книжная ф-ка им. М. В. Фрунзе Комитета по печати при Со-
287 — 68 М вете Министров УССР. Харьков, Донец-Захаржевская, 6/8.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Введение	7

МЕХАНИКА

Глава I. Кинематика	11
Глава II. Динамика	29
Глава III. Механическая энергия	49
Глава IV. Криволинейное движение	63
Глава V. Колебания и волны. Звук	80
Глава VI. Механика жидкостей и газов	94

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Глава VII. Основы молекулярно-кинетической теории строения вещества	108
Глава VIII. Расширение тел при нагревании	113
Глава IX. Свойства газов	118
Глава X. Теплота	127
Глава XI. Свойства жидкостей и твердых тел	141
Глава XII. Тепловые двигатели	149

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Глава XIII. Электростатика	157
Глава XIV. Постоянный электрический ток	176
Глава XV. Магнитное поле и электромагнитная индукция	208

Глава XVI. Переменный ток	226
Глава XVII. Электронные явления в вакууме . . .	238
Глава XVIII. Электромагнитные колебания и волны	241

ОПТИКА

Глава XIX. Геометрическая оптика	254
Глава XX. Физическая оптика	291

АТОМНАЯ ФИЗИКА

Глава XXI. Строение атома и атомного ядра . . .	309
---	-----

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий справочник предназначен для лиц, готовящихся к вступительным экзаменам по физике в высшие учебные заведения страны. Он охватывает весь материал, предусмотренный действующей программой по физике для средней школы.

При составлении справочника основное внимание уделялось четкости изложения основных физических понятий, определению физических величин и разъяснению их физического смысла. Материал излагается в соответствии с программой по физике, содержащейся в «Справочнике для поступающих в высшие учебные заведения СССР» (1966 г.).

Ко многим параграфам справочника подобраны типовые задачи с подробным их решением и методическими указаниями, раскрывающими физическую сущность излагаемого материала, с анализом результатов и выводов, вытекающих из решения.

Самопроверка усвоения пройденного обеспечивается контрольными вопросами, охватывающими материал данной главы; той же цели служат вопросы и задачи, частично включающие также и материал, изученный ранее. Возникающие при самопроверке затруднения читатель сможет разрешить, обратившись к ответам и решениям, помещенным в конце книги.

Разделы «Механика» и «Молекулярная физика» написаны доцентом В. Г. Чепуренко и ассис-

стентом А. И. Гаевым, раздел «Электричество и электромагнетизм» — ассистентом Л. Е. Левашовой, разделы «Оптика» и «Атомная физика» — профессором Н. П. Калабуховым.

Мы заранее признательны читателям за пожелания, касающиеся выбора материала и формы его изложения. Замечания просим присылать по адресу: Киев, Репина, 3, издательство «Наукова думка».

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

Все, что существует вне и независимо от нашего сознания и является источником ощущений, называется *материей*. Наиболее полное определение материи дано В. И. Лениным в труде «Материализм и эмпириокритицизм»: «Материя есть философская категория для обозначения объективной реальности, которая дана человеку в ощущениях его, которая копируется, фотографируется, отображается нашими ощущениями, существуя независимо от них» *.

Материя никогда и никем не была создана, никогда не возникла и никогда не исчезнет; она существовала и будет существовать вечно. Материя пребывает в состоянии непрерывного движения. Движение есть форма существования материи (Энгельс). Под *движением* материи следует понимать всякое изменение, происходящее в окружающем нас мире. Простейшим видом движения материи является механическое движение — перемещение одного тела относительно другого. Более сложные движения, движение электрических зарядов и т. д. Рост растений и животных, химические реакции — это тоже проявление движения. В элементарном курсе физики изучаются самые общие и в то же время простые формы движения материи, присущие всем более сложным формам (биологическим, химическим и т. д.).

Все окружающие нас предметы, как и мы сами, являются физическими телами, или просто телами. Разнообразные изменения, происходящие с телами, называются *явлениями*. Физические явления не сопровождаются изменением состава тел, как это имеет место, например, при химических явлениях. При одних и тех же условиях данное явление происходит одинаково.

Определенная взаимосвязь явлений выражается *законами*. Совокупность законов, охватывающих некоторую область явлений, составляет содержание данной отрасли науки. Многообразие явлений природы обуславливает расчленение человеческого знания на множество различных отраслей.

* В. И. Ленин. Соч., т. 14, стр. 117.

Задачей любой науки о явлениях природы является не только изучение законов последней. Наука служит основанием и средством для овладения природой, цель которого — удовлетворение потребностей человеческого общества.

В нашей стране наука стала достоянием широких народных масс. Огромный вклад в развитие науки и техники внесен отечественными учеными и изобретателями: в СССР построена первая в мире атомная электростанция, впервые запущен в космос искусственный спутник и создана искусственная планета; первым космонавтом стал гражданин нашей страны; первое прилунение, мягкая посадка автоматической станции на Венеру и т. д. также осуществлены советскими людьми. Все это стало возможным благодаря огромным достижениям в различных областях науки, в том числе и в области физики.

Физика — наука, изучающая общие свойства и законы движения вещества и поля. Термин *физика* (от греческого слова «фюзис», что означает «природа») ввел М. В. Ломоносов.

Физические величины приходится измерять, т. е. сравнивать их с однородными величинами, принятыми за единицу измерения. Всякая величина измеряется числом, указывающим, во сколько раз она отличается от величины, принятой за единицу измерения; это число имеет наименование (и размерность) *единицы измерения*.

В науке и технике произвольно установлены единицы только для нескольких величин, которые принято называть *основными*. Для остальных величин единицы устанавливаются на основании физических закономерностей, связывающих новые физические величины с теми, для которых единицы измерения уже приняты или установлены; это так называемые *производные единицы*. Основные и производные единицы образуют *систему единиц*.

При изложении материала и решении задач в настоящем справочнике применяются единицы Международной системы единиц (системы единиц СИ). В справочнике также дается соотношение между однородными единицами систем СИ и СГСЭ.

**Основные величины и единицы их измерения
в системе СИ**

Физическая величина	Обозначение	Единица измерения
Длина	<i>l</i>	1 м
Масса	<i>m</i>	1 кг
Время	<i>t</i>	1 сек
Температура	<i>T</i>	1° К
Сила тока	<i>I</i>	1 а
Сила света	<i>I</i>	1 св
Дополнительные единицы		
Плоский угол	φ	1 рад
Телесный угол	ω	1 стер

**Основные величины и единицы их измерения
в системе СГСЭ**

Физическая величина	Обозначение	Единица измерения
Длина	<i>l</i>	1 см
Масса	<i>m</i>	1 г
Время	<i>t</i>	1 сек
Заряд	<i>q</i>	1 СГСЭ

Пр и ж е ч а н и е. Производные единицы даются в тех параграфах, где вводятся определяющие их формулы.

МЕХАНИКА

§ 1. Введение

Учение о механическом движении и силах, вызывающих это движение, называется *механикой* (от греческого слова «механэ», что означает «машина», или «приспособление»).

Механическое движение — это такое движение, при котором с течением времени изменяется взаимное расположение тел или частей тела относительно друг друга. Механическое движение является простейшей формой движения материи.

Положение любого тела в пространстве может быть определено только относительно другого тела или совокупности тел. Тело или группу тел, относительно которых рассматривается движение данного тела, называют *системой отсчета*. Движение тела относительно других тел, условно принимаемых за неподвижные, называется *относительным движением*.

В действительности все тела, в том числе и находящиеся в покое относительно Земли, находятся в состоянии непрерывного движения; они вместе с Землей совершают суточное вращение вокруг земной оси и годичное движение вокруг Солнца. Солнце со всей Солнечной системой, в том числе и с Землей, перемещается в пространстве относительно звезд. В природе нет тел, находящихся в состоянии покоя. Следовательно, *всякое движение тел и, в частности, покой являются относительными*.

Наиболее простым видом механического движения является *поступательное движение*. Поступательным движением называется такое движение, при котором любая прямая, соединяющая какие-либо две точки тела, остается параллельной самой себе. Так, ход поршня в цилиндре паровой машины или двигателя внутреннего сгорания представляет собой поступательное движение.

Другой распространенный вид движения — *вращение*. При вращательном движении тела все его точки описывают окружности, центры которых лежат на одной прямой, называемой *осью вращения*. В этом случае не всякая прямая, соединяющая две точки тела, остается параллельной самой себе. Следовательно, вращение не является поступательным движением.

Часто при описании поступательного движения тела его размеры и форма не играют роли. В таких случаях рассматривают движение *материальной точки*, т. е. тела, размерами и формой которого по условиям задачи пренебрегают. Так, рассматривая движение Земли вокруг Солнца, ее обычно принимают за материальную точку, так как можно пренебречь размерами нашей планеты по сравнению с расстоянием от нее до Солнца.

Линия, которую описывает движущаяся материальная точка в пространстве, называется *траекторией* этой точки. По виду траектории движения делятся на *прямолинейные* и *криволинейные*, а по характеру изменения скорости — на *равномерные* и *неравномерные*.

Глава I. КИНЕМАТИКА

Раздел механики, в котором изучаются движения без исследования причин, их вызвавших, называется *кинематикой*. Следовательно, задачей кинематики является описание изменения положения тела в пространстве с течением времени, т. е. определение траектории его движения.

§ 2. Равномерное прямолинейное движение

Равномерным прямолинейным движением называется такое движение, при котором за любые равные промежутки времени тело проходит одинаковые пути. Движение одного тела отличается от движения другого тем, что они могут пройти за одинаковые промежутки времени различные пути, или, иначе говоря, тем, что одинаковые пути могут быть пройдены телами за различные промежутки времени. Эти различия в движении тел характеризуются величиной, называемой скоростью тела.

§ 3. Скорость и единицы ее измерения

Скорость — это величина, измеряемая длиной пути, пройденного равномерно движущимся телом в единицу времени. Так, если путь s пройден телом, движущимся равномерно, за промежуток времени t , то его скорость v , согласно определению, равна

$$v = \frac{s}{t}.$$

Положив в этой формуле $s = 1$ м и $t = 1$ сек, получим единицу скорости в системе СИ: $1 \text{ м/сек} = \frac{1 \text{ м}}{1 \text{ сек}}$, т. е. за единицу скорости,

равную 1 м/сек, принимается скорость такого равномерного движения, при котором тело за 1 сек проходит путь в 1 м.

В системе единиц СГС за единицу скорости принимается

$$1 \text{ см/сек} = \frac{1 \text{ см}}{1 \text{ сек}}.$$

Соотношение между этими единицами следующее:

$$1 \text{ м/сек} = \frac{1 \text{ м}}{1 \text{ сек}} = \frac{100 \text{ см}}{1 \text{ сек}} = 100 \text{ см/сек}.$$

Итак, размерность единицы скорости в системе единиц СИ изображается в виде дроби: м/сек (метр в секунду). *Размерность производной единицы* показывает, как зависит данная производная единица от основных.

Пользуясь понятием скорости, можно дать другое определение равномерного движения, а именно: равномерным движением называется движение с постоянной скоростью.

§ 4. Уравнение равномерного прямолинейного движения

Уравнение равномерного прямолинейного движения выводим из формулы скорости:

$$s = vt.$$

Это соотношение показывает, что в равномерном прямолинейном движении путь s пропорционален времени t , за которое он пройден.

Задача 1. Какое время должен находиться в полете самолет ТУ-144, чтобы без посадки пролететь расстояние 6500 км, если его скорость равна 2500 км/ч?

Решение.

$$\left. \begin{array}{l} s = 6500 \text{ км} \\ v = 2500 \text{ км/ч} \end{array} \right| t = \frac{s}{v} = \frac{6500 \text{ км}}{2500 \text{ км/ч}} = 2,6 \text{ ч}.$$

Ответ. $t = 2,6 \text{ ч}$.

Примечание. Решая задачи по физике, следует придерживаться приведенной формы записи условия. В дальнейшем обозначения физических величин в целях краткости приводятся в тексте задачи, а не выносятся в столбик слева.

Задача 2. При равномерном движении двух тел навстречу друг другу расстояние между ними уменьшается на $s = 16 \text{ м}$ за каж-

дые $t = 10$ сек. При движении этих же тел с прежними по величине скоростями в одном направлении расстояние между ними увеличивается на $s_1 = 3$ м за каждые $t_1 = 5$ сек. Какова скорость каждого тела?

Решение. Скорость движения одного тела относительно другого при движении навстречу друг другу

$$u = v_1 + v_2,$$

где v_1 — скорость первого тела, v_2 — скорость второго; а при движении в одном направлении

$$u_1 = v_1 - v_2.$$

Решив систему двух уравнений с двумя неизвестными, получим:

$$v_1 = \frac{u + u_1}{2}, \quad v_2 = \frac{u - u_1}{2}.$$

Значения u и u_1 определяются по условию задачи из соотношений $u = \frac{s}{t}$ и $u_1 = \frac{s_1}{t_1}$:

$$u = \frac{16 \text{ м}}{10 \text{ сек}} = 1,6 \text{ м/сек}; \quad u_1 = \frac{3 \text{ м}}{5 \text{ сек}} = 0,6 \text{ м/сек};$$

$$v_1 = \frac{1,6 \text{ м/сек} + 0,6 \text{ м/сек}}{2} = 1,1 \text{ м/сек};$$

$$v_2 = \frac{1,6 \text{ м/сек} - 0,6 \text{ м/сек}}{2} = 0,5 \text{ м/сек}.$$

Ответ. $v_1 = 1,1$ м/сек; $v_2 = 0,5$ м/сек.

§ 5. Графики скорости и пути равномерного движения

Величина, изменяющаяся в зависимости от изменения другой величины, называется *функцией*, а независимая переменная — *аргументом*. При равномерном движении скорость тела постоянна, а пройденный им путь зависит от времени движения (путь пропорционален времени движения); следовательно, путь — это функция, время — аргумент, а уравнение равномерного прямолинейного движения $s = vt$ является аналитической записью функции s .

Функциональную зависимость двух величин можно изобразить на чертеже в виде некоторой линии, называемой *графиком функции*.

Для построения графика функции значения аргумента берутся произвольно, а соответствующие им значения функции определяются из уравнения. Получив несколько взаимосвязанных значений обеих величин, откладывают их на взаимно перпендикулярных прямых, называемых *осями координат*. Обычно на вертикальной прямой (ось ординат) откладывают значение функции, а на горизонтальной прямой (ось абсцисс) — значения аргумента. Масштаб для каждой величины берется произвольный. Против делений на осях координат ставят числа, соответствующие откладываемым величинам, а на концах осей (у стрелок) — буквенные обозначения откладываемых величин с указанием единиц измерения. По найденным значениям функции и соответствующим им аргументам находят положение отдельных точек. Полученные точки соединяют плавной линией, являющейся графиком функции.

1. *График скорости равномерного движения.* Построим график скорости для значения $v = 3$ м/сек. Так как в равномерном прямолинейном движении скорость является величиной постоянной, то для ряда значений времени она имеет одну и ту же величину

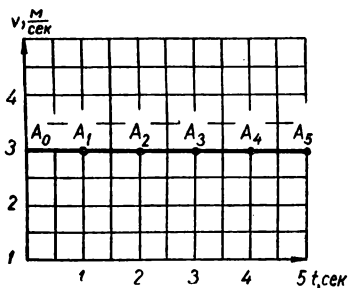


Рис. 1.

$t, \text{сек}$	0	1	2	...
$v, \text{м/сек}$	3	3	3	...

Ось абсцисс примем за ось времени $0t$. Отложим на ней ряд равных отрезков, соответствующих, например, 1 сек. Ось ординат примем за ось скоростей $0v$ и также отложим на ней одинаковые отрезки (не обязательно равные по величине отрезкам на оси абсцисс), соответствующие, например, 1 м/сек (рис. 1). Затем для каждой пары значений времени и скорости найдем на плоскости соответствующие точки (A_0, A_1, A_2, \dots), соединив которые, получим график скорости. Из построения видно, что *график скорости равномерного прямолинейного движения является прямой линией, параллельной оси времени*.

График скорости может быть использован для вычисления пути равномерного движения. Действительно, например, путь, пройденный за 3 сек, равен $s = vt = 3 \text{ м/сек} \cdot 3 \text{ сек} = 9 \text{ м}$. В то же время, как видно из рис. 1, произведение 3 м/сек на 3 сек численно равно площади фигуры $0A_330$.

Аналогичным образом определяется путь, пройденный телом за любой промежуток времени.

Отсюда следует, что путь, пройденный телом при равномерном движении за время t , численно равен площади фигуры, заключенной между осью времени, графиком скорости и ординатами, соответствующими началу и концу отрезка времени t , в течение которого пройден путь.

Вычисление пути по площади в случае равномерного прямолинейного движения не вносит облегчения в расчет, но этот прием важен для других видов движений.

2. *График пути равномерного прямолинейного движения.* Построим график пути равномерного прямолинейного движения для скорости $v = 2$ м/сек. По формуле пути равномерного движения рассчитаем для ряда значений времени значения пути и результаты расчета запишем в таблицу:

$t, \text{сек}$	0	1	2	3	...
$s, \text{м}$	0	2	4	6	...

Отложим на оси абсцисс равные отрезки, соответствующие 1 сек, а на оси ординат — равные отрезки, соответствующие пути в 1 м. Для каждой пары взаимосвязанных значений пути и времени найдем соответствующие точки на плоскости (A_0, A_1, A_2, \dots). Соединив эти точки, получим график зависимости пути от времени для равномерного прямолинейного движения (рис. 2, график I).

Из построения видно, что график пути равномерного прямолинейного движения является прямой линией, проходящей через начало координат.

Следует иметь в виду, что график пути указывает только на характер зависимости пути от времени, но ни в коем случае не является траекторией движения.

Можно сопоставить графики путей нескольких равномерных прямолинейных движений при различных скоростях. Аналогичным образом построим на тех же координатных осях (рис. 2) график пути другого равномерного прямолинейного движения, например для скорости $v = 3$ м/сек. По формуле пути равномерного прямо-

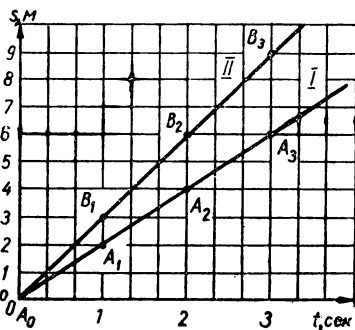


Рис. 2.

линейного движения находим ряд взаимосвязанных значений пути и времени:

$t, \text{сек}$	0	1	2	3	...
$s, \text{м}$	0	3	6	9	...

Отложив эти значения на координатных осях (рис. 2) и соединив найденные точки прямой, получим график пути равномерного прямолинейного движения для другого значения скорости. Все точки графика $II (B_1, B_2, B_3, \dots)$ лежат выше соответствующих точек графика $I (A_1, A_2, A_3, \dots)$. Следовательно, чем больше скорость равномерного прямолинейного движения, тем больший угол составляет график пути с осью времени. При сравнении графиков различных движений масштабы времени и пути должны быть одинаковыми.

§ 6. Векторные и скалярные величины

Скорость, ускорение, сила и ряд других физических величин характеризуются не только численным значением, но и направлением. Величины, характеризующиеся как численным значением, так и направлением, называются *векторными величинами*, или *векторами*. Величины, которые определяются только численными значениями, называются *скалярными величинами*, или *скалярами* (например, температура, время, масса и др).

Вектор графически изображается стрелкой, длина которой (в некоторых произвольных единицах длины) равна численному значению рассматриваемой величины, а направление показывает направление вектора. Вектор изображается полужирной буквой (\mathbf{A}) или обычной буквой со стрелкой над ней (\vec{A}), а его численное значение — этой же буквой без стрелки (A).

Скалярные величины складываются алгебраически, а векторные — геометрически (по правилу параллелограмма). При сложении двух векторов \vec{A} и \vec{B} результирующий вектор \vec{C} определяется диагональю параллелограмма, сторонами которого являются векторы \vec{A} и \vec{B} (рис. 3). Учитывая, что сложение векторов подчиняется переместительному закону, тот же результат получится, если перенести один из векторов, например вектор \vec{B} , параллельно ему же так,

чтобы его начало совпало с концом другого вектора (\vec{A}). Тогда замыкающий вектор, проведенный от начала вектора \vec{A} к концу вектора \vec{B} , и будет результирующим вектором \vec{C} .

При сложении нескольких (более двух) векторов результирующий вектор определяется путем последовательного применения пра-

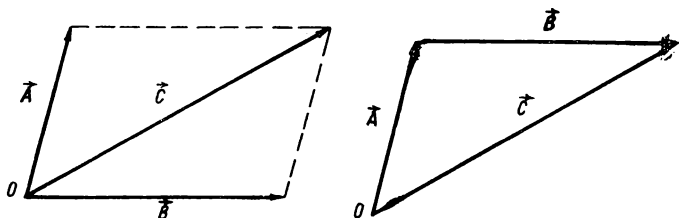


Рис. 3.

вила параллелограмма. Тот же результат получится, если построить ломаную, составляющие которой по величине и направлению совпадают со слагаемыми векторами \vec{A} , \vec{B} , \vec{C} . Результирующий вектор \vec{R} определяется замыкающей, проведенной от начала ломаной к ее концу (рис. 4).

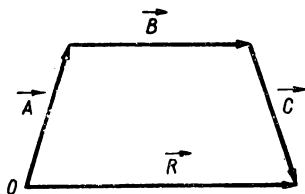


Рис. 4.

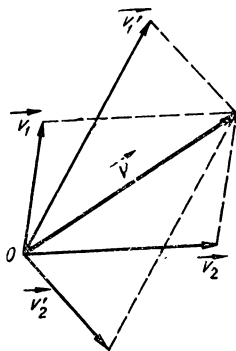


Рис. 5.

Для установления правила вычитания векторов воспользуемся рис. 3. Разностью $\vec{B} = \vec{C} - \vec{A}$ векторов \vec{C} и \vec{A} называется такой вектор \vec{B} , который в сумме с вектором \vec{A} дает вектор \vec{C} . Из этого же рис. 3 видно, что вектор \vec{B} , соединяющий концы двух векторов \vec{A}

и \vec{C} , исходящих из одной точки, является их разностью. Начало этого вектора совпадает с концом вычитаемого, а конец — с концом уменьшаемого.

Задачей, обратной сложению векторов, является разложение вектора на составляющие. Так, в частности, нахождение по данной скорости ее составляющих называется *разложением скорости*. Данная скорость \vec{v} раскладывается на составляющие самым различным образом, так как можно построить сколько угодно параллелограммов с заданной диагональю, равной вектору \vec{v} (рис. 5). Чтобы задача разложения данного вектора \vec{v} на две составляющие была одно-

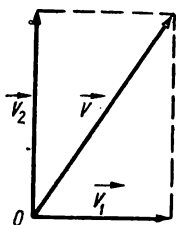


Рис. 6.

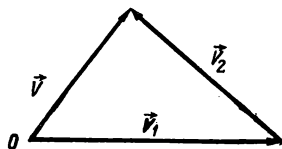


Рис. 7.

значной, нужно дополнительно знать направления составляющих векторов (рис. 6) или величину и направление одного из них (рис. 7).

З а д а ч а. Гребец направляет лодку поперек реки, однако течение относит ее так, что она передвигается под углом в 60° к берегу со скоростью $v = 2$ м/сек. Определить скорость течения реки v_1 и скорость v_2 , с которой двигалась бы лодка при отсутствии течения.

Р е ш е н и е. Движение лодки является сложным, состоящим из движения поперек реки под влиянием усилий гребца и движения, сообщаемого ей течением. Разложим скорость сложного движения \vec{v} на две взаимно перпендикулярные составляющие \vec{v}_1 и \vec{v}_2 (рис. 6), которые являются скоростями составляющих движений. Скорость течения реки v_1 находим из прямоугольного треугольника: $v_1 = v \cos 60^\circ = \frac{v}{2} = \frac{2 \text{ м/сек}}{2} = 1 \text{ м/сек}$, а величина второй составляющей

v_2 равна $v_2 = v \sin 60^\circ = 2 \text{ м/сек} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \approx 1,7 \text{ м/сек}$.

О т в е т. $v_1 = 1 \text{ м/сек}$; $v_2 \approx 1,7 \text{ м/сек}$.

§ 7. Неравномерное движение

Неравномерным движением называется такое движение, при котором за равные промежутки времени тело проходит различные (неодинаковые) пути. Любое переменное движение можно свести к равномерному движению со скоростью, равной средней скорости неравномерного движения. *Средней скоростью неравномерного движения* называют скорость такого равномерного движения, при котором тело проходит тот же путь за то же время, что и при данном неравномерном движении.

Путь s , пройденный телом за время t со средней скоростью v_c , определяется по формуле $s = v_c t$.

Задача 1. Электропоезд, отойдя от станции, первые $s_1 = 100$ м пути проходит за время $t_1 = 10$ сек, а следующие $s_2 = 300$ м — за время $t_2 = 15$ сек. Определить среднюю скорость движения электропоезда при разгоне.

Решение. Средняя скорость движения электропоезда определяется по формуле

$$v_c = \frac{s}{t} = \frac{s_1 + s_2}{t_1 + t_2}; \quad v_c = \frac{100 \text{ м} + 300 \text{ м}}{10 \text{ сек} + 15 \text{ сек}} = 16 \text{ м/сек.}$$

Ответ. $v_c = 16 \text{ м/сек.}$

Примечание. Среднюю скорость нельзя определять как среднее арифметическое значений скоростей на отдельных участках пути. Последнее возможно лишь в том случае, когда время движения на отдельных участках с разными скоростями одинаково, как это имеет место в приводимой ниже задаче.

Задача 2. Первую половину времени своего движения автомобиль перемещался со средней скоростью $v_1 = 60$ км/ч, а вторую — со средней скоростью $v_2 = 40$ км/ч. Определить среднюю скорость движения v_c автомобиля в пути.

Решение. Средняя скорость движения автомобиля определяется по формуле $v_c = \frac{s_1 + s_2}{t}$, где s_1 — путь, пройденный автомобилем со скоростью v_1 , s_2 — путь, пройденный автомобилем со скоростью v_2 , t — время движения автомобиля. Пути s_1 и s_2 определяются по формулам

$$s_1 = v_1 \frac{t}{2}; \quad s_2 = v_2 \frac{t}{2}.$$

Значения путей s_1 и s_2 подставим в формулу средней скорости и найдем ее численное значение:

$$v_c = \frac{v_1 \frac{t}{2} + v_2 \frac{t}{2}}{t} = \frac{v_1 + v_2}{2} = \frac{(40 + 60) \text{ км/ч}}{2} = 50 \text{ км/ч.}$$

Отв. $v_c = 50 \text{ км/ч.}$

Простейшим видом неравномерного движения является *движение равнопеременное*, в котором за любые равные промежутки времени скорость изменяется на одну и ту же величину. Быстрота изменения скорости характеризуется величиной, называемой *ускорением*. Ускорение равнопеременного движения — это величина, измеряемая изменением скорости в единицу времени. Так, если начальная скорость тела v_0 и за время t скорость изменилась до значения v , то ускорение a , согласно определению, равно

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

Отсюда конечная скорость

$$v = v_0 + at.$$

По этой формуле можно определить значение скорости равнопеременного движения в любой момент времени или в любой точке траектории, т. е. найти *мгновенную скорость*.

Положив в формуле ускорения $v - v_0 = 1 \text{ м/сек}$ и $t = 1 \text{ сек}$, получим *единицу ускорения* в системе СИ:

$$1 \text{ м/сек}^2 = \frac{1 \text{ м/сек}}{1 \text{ сек}},$$

т. е. за единицу ускорения в системе СИ принимается ускорение такого равнопеременного движения, при котором за каждую секунду скорость изменяется на 1 м/сек . Наименование единицы ускорения читается так: «метр в секунду за секунду», или «метр, деленный на секунду в квадрате». В системе СГС за единицу ускорения принимают 1 см/сек^2 .

Поскольку скорость является вектором, а ускорение измеряется величиной изменения скорости за единицу времени, то ускорение является вектором того же направления, что и приращение скорости.

Средняя скорость равнопеременного движения определяется по формуле

$$v_c = \frac{v + v_0}{2}.$$

Формула пути равнопеременного движения выводится так. Подставляем значение средней скорости в формулу пути равномерного движения и, заменяя конечную скорость v ее выражением, получаем

$$s = \frac{v_0 + v}{2} t = \frac{v_0 + v_0 + at}{2} t = \frac{(2v_0 + at) t}{2};$$

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2}.$$

Часто при решении задач на определение пути равноускоренного движения время неизвестно, но зато известны начальная скорость, ускорение и конечная скорость. В таком случае время определяется из формулы конечной скорости $t = \frac{v - v_0}{a}$ и его значение подставляется в формулу пути этого движения

$$s = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}; \quad v^2 - v_0^2 = 2as.$$

Полученные формулы

$$v = v_0 + at, \quad s = v_0 t + \frac{at^2}{2} \text{ и } v^2 - v_0^2 = 2as$$

пригодны как для равноускоренного, так и для равнозамедленного движения; при этом для равноускоренного движения ускорение a положительное ($a > 0$), а для равнозамедленного — отрицательное ($a < 0$).

Формулы для скорости и пути равноускоренного движения без начальной скорости получим из вышеприведенных формул, если в них принять начальную скорость равной нулю ($v_0 = 0$), т. е.

$$v = at; \quad s = \frac{at^2}{2}; \quad v^2 = 2as.$$

Частным случаем равноускоренного движения без начальной скорости является *свободное падение*. Свободным падением называется движение тела только под действием силы тяжести из состояния покоя. Ускорение свободного падения в одном и том же месте Земли, как показывает опыт, для всех тел одинаково и приблизительно равно $g = 9,8 \text{ м/сек}^2$. Формулы для скорости и пути свободного падения получим из формул равноускоренного движения без начальной скорости, заменив в них ускорение a на ускорение свободного падения g , т. е.

$$v = gt; \quad h = \frac{gt^2}{2}; \quad v = \sqrt{2gh}.$$

В этих формулах путь s заменен высотой падения h .

Частным случаем равнопеременного движения является движение тела, брошенного вертикально вверх; для получения формул скорости и высоты его подъема следует только в формулах равнопеременного движения с начальной скоростью ускорение a заменить на $-g$, т. е.

$$v = v_0 - gt; \quad h = v_0 t - \frac{gt^2}{2},$$

где h — высота, на которую поднимется тело за время t .

Формулу для определения высоты можно также получить, рассматривая движение тела, брошенного вертикально вверх, как сложное, состоящее из двух движений: равномерного, направленного вертикально вверх со скоростью v_0 (с которой тело брошено), и равноускоренного — свободного падения. Так как эти два движения происходят по одной прямой, то высота h , на которую поднимется тело, равна алгебраической сумме путей, пройденных в каждом отдельном движении.

Задача 3. Тело брошено вертикально вверх с начальной скоростью v_0 . Определить: 1) время подъема, 2) высоту подъема, 3) конечную скорость при падении на землю и 4) время падения. При расчетах сопротивлением воздуха пренебречь.

Решение. 1) В момент, когда тело достигает наивысшей точки, оно останавливается, т. е. его конечная скорость равна нулю ($v = 0$). Положив в формуле скорости $v = v_0 - gt$, $v = 0$, имеем: $0 = v_0 - gt$; отсюда определяем время подъема

$$t = \frac{v_0}{g}.$$

2) Высота подъема тела определяется по формуле

$$h = v_0 t - \frac{gt^2}{2};$$

если в нее подставить значение времени подъема, то

$$h = \frac{v_0 v_0}{g} - \frac{g v_0^2}{2g^2} = \frac{v_0^2}{g} - \frac{v_0^2}{2g} = \frac{v_0^2}{2g}.$$

3) Конечная скорость тела при падении его на землю определяется по формуле $v^2 = 2gh$; подставив значение h , получим

$$v^2 = 2g \frac{v_0^2}{2g} = v_0^2; \quad v = v_0,$$

т. е. конечная скорость падения равна начальной скорости, с которой тело брошено вертикально вверх.

4) Из формулы скорости свободного падения время падения $t' = \frac{v}{g}$. Так как $v = v_0$, то $t' = t$, т. е. время падения равно времени подъема.

Задача 4. С аэростата, находящегося на высоте $h = 300$ м, упал камень. Через какое время камень достигнет земли, если: 1) аэростат неподвижен, 2) аэростат опускается со скоростью $v_0 = 4,9$ м/сек, 3) аэростат поднимается со скоростью $v'_0 = 4,9$ м/сек. Сопротивлением воздуха пренебречь.

Решение. 1) В первом случае (аэростат неподвижен) камень свободно падает и время его падения определяется по формуле

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}; \quad t = \sqrt{\frac{2 \cdot 300 \text{ м}}{9,8 \text{ м/сек}^2}} = 7,8 \text{ сек.}$$

2) Во втором случае (аэростат опускается) камень падает равноускоренно с начальной скоростью v_0 , равной скорости опускания аэростата. Время падения определяем из формулы пути равноускоренного движения с начальной скоростью

$$h = v_0 t + \frac{gt^2}{2}.$$

Решая квадратное уравнение относительно времени, получаем

$$t = -\frac{v_0}{g} \pm \sqrt{\frac{v_0^2}{g^2} + 2\frac{h}{g}}.$$

Численное значение времени равно

$$t = -\frac{4,9 \text{ м/сек}}{9,8 \text{ м/сек}^2} + \sqrt{\frac{4,9^2 \text{ м}^2/\text{сек}^2}{9,8^2 \text{ м}^2/\text{сек}^4} + \frac{600 \text{ м}}{9,8 \text{ м/сек}^2}} = 7,3 \text{ сек.}$$

3) В третьем случае (аэростат поднимается) камень в течение времени

$$t_1 = \frac{v'_0}{g} = \frac{4,9 \text{ м/сек}}{9,8 \text{ м/сек}^2} = 0,5 \text{ сек}$$

равнозамедленно движется вверх, а затем в течение времени, равного $t_2 = t_1 + t$ (где t_1 — время падения камня до высоты, на которой он выпал из аэростата; t — время падения с этой высоты до поверхности земли) равноускоренно движется вниз. Численное значение времени $t_2 = 0,5 \text{ сек} + 7,3 \text{ сек} = 7,8 \text{ сек}$. Следовательно, камень упадет на землю через

$$t_1 + t_2 = 0,5 \text{ сек} + 7,3 \text{ сек} = 8,3 \text{ сек}.$$

П р и м е ч а н и е. Время падения камня, брошенного с аэростата во время подъема, можно определить иначе. Камень одновременно участвует в двух движениях: равномерном, которое направлено вертикально вверх и имеет скорость v_0 , и в свободном падении. Оба движения происходят по одной и той же прямой, и для искомого времени t путь первого меньше, чем второго, на величину h ; т. е. имеет место равенство

$$\frac{gt^2}{2} - v_0 t = h.$$

Отсюда легко определить время t .

Контрольные вопросы к главе «Кинематика»

- 1) Какое движение называется механическим?
- 2) Что называется системой отсчета?
- 3) Что называется материальной точкой? траекторией тела?
- 4) Как подразделяют механические движения по виду траектории и по изменению скорости?
- 5) Какое движение называется поступательным? вращательным?
- 6) Какие величины называются векторными? скалярными?
- 7) В чем состоит правило сложения векторов?
- 8) В каких случаях разложение вектора на две составляющие является единственно возможным?
- 9) Как зависит величина результирующего вектора, который является суммой двух векторов, приложенных в одной точке, от угла между слагаемыми векторами? В каком случае величина результирующего вектора будет максимальной и в каком — минимальной?
- 10) Как найти результирующий вектор для двух векторов, которые лежат в одной плоскости, приложены к разным точкам и образуют острый (тупой) угол?
- 11) Какое движение называется равномерным и какое — равнопеременным?

12) Перечислите основные кинематические величины, характеризующие равномерное и равнопеременное движения, и дайте их определения.

13) Назовите единицы измерения пути, скорости и ускорения в системах СИ и СГС и дайте их определения.

14) Что называется средней скоростью переменного движения? мгновенной скоростью?

15) Как графически изображается вектор скорости?

16) Какой вид имеют графики пути и скорости равномерного движения и скорости равнопеременного движения?

17) Как по графику скорости равномерного движения определить путь, пройденный телом?

18) Какие существуют виды прямолинейного движения и каково направление ускорения в каждом из них?

19) Как выводятся уравнения скорости и пути равноускоренного движения без начальной скорости?

20) Как выводятся уравнения скорости и пути равнопеременного движения с начальной скоростью, отличной от нуля?

21) В чем сходство и различие графиков скорости равноускоренного движения и равнозамедленного движения?

22) Какое движение называется свободным падением?

23) Каково соотношение между скоростью и высотой при свободном падении тела?

24) Пути, проходимые телом за любые равные промежутки времени, последовательно увеличиваются на одну и ту же величину. Можно ли считать такое движение равноускоренным?

25) Как движется тело, брошенное вертикально вверх?

26) Чему равно ускорение тела, брошенного вертикально вверх?

27) Тело брошено вертикально вверх со скоростью v_0 . Чему равны время подъема? высота подъема? время падения? конечная скорость при падении на землю?

Вопросы и задачи к главе «Кинематика»

1. Почему любое движение тела или состояние покоя всегда является относительным?

2. Укажите, какие точки колеса автомашины, движущейся по дороге, совершают поступательное движение.

3. Как движется кабина, свободно подвешенная к ободу вращающегося «чертова» колеса?

4. Два пассажира идут по палубе движущегося парохода, оставаясь на неизменном расстоянии друг от друга. Указать, относи-

тельно каких-то. Каждый из идущих находится в состоянии покоя и относительно каких перемещается.

5. Самый большой в мире самолет «Антей» (АН-22), построенный в СССР, развивает скорость 205 м/сек . Выразить эту скорость в км/ч .

6. Самолет ТУ-144 и вертолет МИ-6 вылетели одновременно из пункта А в пункт В, находящийся на расстоянии 1000 км от пункта А. На сколько раньше вертолета прилетит в пункт В самолет, если скорость самолета 2500 км/ч , а скорость вертолета 80 м/сек ?

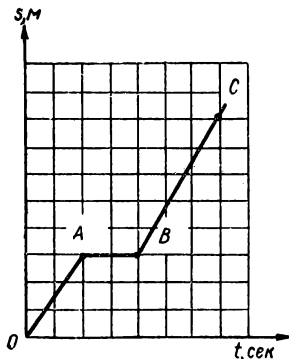


Рис. 8.

7. Проплывая на лодке по реке, рыбак под мостом уронил в воду багор. Через $t = 30 \text{ мин}$, обнаружив потерю, он повернул назад и догнал багор на расстоянии $s = 3,6 \text{ км}$ ниже моста. Какова скорость течения реки в метрах за секунду, если рыбак, двигаясь вверх и вниз по реке, греб одинаково?

8. Два пассажирских поезда, длиной $s_1 = 150 \text{ м}$ и $s_2 = 100 \text{ м}$, движутся навстречу друг другу соответственно со скоростями $v_1 = 16 \text{ м/сек}$ и $v_2 = 20 \text{ м/сек}$. В течение какого времени проходит первый поезд перед окном вагона второго поезда и второй поезд — перед окном вагона первого поезда?

9. По нефтепроводу «Дружба», построенному в 1964 г., было перекачено в 1965 г. из СССР в ВНР, ГДР, ПНР и

ЧССР приблизительно $M = 20\,000\,000 \text{ т}$ нефти. Как часто должны были бы идти на запад железнодорожные составы для перевозки этого количества нефти, если бы каждый состав имел $n = 45$ цистерн грузоподъемностью $m = 25 \text{ т}$ каждая?

10. Человек находится на расстоянии $s = 50 \text{ м}$ от прямой дороги, по которой движется автомобиль со скоростью $v = 10 \text{ м/сек}$. С какой наименьшей скоростью v_1 и в каком направлении должен бежать человек, чтобы встретиться с автомобилем, находящимся на расстоянии $l = 200 \text{ м}$ от него?

11. На рис. 8 изображен график зависимости пути от времени. Интервал между делениями по оси ординат соответствует 15 м , а по оси абсцисс — 1 сек . Ответить на следующие вопросы:

а) В течение какого времени тело находилось в состоянии покоя?

б) Какой участок графика (ОА, АВ или ВС) соответствует наибольшей скорости движения?

в) Какова средняя скорость на пути 120 м ?

12. Расстояние s между двумя лодочными станциями лодка проходит по течению реки за $t_1 = 15$ мин, а против течения — за $t_2 = 40$ мин. За какое время это расстояние проплывет вниз по реке спасательный круг?

13. На рис. 9 приведены графики пути четырех тел. Какое движение передано на каждом из приведенных на рисунке графиков $I-IV$? Какие из тел имеют наибольшую скорость? Что означают точки пересечения графиков? точки излома графиков?

14. От автобусной станции A отошел автобус со скоростью 60 км/ч. После каждого часа движения автобус делает пятнадцатиминутную остановку. Спустя полчаса после выхода автобуса в том же направлении со станции B (через станцию A) выехал такси со скоростью 80 км/ч. Построить на одних и тех же координатных осях графики путей и по ним определить, через какое время такси догонит автобус и какой путь оно пройдет при этом. Расстояние между станциями 30 км.

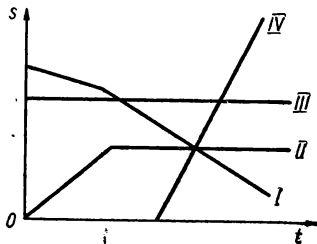


Рис. 9.

15. Через реку перпендикулярно течению переправляется лодка. Скорость течения реки $v_1 = 8$ км/ч, скорость лодки против течения $v' = 17$ км/ч. Определить величину и направление скорости движения лодки.

16. Какую скорость должен сообщить двигатель вертолету и в каком направлении должен лететь вертолет, чтобы при западном ветре, имеющем скорость 15 м/сек, он летел на север со скоростью 75 м/сек?

17. Какую наименьшую скорость должен сообщить двигатель катеру, чтобы при скорости течения реки $v_1 = 4$ м/сек он двигался под углом 60° к течению?

18. Скорость лодки относительно воды $v_1 = 5$ км/ч направлена под углом $\alpha = 60^\circ$ к берегу. С какой скоростью и под каким углом к берегу будет двигаться лодка, если скорость течения реки $v_2 = 3$ км/ч?

19. Первую половину пути автомобиль двигался со скоростью $v_1 = 60$ км/ч, а вторую — со скоростью $v_2 = 40$ км/ч. Определить среднюю скорость движения автомобиля в течение всего пути.

20. Велосипедист едет по пересеченной местности. Когда дорога идет в гору, скорость его равна $v_1 = 5$ км/ч, а под гору — $v_2 = 20$ км/ч. Какова средняя скорость велосипедиста, если весь путь, пройденный при подъеме, равен пути при спуске?

21. Каков физический смысл каждого члена в отдельности в формуле $s = v_0 t + \frac{at^2}{2}$?

22. Доказать, что $s' : s'' : s''' \dots = 1 : 3 : 5 \dots$, где s' , s'' , s''' — пути, проходимые телом при равноускоренном движении без начальной скорости, за последовательно равные промежутки времени.

23. Доказать, что при равноускоренном движении $v^2 - v_0^2 = 2as$.

24. Поезд отошел от станции и 15 сек двигался равноускоренно. Определить путь, пройденный за это время, и скорость поезда в конце пути, если известно, что за 15-ю секунду пройден путь на $l = 2$ м больше, чем за предыдущую.

25. Чему равны скорость в конце первой секунды и путь, пройденный телом за первую секунду, при свободном падении?

26. С крыши здания высотой $h = 8$ м через равные промежутки времени падают капли воды, причем пятая капля отрывается от крыши в момент удара первой капли о землю. Определить величину этих промежутков времени. Определить расстояния между отдельными каплями в момент отрыва пятой капли.

27. С каким интервалом во времени оторвались от водосточной трубы две капли, если спустя 2 сек после отрыва второй капли расстояние между ними было 25 м?

28. Тело брошено вертикально вверх с начальной скоростью v_0 . Какую скорость оно приобретает, пройдя половину пути?

29. Свободно падающее тело в течение двух последних секунд проходит четвертую часть всего пути. Определить время и высоту падения.

30. Первый вагон электропоезда прошел мимо наблюдателя за $t_1 = 4$ сек. За какое время пройдет мимо него десятый вагон, если в начале движения электропоезда наблюдатель стоял у переднего края первого вагона? Движение поезда считать равноускоренным, расстоянием между вагонами пренебречь.

31. Жонглер подбросил тарелку вертикально вверх. Когда она достигла верхней точки своего пути длиной $h = 6$ м, была подброшена вторая тарелка с той же начальной скоростью. На какой высоте тарелки встретились?

32. Два тела брошены одновременно навстречу друг другу с начальной скоростью $v_0 = 80$ м/сек: одно вертикально вверх, другое — вертикально вниз из точки наивысшего подъема первого тела. На какой высоте и через какое время эти тела встретятся? Какую скорость будут они иметь в момент встречи (принять $g = 10$ м/сек²)?

33. Построить график скорости равноускоренного движения без начальной скорости, если ускорение $a = 0,3$ м/сек².

34. Построить график скорости равноускоренного движения, если $v_0 = 2$ м/сек и $a = 1$ м/сек².

35. Построить график скорости равнозамедленного движения, если $v_0 = 10$ м/сек и $a = -1$ м/сек².

36. Построить график скорости движения тела, которое в течение первых 5 сек двигалось без начальной скорости с ускорением 2 м/сек^2 , в течение следующих 8 сек — равномерно с достигнутой скоростью, а затем, до остановки, — равнозамедленно с ускорением $-2,5 \text{ м/сек}^2$. Определить по этому графику пройденный телом путь.

37. На рис. 10 приведены графики скоростей движения четырех тел. Определить: а) каков характер движения каждого тела; б) что означают точки пересечения графиков с координатными осями; в) что означают точки пересечения графиков и изломы графиков; г) какое из рассматриваемых движений I—IV происходит с наибольшим ускорением.

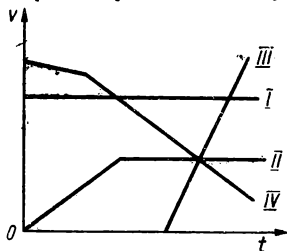


Рис. 10.

38. Пользуясь графиком скорости равнопеременного движения, вывести формулу пути для этого движения: $s = v_0 t + \frac{at^2}{2}$.

Глава II. ДИНАМИКА

В предыдущей главе мы рассматривали перемещение тел в зависимости от времени, не касаясь причин, под действием которых покоящееся тело приходит в движение или движущееся тело замедляет либо ускоряет свое движение, а также того, при каких условиях тело находится в равновесии, т. е. в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения. Раздел механики, в котором устанавливается и изучается связь между движением физических тел и действующими на них силами, называется *динамикой*. Динамика устанавливает общие количественные соотношения между различными физическими величинами, которые связаны с движением материи (масса, сила, количество движения, работа, энергия и др.).

Основные положения динамики сформулированы И. Ньютоном в виде трех законов.

§ 8. Первый закон Ньютона

Исходя из опытов и наблюдений, И. Ньютон установил, при каких условиях тело находится в состоянии относительного покоя и когда оно движется.

Первый закон Ньютона может быть сформулирован следующим образом: *всякое тело сохраняет состояние покоя или прямолинейного равномерного движения до тех пор, пока на это тело не подействуют другие тела.*

Из первого закона Ньютона следует, что если на тело не действуют другие тела, то оно движется со скоростью, постоянной по величине и направлению. Покой же есть частный случай движения со скоростью, равной нулю.

Свойство тела сохранять состояние покоя или равномерного и прямолинейного движения называется *инерцией* тела (инерция — слово латинское, означающее «косность», «бездеятельность»). Инерция — одно из самых общих свойств материи, ею обладают все тела, где бы они ни находились. Первый закон Ньютона также называют *законом инерции*.

Проверить непосредственно на опыте первый закон Ньютона невозможно, так как нельзя полностью устранить действие всех окружающих тел. Наиболее трудно устранить трение одного тела о другое. Однако легко обнаружить, что скорость движущегося тела уменьшается тем медленнее, чем меньше помех со стороны окружающих тел. Так, бросаемый при одинаковом усилии шарик по твердому грунту катится дальше, чем по песку, а по асфальту дальше, чем по грунту. Наблюдаемое обычно состояние покоя окружающих нас предметов обусловлено тем, что воздействие одних тел компенсируется воздействием других тел. Например, притяжение любого покоящегося тела Землей компенсируется реакцией опоры или подвеса.

С проявлением инерции тел мы встречаемся постоянно. Всем хорошо известно, что при внезапном изменении скорости движущегося трамвая, например, пассажиры, сохраняя свое предыдущее состояние, наклоняются вперед, если скорость движения уменьшается, назад — если скорость увеличивается, и вправо, если трамвай поворачивает влево. В последнем случае пассажиры сохраняют прямолинейное движение.

Вследствие инертности нельзя мгновенно изменить скорость движения тела.

§ 9. Сила. Масса тела

Из первого закона Ньютона следует, что скорость тела изменяется по величине и направлению в результате воздействия на него каких-либо других тел. Величину, характеризующую воздействие одного тела на другое, в результате которого изменяется скорость, называют *силой*. Вместо того чтобы говорить, что одно тело действует на другое, говорят, что на тело действует сила.

В результате действия на тело силы изменяется его скорость или скорость отдельных частей тела. Но изменение скорости характеризуется ускорением. Следовательно, сила, действующая на какое-либо тело, сообщает ему ускорение или деформирует его. В зависимости от способа воздействия одного тела на другое в механике различают *силы упругости, трения и тяжести*.

О величине силы можно судить, например, по величине деформации пружины. Удлинение пружины пропорционально действующей силе. Это позволяет проградуировать растяжение пружины в единицах силы и использовать ее в приборе для измерения сил — в динамометре.

Из опытов следует, что ускорение тела пропорционально действующей на тело силе, т. е.

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{a_1}{a_2}; \quad \frac{F_2}{F_3} = \frac{a_2}{a_3} \text{ и т. д.}$$

Из этих пропорций следует, что

$$\frac{F_1}{a_1} = \frac{F_2}{a_2} = \frac{F_3}{a_3} = \dots = \frac{F}{a},$$

т. е. отношение силы, действующей на тело, к сообщаемому ему ускорению есть величина постоянная. Опыт показывает также, что для другого тела это отношение имеет иное значение. Следовательно, можно утверждать, что отношение силы к ускорению характеризует определенное свойство тел: чем меньше это отношение, тем меньшая сила нужна для сообщения данному телу определенного ускорения. Физическое свойство тела, от которого зависит величина ускорения, приобретаемого телом под действием различных сил, называется его *инертностью*. Таким образом, отношение $\frac{F}{a}$ может служить мерой инертности тела; это отношение называют *массой* тела m .

В системе СИ единицей массы является килограмм (кг). Килограмм — единица массы — представлен массой международного прототипа килограмма, хранящегося в Международном бюро мер и весов в Севре (Франция).

Для сравнения масс различных тел пользуются понятием плотности. *Плотность вещества* — это величина, измеряемая массой вещества в единице объема. Если масса тела m , а объем V , то плотность тела

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

За единицу плотности вещества в системе СИ принимается 1 кг/м^3 , а в системе СГС — 1 г/см^3 . Плотность вещества в г/см^3 , кг/дм^3 и в т/м^3 выражается одним и тем же числом, так как увеличение числителя и знаменателя в 1000 раз не изменяет отношения.

Задача. Латунь состоит из 65% меди и 35% цинка. Определить плотность сплава.

Решение. Если масса латуни m , ее объем V , то плотность латуни $\rho = \frac{m}{V}$.

Объем латуни V равен сумме объема меди $V_1 = \frac{0,65m}{\rho_1}$ и объема цинка $V_2 = \frac{0,35m}{\rho_2}$, т. е.

$$V = V_1 + V_2 = \frac{0,65m}{\rho_1} + \frac{0,35m}{\rho_2}.$$

Подставив значение объемов в формулу для плотности ρ , получаем

$$\rho = \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{0,65\rho_2 + 0,35\rho_1}; \quad \rho = \frac{8,9 \text{ г/см}^3 \cdot 7,1 \text{ г/см}^3}{0,65 \cdot 7,1 \text{ г/см}^3 + 0,35 \cdot 8,9 \text{ г/см}^3} = 8,2 \text{ г/см}^3.$$

Ответ. $\rho = 8,2 \text{ г/см}^3$.

§ 10. Второй закон Ньютона

Поскольку $m = \frac{F}{a}$, то $a = \frac{F}{m}$ и $F = ma$. Эти равенства являются математическими выражениями второго закона Ньютона. Последнее из приведенных равенств читается так: *сила, сообщающая телу ускорение, равна произведению массы тела на приобретенное им ускорение.*

Таким образом, второй закон Ньютона устанавливает соотношение между силой, массой тела и ускорением.

Сила есть величина векторная, имеющая направление, совпадающее с направлением ускорения. За единицу силы в системе СИ принимается 1 ньютон (н). Эта единица является производной, устанавливаемой по второму закону Ньютона: $1 \text{ н} = 1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ м/сек}^2$, т. е. 1 н — это сила, которая массе в 1 кг сообщает ускорение 1 м/сек^2 .

Единицей силы в системе СГС является дина: $1 \text{ дин} = 1 \text{ г} \cdot 1 \text{ см/сек}^2$. Соотношение между этими единицами следующее: $1 \text{ н} = 1000 \text{ г} \times 100 \text{ см/сек}^2 = 10^5 \text{ дин}$.

Частным случаем силы является вес тела. *Весом тела* называется сила, с которой неподвижное относительно Земли тело давит на горизонтальную подставку, на которой оно лежит, или растягивает нить, на которой оно висит. Как будет показано ниже, вес тела приближенно равен силе притяжения тела Землей. Согласно второму закону Ньютона, вес тела

$$P = mg.$$

Вес тела в системе СИ измеряется теми же единицами, что и сила, — ньютонами. На практике часто пользуются единицей силы (веса) 1 кг . 1 кг — это сила, сообщаящая массе 1 кг ускорение $g = 9,80665 \text{ м/сек}^2$. Очевидно, $1 \text{ кг} = 1 \text{ кг} \cdot 9,80665 \text{ м/сек}^2 \approx 9,8 \text{ н} = 9,8 \cdot 10^5 \text{ дин}$.

Задача. К концам нити, перекинутой через укрепленный неподвижный блок, подвешены грузы массами $m_1 = 95 \text{ г}$ и $m_2 = 105 \text{ г}$. Более тяжелый груз вначале поднят в верхнее положение, а затем отпущен. Определить, на каком расстоянии от верхнего положения будет находиться тяжелый груз через $t = 2 \text{ сек}$?

Решение. Освобожденный груз массой m_2 придет в равноускоренное движение; одновременно с ним придет в равноускоренное движение груз массой m_1 . Грузы начали движение из состояния покоя, поэтому путь, пройденный грузом (одним — вверх, а другим — вниз), определится по формуле пути равноускоренного движения без начальной скорости, т. е. по формуле $h = \frac{at^2}{2}$. Ускорение a , по

второму закону Ньютона, равно $a = \frac{F}{m}$, где F — сила, равная разности весов гирь, т. е. $F = P_2 - P_1 = (m_2 - m_1)g$, а $m = m_2 + m_1$ — масса движущейся системы, тогда

$$a = \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1} g.$$

Искомое расстояние

$$h = \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1} \cdot g \cdot \frac{t^2}{2}; \quad h = \frac{105 \text{ г} - 95 \text{ г}}{105 \text{ г} + 95 \text{ г}} \cdot 9,8 \text{ м/сек}^2 \cdot \frac{4 \text{ сек}^2}{2} = 0,98 \text{ м}.$$

Ответ. $h = 0,98 \text{ м}$.

Примечание. Если при решении подобных задач в числитель и знаменатель или в правую и левую части равенства входят в качестве множителей величины одного наименования в одной и той же степени, то их можно не переводить в ту систему единиц, в которой решается задача, а брать в любых, но одинаковых единицах, так как их наименования взаимно сократятся.

§ 11. Третий закон Ньютона

Из определения понятия силы следует, что взаимодействующие тела равноправны: нет тел только действующих и только испытывающих действие. Всегда существует взаимодействие тел.

Согласно третьему закону Ньютона, *действия тел друг на друга всегда равны по величине и противоположны по направлению*, т. е.

$$F_1 = -F_2.$$

При этом силы действия и противодействия F_1 и F_2 приложены к разным телам.

Таким образом, сила характеризуется тремя признаками: величиной, направлением и точкой приложения.

Разделение сил на действующие и противодействующие является условным: от нас зависит, какую из сил назвать действующей, а какую — противодействующей. Из третьего закона Ньютона следует, что эти силы, хотя и равны между собой, но не уравновешиваются, потому что они приложены к разным телам. Так, например, если мы нажимаем рукой на стол, то стол «жмет» на руку с такой же силой.

В качестве примера рассмотрим еще и случай свободного падения камня. Земля притягивает камень с такой же силой, с какой камень притягивает Землю. В результате этого камень и Земля движутся навстречу друг другу с ускорениями, обратно пропорциональными их массам. Так как масса Земли во много раз больше массы камня, то ускорение Земли практически равно нулю, а камень движется относительно Земли. Еще пример: лошадь тянет телегу с такой же силой, с какой телега тянет лошадь, но телега движется за лошадью, а не наоборот, так как лошадь, а не телега, отталкивается от Земли. Движение лошади вместе с телегой возможно лишь потому, что существует трение, и лошадь, упираясь подковами, перемещается относительно Земли (Земля практически остается неподвижной). При отсутствии трения передвижение тел было бы невозможным.

Задача. Два мальчика тянут веревку за противоположные концы. Один из них может действовать с силой 200 н, а другой — с силой 150 н. Каково показание динамометра?

Решение. Согласно третьему закону Ньютона, силы, приложенные к концам веревки, должны быть одинаковыми по величине. Отсюда следует, что показание динамометра равно величине меньшей силы, т. е. 150 н.

Ответ. Динамометр покажет 150 н.

§ 12. Трение

При перемещении одного тела по поверхности другого возникают силы, препятствующие движению, направленные против движения; они называются *силами трения*. Основной причиной трения соприкасающихся тел являются шероховатости на их поверхностях. Различают силы трения скольжения и силы трения качения. Сила трения скольжения в довольно широких пределах не зависит от величины соприкасающихся поверхностей твердых тел.

Величина, равная отношению силы трения скольжения F к силе нормального давления F_n , называется *коэффициентом трения скольжения*

$$k = \frac{F}{F_n}.$$

Там, где трение полезно, его увеличивают, а там, где оно вредно, — его уменьшают.

Во всех машинах часть затрачиваемой работы идет на преодоление сил трения, в результате чего трущиеся тела нагреваются. В этих случаях трение вредно, его необходимо уменьшить.

Для уменьшения силы трения применяют смазку или же заменяют трение скольжения трением качения, используя шариковые либо роликовые подшипники. Смазка, располагаясь тонким слоем на поверхностях трущихся тел, заполняет шероховатости, и в этом случае не трутся одна о другую поверхности соприкасающихся тел, а скользят друг относительно друга слои смазки.

Силы трения, возникающие при движении твердых тел в жидкостях или газах, называются *силами сопротивления среды*.

Сила трения покоя в жидкости или газе отсутствует. С увеличением скорости движения сила сопротивления среды растёт.

§ 13. Количество движения. Закон сохранения количества движения

Если по шоссе движется только одна машина, мы не скажем, что на этом шоссе движение большое, даже если машина имеет значительную скорость. Мы не скажем этого также и тогда, когда на каком-либо участке трассы произошел затор. Если же по шоссе движется множество машин, причем с высокими скоростями, то говорят, что на этой трассе большое движение. Таким образом, движение характеризуется одновременно массой и скоростью движущихся тел.

Для количественной характеристики движения тел вводится понятие количества движения *mv*. *Количеством движения* какого-либо тела называют произведение массы *m* движущегося тела на скорость *v*. Количество движения является векторной величиной, ее направление совпадает с направлением скорости тела.

Установим соотношение между количествами движения взаимодействующих тел. С этой целью воспользуемся третьим законом Ньютона, согласно которому для двух взаимодействующих тел имеет место равенство сил действия и противодействия:

$$F_1 = -F_2.$$

Заменив силы произведением масс тел на их ускорения, получим: $m_1 a_1 = -m_2 a_2$. Подставляем в полученное равенство значение ускорений, определяемых по формулам

$$a_1 = \frac{v_1 - v_0}{t}; \quad a_2 = \frac{v_2 - v'_0}{t},$$

где v_0 и v'_0 — начальные скорости тел, а v_1 и v_2 — конечные скорости, приобретенные по прошествии времени взаимодействия тел t . Имеем:

$$m_1 \frac{v_1 - v_0}{t} = -m_2 \frac{v_2 - v'_0}{t}.$$

Сократив на t , перепишем полученное равенство так:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_0 + m_2 v'_0.$$

Здесь в левой части равенства стоит сумма количеств движений взаимодействующих тел после взаимодействия, а справа — до взаимодействия. Отсюда следует, что *сумма количеств движения взаимодействующих тел не изменяется* (закон сохранения количества движения).

Закон сохранения количества движения является одним из основных законов физики. Он справедлив при взаимодействии не только больших тел, но также и молекул, атомов, элементарных частиц.

Примером может служить полет обычной сигнальной ракеты. Под действием силы давления пороховых газов, образующихся в результате сгорания пороха, ракета приобретает скорость, направленную в сторону, противоположную направлению выхода газов.

Идея применения реактивной силы для создания летательных аппаратов известна с давних пор. Более 2000 лет назад китайцы применили «реактивные» стрелы при осаде городов. Проект первого реактивного летательного аппарата был создан в 1881 г. революционером-народником Н. И. Кибальчицем. Теорию реактивного двигателя, работающего на жидком топливе, создал К. Э. Циолковский в 1908 г. Бурное развитие реактивной техники, начавшееся в период второй мировой войны, происходит и в наше время. Большой круг научных и технических вопросов, связанных с конструированием, с проблемой запуска и возвращения на Землю космических кораблей, был решен под руководством советского ученого и конструктора С. П. Королёва. Одна из первых ракет конструкции С. П. Королева поступила на испытание в 1937 г. Первый свободный полет советского ракетопланера на жидком топливе состоялся в 1940 г. 4 октября 1957 г. на орбиту вышло первое космическое тело, созданное человеком, — первый советский искусственный спутник Земли. 12 апреля 1961 г. впервые в истории побывал в космосе человек — гражданин Советского Союза Ю. А. Гагарин. Затем была сфотографирована обратная сторона Луны, созданы искусственные спутники Луны и также искусственная планета, доставлены земные тела на Луну и Венеру, наконец, 8.X 1967 г. совершена мягкая посадка автоматической станции на планету Венеру.

Реактивным действием обладает струя не только газа, но и жидкости. На реактивном действии водяной струи основано устройство водяных турбин гидроэлектростанций.

Задача 1. Ракета весом $P_1 = 3$ н поднимается на высоту $h = 100$ м. Запас пороха в ракете составляет $m_2 = 40$ г. Сгорает порох сразу. С какой скоростью истекают пороховые газы из ракеты? Сопротивлением воздуха пренебречь.

Решение. До начала сгорания пороха полное количество движения системы ракета — порох было равно нулю. После сгорания пороха ракета получила количество движения $m_1 v_1$, а пороховые газы $m_2 v_2$. Согласно закону сохранения количества движения, $0 = m_1 v_1 + m_2 v_2$. Отсюда $v_2 = -\frac{m_1 v_1}{m_2} = -\frac{P_1 v_1}{g m_2}$. Скорость v_1 , с которой двигалась ракета вначале, т. е. после сгорания пороха, равна скорости падения ее на землю, т. е.

$$v_1 = \sqrt{2gh}.$$

Тогда

$$v_2 = -\frac{P\sqrt{2gh}}{gm_2}; \quad v_2 \approx -337 \text{ м/сек.}$$

Знак минус показывает, что скорость газов, истекающих из ракеты, имеет направление, противоположное направлению ее движения.

Ответ. $v_2 \approx -337 \text{ м/сек.}$

Задача 2. Третья ступень ракеты состоит из ракеты-носителя массой $m_1 = 500 \text{ кг}$ и головного конуса массой $m_2 = 10 \text{ кг}$. Между ними находится сжатая пружина. При движении на орбите со скоростью $v = 8000 \text{ м/сек}$ головной конус выталкивается пружиной из ракеты-носителя со скоростью $v_0 = 5,1 \text{ м/сек}$. Определить, с какой скоростью сталл двигаться ракета и конус на орбите.

Решение. Полное количество движения ракеты до отделения головного конуса равно $(m_1 + m_2)v$, а после отделения $m_1v_1 + m_2v_2$, где v_1 — скорость ракеты-носителя, а v_2 — скорость конуса. По закону сохранения количества движения

$$m_1v_1 + m_2v_2 = (m_1 + m_2)v.$$

Из условия задачи известно, что $v_0 = v_2 - v_1 = 5,1 \text{ м/сек}$. Отсюда следует, что $v_1 = v_2 - v_0$. Подставляя в уравнение закона сохранения количества движения v_1 , получим

$$m_1(v_2 - v_0) + m_2v_2 = (m_1 + m_2)v.$$

Решив это уравнение относительно скорости v_2 , находим

$$v_2 = v + \frac{m_1}{m_1 + m_2} v_0; \quad v_2 = 8005 \text{ м/сек};$$
$$v_1 = 8005 \text{ м/сек} - 5,1 \text{ м/сек} = 7999,9 \text{ м/сек}.$$

Таким образом, при сообщении головному конусу ракеты дополнительной скорости $5,1 \text{ м/сек}$ скорость ракеты-носителя уменьшится на $0,1 \text{ м/сек}$.

Ответ. $v_1 = 7999,9 \text{ м/сек}; \quad v_2 = 8005 \text{ м/сек.}$

§ 14. Сложение и разложение сил

Опыт показывает, что величина силы, действующей на твердое тело, не изменится, если точку ее приложения перенести вдоль линии действия силы. Из опыта следует также, что если на твердое

тело действует несколько сил, их действие можно заменить одной силой, называемой *равнодействующей силой*. Поскольку силы являются векторными величинами, они складываются как векторы, т. е. по правилу параллелограмма. Складываемые силы называются *составляющими*, а само действие — *сложением сил*.

Величина равнодействующей силы зависит от величины угла между составляющими силами: при угле 0° она равна сумме составляющих, при угле 180° — их разности.

Сила, равная по величине равнодействующей силе, но противоположная ей по направлению, называется *уравновешивающей силой*.

Замена одной силы двумя, производящими на тело такое же действие, как одна сила, называется *разложением силы на две составляющие*.

Задача 1. В шахтном подъемнике поднимается человек, вначале равноускоренно, затем равномерно и, наконец, равнозамедленно, после чего он таким же образом опускается. Абсолютная величина ускорения во всех случаях постоянна и равна $0,98 \text{ м/сек}^2$. С какой силой человек давит на дно подъемника в каждом случае, если вес его равен $P = 800 \text{ н}$?

Решение. Человек притягивается Землей с силой, равной его весу P . Согласно третьему закону Ньютона, с такой же силой человек давит на дно подъемника, если последний неподвижен или движется равномерно. Таким образом, при равномерном подъеме или спуске человек давит на дно подъемника с силой, равной своему весу, т. е. $F = P = 800 \text{ н}$.

В случае ускоренного движения подъемника вверх или замедленного движения вниз со стороны подъемника на человека массой m действует ускоряющая сила, сообщающая ему ускорение a ; эта сила равна ma . Согласно третьему закону Ньютона, такая же сила дополнительно давит на дно подъемника. Следовательно, при ускоренном движении вверх или замедленном движении вниз на дно подъемника действует сила $F_1 = P + ma$,

$$F_1 = P + \frac{Pa}{g}; \quad F_1 = 880 \text{ н}.$$

При замедленном движении вверх или ускоренном движении вниз сила давления человека на дно подъемника

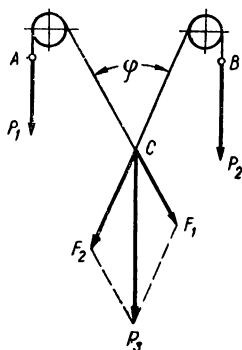
$$F_2 = P - ma; \quad F_2 = 800 \text{ н} - 80 \text{ н} = 720 \text{ н}.$$

Ответ. $F_1 = 880 \text{ н}$; $F_2 = 720 \text{ н}$.

Задача 2. Три нити связаны в узел C ; две из них перекинуты через блоки A и B , и к концам нитей подвешены грузы весом $P_1 = 3 \text{ н}$ и $P_2 = 5 \text{ н}$. К концу третьей нити подвешен груз

$P_3 = 7$ н. Найти величину угла φ , если система находится в равновесии.

Решение. Силу P_3 разложим на две составляющие F_1 и F_2 по направлению нитей (рис. 11). Так как система находится в равновесии, то $F_1 = P_1$ и $F_2 = P_2$. По теореме косинусов имеем $P_3^2 = P_1^2 + P_2^2 + 2P_1P_2 \cos \varphi$, откуда



$$\cos \varphi = \frac{P_3^2 - P_1^2 - P_2^2}{2P_1P_2}; \quad \cos \varphi = 0,5.$$

Отсюда $\varphi = 60^\circ$.
О т в е т. $\varphi = 60^\circ$.

§ 15. Момент силы

Опыт показывает, что тело, имеющее ось вращения, находится в равновесии, если сила, действующая на него, проходит через ось. Если же направление действующей силы не проходит через ось вращения, то сила вызывает вращательное движение тела.

Действие силы будет характеризоваться вращающим моментом, который определяется не только величиной силы, но и кратчайшим расстоянием между линией ее действия и осью вращения, называемым *плечом силы*.

Произведение силы на ее плечо называется *моментом силы*: $M = Fl$, где F — действующая сила, l — плечо.

Условием равновесия тела, которое может вращаться вокруг неподвижной оси, является равенство суммы моментов сил, действующих по часовой стрелке, сумме моментов сил, действующих против часовой стрелки.

Пример. Рассмотрим условие равновесия рычага. Рычагом называется любое твердое тело, имеющее ось вращения. Обычно под рычагом понимают стержень, который может поворачиваться вокруг опоры как оси вращения. Рычаг применяется для преобразования сил. Пусть к концам рычага приложены силы F_1 и F_2 (рис. 12). Одну из них называют движущей силой, а другую — силой сопротивления. Рычаг находится в равновесии, если моменты сил, действующих на него, равны: $F_1l_1 = F_2l_2$, или $\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}$, т. е. движущая сила во столько раз меньше (больше) силы сопротивления, во сколько раз ее плечо больше (меньше) плеча силы сопротивления.

При решении задач на условие равновесия рычага обычно следует учитывать вес рычага, поэтому необходимо знать точку приложения его веса.

Задача. Стрела AC весом $P = 1500$ н одним концом A шарнирно соединена с мачтой, второй конец C стрелы равномерно опускается при помощи троса, проходящего через подвешенный на мачте блок в точке B . Определить натяжение троса BC в момент прохождения стрелой горизонтального положения, если в этот момент трос и стрела образуют угол $\alpha = 30^\circ$.

Решение. Разложим силу натяжения троса F на вертикаль-

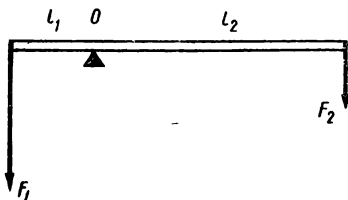


Рис. 12.

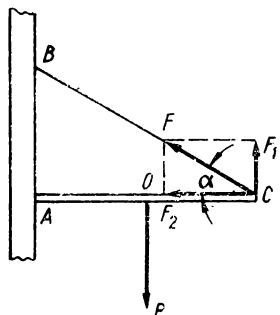


Рис. 13.

ную и горизонтальную составляющие F_1 и F_2 (рис. 13). Так как угол $\alpha = 30^\circ$, то $F = 2F_1$. Составляющая F_1 удерживает стрелу в равномерном вращении, поэтому $F_1 \cdot AC = P \cdot AO$, откуда $F_1 = 0,5P$, поскольку $AO = 0,5 AC$. Следовательно, $F = 1500$ н.

Ответ. $F = 1500$ н.

§ 16. Сложение и разложение параллельных сил. Центр тяжести

Равнодействующая двух параллельных сил (рис. 14), направленных в одну сторону, равна их сумме, параллельна им и направлена в ту же сторону, т. е. $R = F_1 + F_2$.

Точка приложения равнодействующей двух параллельных сил делит расстояние между точками приложения этих сил на части, обратно пропорциональные силам, т. е.

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}.$$

На практике часто встречается обратная задача — разложение силы на две параллельные составляющие. Для нахождения составляющих и точек их приложения применяются те же формулы, что и при сложении параллельных сил.

Воспользуемся правилом сложения сил для определения центра тяжести однородного стержня. *Центром тяжести* тела называется точка приложения веса данного тела. Если однородный стержень разбить на одинаковые части, то на каждую из них действуют равные силы тяжести, направленные к центру Земли. Вследствие больших размеров Земли эти силы можно принять за параллельные. Равнодействующая сил равна по величине их сумме, т. е. представляет собой вес стержня. Поскольку

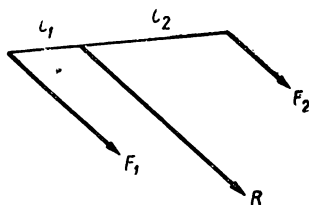


Рис. 14.

точка приложения двух равных параллельных сил делит пополам расстояние между точками их приложения, легко сообразить, что точка приложения этой равнодействующей, т. е. центр тяжести однородного стержня, лежит на его середине.

Аналогичным образом можно показать, что у однородных тел, имеющих центр симметрии, центр тяжести совпадает с центром симметрии. Если тело неоднородное, но плоское, его

центр тяжести можно определить опытным путем; для этого тело поочередно подвешивают в двух точках и проводят через последние вертикали; точка пересечения вертикалей и будет центром тяжести плоского тела.

§ 17. Виды и условия равновесия тел

В связи с тем, что линия действия уравнивающей силы совпадает с линией действия равнодействующей силы, у всякого тела, имеющего точку или ось опоры и находящегося в равновесии, центр тяжести лежит на одной вертикали с точкой опоры. Так как тело, имеющее точку или ось опоры, может находиться в равновесии лишь тогда, когда сумма моментов сил, действующих по часовой стрелке, равна сумме моментов сил, действующих против часовой стрелки, то, определив точку опоры, мы найдем и центр тяжести тела (центр тяжести и точка опоры находятся на одной вертикали).

Если тело, имеющее точку или ось опоры, под воздействием какой-то силы выведено из положения равновесия и после прекращения действия этой силы возвращается в первоначальное положение, то такое равновесие является *устойчивым*. Если же тело, имеющее

точку или ось опоры, после прекращения действия силы, которая вывела его из положения равновесия, не возвращается в прежнее положение, то такой вид равновесия называется *неустойчивым*. При отклонении тела из положения устойчивого равновесия центр его тяжести перемещается кверху, а из неустойчивого — книзу. Если при перемещении тела центр тяжести остается на одном и том же горизонтальном уровне (как в случае шара, лежащего на горизонтальной поверхности), то такое равновесие тела называется *безразличным*.

На практике важным является определение наибольшей устойчивости тела, имеющего площадь опоры. Тело тем более устойчиво, чем больше его площадь опоры и чем ниже находится его центр тяжести. Поэтому, например, шахматные фигуры делают более устойчивыми, закладывая внутрь их основания свинец.

Задача 1. Два ученика несут однородную доску весом $P = 600$ н и длиной 6 м, причем доска лежит у них на плечах так, что у первого ученика конец доски выступает на 1 м, а у второго — на 2 м (рис. 15). С какой силой доска давит на плечи?

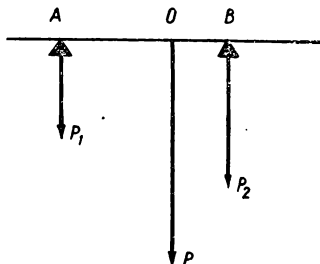


Рис. 15

Решение. Разложим вес доски P на две параллельные составляющие P_1 и P_2 . Точка приложения двух параллельных сил делит расстояние между точками приложения составляющих сил на части, обратно пропорциональные силам, т. е.

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{OB}{OA},$$

где OB — расстояние от центра тяжести доски до второго ученика, а OA — расстояние от центра тяжести доски до первого ученика. Центр тяжести доски совпадает с ее геометрическим центром, так как доска однородная. Поскольку по условию задачи $P = P_1 + P_2$, то $P_2 = P - P_1$; тогда

$$\frac{P_1}{P - P_1} = \frac{OB}{OA}, \text{ или } \frac{P_1}{600 \text{ н} - P_1} = \frac{1}{2};$$

отсюда $P_1 = 200$ н; $P_2 = 600 \text{ н} - 200 \text{ н} = 400 \text{ н}$.

Ответ. $P_1 = 200$ н; $P_2 = 400$ н.

Задача 2. Из однородной круглой пластинки радиусом $R = 9$ см вырезан круг вдвое меньшего радиуса, касающийся края

пластинки (рис. 16). Определить центр тяжести полученной пластинки с вырезом.

Решение. Обозначим через P вес целой пластинки радиусом R , которую можно рассматривать как состоящую из круглой пластинки радиусом r и весом P_1 и остальной части (с вырезом) весом P_2 . Так как сила P является равнодействующей сил P_1 и P_2 , то $P_1 r = P_2 x$, откуда

$$x = \frac{P_1 r}{P_2}.$$

Вес маленькой пластинки

$$P_1 = \rho g h S = \rho g h \pi r^2 = \rho g h \frac{1}{4} \pi R^2.$$

Вес пластинки с вырезом

$$P_2 = P - P_1 = \rho g h \pi R^2 - \rho g h \frac{1}{4} \pi R^2 = \frac{3}{4} \rho g h \pi R^2.$$

Подставляя в формулу значения P_1 , P_2 и r , получим

$$x = \frac{R}{6}; \quad x = \frac{9}{6} \text{ см} = 1,5 \text{ см}.$$

Ответ. Центр тяжести пластинки с вырезом лежит на расстоянии $x = 1,5 \text{ см}$ от центра большого круга.

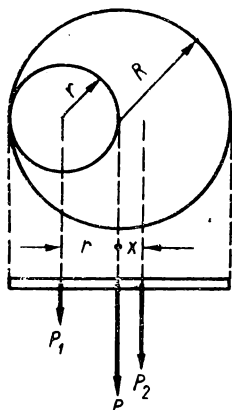


Рис. 16.

Контрольные вопросы к главе «Динамика»

- 1) В чем состоит первый закон Ньютона?
- 2) Какое изменение произошло в движении трамвая, если пассажир, сидящий у правой стенки вагона, оказался прижатым к ней?
- 3) Каким образом в динамике определяется сила и каковы ее единицы измерения в системах СИ и СГС?
- 4) Что называется массой тела?
- 5) Что называется плотностью вещества? В каких единицах она измеряется?
- 6) Какое соотношение существует между единицами силы: ньютоном, диной и килограммом?

7) Какое движение может сообщить телу длительно действующая сила в пустоте и в среде?

8) Какова зависимость между ускорениями тел и силами, действующими на эти тела, если их массы одинаковы?

9) Какова зависимость между массами и ускорениями тел, если на тела действуют одинаковые силы?

10) Какова зависимость между действующими силами и массами тел, если силы сообщают телам одинаковые ускорения?

11) Что называется весом тела?

12) В каком случае гибкая пружина длиннее: когда она подвешена за один из концов или когда она свободно падает?

13) В чем состоит третий закон Ньютона?

14) Что называется коэффициентом трения и каким числом он выражается?

15) Для чего на автомобильных шинах делают рельефный рисунок? Зачем на колеса машин зимой надевают цепи?

16) Чему равна действующая на парашют сила сопротивления воздуха, если парашютист опускается с постоянной скоростью?

17) Как можно изменить величину трения?

18) Существует ли сила трения покоя внутри жидкости? внутри газа?

19) В чем состоит закон сохранения количества движения?

20) Чему равна равнодействующая двух сил, действующих на одну точку тела под углом?

21) Что называется уравнивающей силой? Приведите примеры.

22) Что значит разложить силу на составляющие?

23) В каких случаях разложение силы на две составляющие имеет одно решение?

24) Как зависит величина равнодействующей силы от угла между составляющими силами?

25) Как найти равнодействующую нескольких сил, действующих на одну и ту же точку тела?

26) Каким образом можно перенести точку приложения силы в твердом теле?

27) Что называется плечом силы относительно оси вращения?

28) Что называется моментом силы относительно оси вращения?

29) Каково условие равновесия тела, имеющего ось вращения, если на него действуют несколько сил?

30) Что называется центром тяжести тела и как его определяют?

31) Каковы виды равновесия тел, имеющих неподвижную ось вращения?

Вопросы и задачи к главе «Динамика»

39. Почему возможен разрыв поезда, когда паровоз резко трогается с места? В какой части поезда вероятнее всего может произойти разрыв?

40. Какими способами насаживают молоток на рукоятку? Объясните происходящие при этом явления.

41. На столе лежит лист бумаги, на ней стоит чернильница. Каким образом можно выпнуть бумагу из-под чернильницы, не придерживая последнюю?

42. Почему в подъемных кранах между тросом и крюком, к которому подвешивается груз, находится пружина?

43. Автомобиль застрял на лесной дороге в грязи. Может ли вытянуть его шофер без посторонней помощи, имея в своем распоряжении длинную веревку? Если может, то как это сделать?

44. В каком случае вероятность разрыва телеграфного провода при гололеде больше: когда провод почти не имеет прогиба или когда прогиб есть?

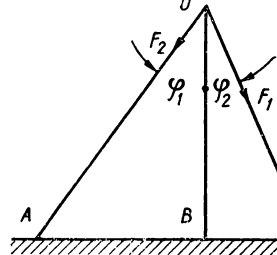


Рис. 17.

45. Канат, к которому привязан аэростат, образует с поверхностью земли угол 60° . Определить горизонтальную составляющую силы давления ветра, если натяжение троса равно 2000 н ? Какова подъемная сила, действующая на аэростат в вертикальном направлении?

46. Грузовое судно выводится из порта двумя буксирами, движущимися равномерно и развивающими силы тяги 40 и 50 кн . Угол между направлениями буксирных тросов равен 30° . Определить силу сопротивления воды.

47. Фонарь весом $P = 200 \text{ н}$ подвешен на двух проволоках, образующих с вертикальными стенками углы $\alpha = 80^\circ$ и $\beta = 70^\circ$. Найти силу натяжения проволок.

48. Радиомачта поддерживается двумя тягами (рис. 17), силы натяжения которых равны F_1 и F_2 . Каким должно быть отношение этих сил, чтобы мачта не гнулась? Высота мачты $OB = 12 \text{ м}$, расстояние $AB = 9 \text{ м}$, $BC = 5 \text{ м}$.

49. Как будет двигаться тело, если движущая сила больше силы сопротивления? меньше ее? равна ей?

50. Как движется тело, если равнодействующая всех сил, действующих на него, не меняется по величине и направлению?

51. Доска лежит горизонтально на двух опорах, расположенных

под ее концами. Посредине доски стоит человек. Внезапно он приседает. Что произойдет в первый момент: увеличится или уменьшится прогиб доски? Что произойдет, если человек, сидящий на корточках, внезапно выпрямится?

52. Лифт движется с ускорением a . Пассажир, находящийся в лифте, роняет книгу. Чему равно ускорение книги относительно лифта, если он движется вверх? если движется вниз?

53. На горизонтальной поверхности лежат два одинаковых тела, соединенных нитью. Какую минимальную силу следует приложить к одному из тел, чтобы нить оборвалась, если она выдерживает максимальное натяжение 30 н ? До начала движения тел нить параллельна горизонтальной поверхности, на которой лежат тела.

54. Почему быстро идущий человек, переходя с шероховатой дороги на скользкую, может упасть назад, а при переходе с гладкой на шероховатую — наклоняется вперед?

55. Автомобиль движется по горизонтальной плоскости со скоростью $v = 36 \text{ км/ч}$. После выключения мотора он проезжает путь $s = 125 \text{ м}$ и останавливается. Определить коэффициент трения.

56. На веревке подвешен груз. При подъеме, вызванном силой $F = 100 \text{ н}$, груз движется с ускорением $a = 2 \text{ м/сек}^2$. Под действием силы, сообщающей ускорение $a_1 = 10 \text{ м/сек}^2$, веревка обрывается. Найти натяжение веревки в момент разрыва.

57. Через блок, подвешенный к динамометру, перекинута нить, к концам которой привязаны грузы весом $P = 3 \text{ н}$ и $P_1 = 2 \text{ н}$. Определить показание динамометра при движении грузов. Весом блока и нити пренебречь.

58. На столе лежит деревянный брусок весом $P = 20 \text{ н}$, к которому привязана нить, перекинута через блок. Если к другому концу нити подвесить груз массой $m_1 = 1 \text{ кг}$, брусок начинает двигаться равноускоренно и за $t = 3 \text{ сек}$ проходит путь $s = 90 \text{ см}$. Определить коэффициент трения.

59. По горизонтальной поверхности ученик катит две связанные веревкой тележки, каждая весом $P = 500 \text{ н}$, с ускорением $a = 0,9 \text{ м/сек}^2$. Каково натяжение веревки, которую тянет ученик? Каково натяжение веревки, связывающей тележки? Угол между горизонтом и веревкой $\alpha = 45^\circ$. Коэффициент трения $k = 0,3$.

60. Через блок, ось которого горизонтальна, перекинута веревка длиной $l = 18 \text{ м}$. За концы веревки держатся двое учеников одинакового веса, которые находятся на одинаковых расстояниях от блока. Через какой промежуток времени каждый из учеников достигает блока: а) если они начинают подниматься вверх относительно веревки со скоростями $v_1 = 0,5 \text{ м/сек}$ и $v_2 = 1 \text{ м/сек}$? б) если они начинают одновременно подниматься относительно веревки с постоянными ускорениями $a_1 = 0,5 \text{ м/сек}^2$ и $a_2 = 1 \text{ м/сек}^2$? Массой блока и веревки пренебречь.

61. Через блок перекинута нить, к концам которой привязаны грузы массами m и m_1 (рис. 18), причем $m_1 = 2m$. Груз массой m_1 поднимают настолько, чтобы груз массой m коснулся пола, и отпускают. На какую высоту поднимется груз массой m , если груз массой m_1 был поднят на высоту $h_1 = 30$ см? Трением в блоке пренебречь.

62. Мальчик, сидящий в лодке, держит один конец каната, мальчик, стоящий на берегу, в течение 1 мин тянет за второй его конец. При этом лодка, естественно, движется к берегу. Затем вновь, начиная с состояния покоя, оба мальчика тянут канат в противоположные стороны, тоже в течение 1 мин. Мальчики прилагают одинаковые усилия в обоих случаях. В каком из указанных случаев лодка пройдет большее расстояние?

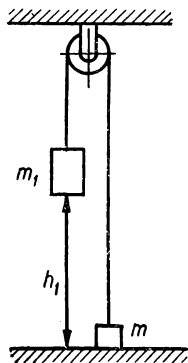


Рис. 18.

63. Копром вбивают сваю массой $m = 90$ кг. Боек копра массой $m_1 = 400$ кг свободно падает с высоты $H = 1,5$ м и ударяет о сваю. При этом свая входит в грунт на глубину $h = 4$ мм.

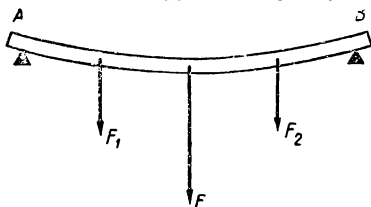


Рис. 19.

Чему равна средняя сила сопротивления грунта при движении сваи, если при ударе боек не отскакивает от нее?

64. Представьте себе, что вы находитесь в центре горизонтальной площадки, на которой отсутствует трение, например на идеально гладком катке. Как бы вы могли сойти с этой площадки?

65. Ракета массой $m_1 = 650$ г содержит $m_2 = 400$ г взрывчатого вещества. На какую высоту может подняться ракета, если взрывчатое вещество сгорает сразу, газы истекают со скоростью $v_2 = 400$ м/сек, а сопротивление воздуха уменьшает высоту подъема в 5 раз?

66. К доске, лежащей на опорах A и B, приложены силы F_1 и F_2 (рис. 19). Изменится ли прогиб доски, если заменить эти силы их равнодействующей F ?

67. Одна половина цилиндрического стержня изготовлена из железа, а другая — из меди. Длина стержня $l = 83,5$ см. Определите положение его центра тяжести ($\rho_1 = 7,8$ г/см³, $\rho_2 = 8,9$ г/см³).

68. Считая моменты сил, поворачивающих тело по часовой стрелке, положительными, а против часовой стрелки — отрицательными, сформулируйте условие равновесия тела, имеющего неподвижную ось вращения.

69. Кусок однородной проволоки, подвешенный на нити за середину, находится в равновесии в горизонтальном положении. Останется ли проволока в равновесии, если один конец куса согнуть?

70. На концах шестиметровой доски, имеющей опору посредине, сидят два мальчика весом 400 и 300 н. В каком месте доски нужно посадить мальчика весом 200 н, чтобы доска осталась в равновесии?

71. К балке весом $P = 1000$ н, опирающейся концами на опоры, подвешен груз $P = 1000$ н на расстоянии $1/4$ длины балки от ее левого конца. Найти силы давления на опоры.

72. Почему подъемный кран не опрокидывается в сторону поднимаемого груза, а без груза — в сторону противовеса?

73. Сплошной цилиндр стоит на доске длиной $l = 50$ см. На какую наибольшую высоту можно поднять один из концов доски, чтобы цилиндр не упал, если его высота в 4 раза больше диаметра основания?

Глава III. МЕХАНИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

§ 18. Работа и мощность

Пусть некоторая постоянная сила F действует на тело, которое перемещается по линии действия силы. В этом случае сила либо изменяет скорость тела, сообщая ему ускорение, либо компенсирует действие другой силы (или сил), противодействующей движению. Действие силы F на некотором пути s характеризуется величиной, которая называется работой. *Работа* — скалярная величина, равная произведению силы на путь, пройденный точкой приложения силы по направлению действия силы, т. е.

$$A = Fs.$$

Если же действующая сила F образует с направлением движения угол α (рис. 20), эту силу можно разложить на две составляющие: F_1 — направленную вдоль пути и F_2 — направленную перпендикулярно пути. В этом случае работа совершается только составляющей силой $F_1 = F \cos \alpha$, т. е.

$$A = F_1 s = Fs \cos \alpha.$$

Итак, если действующая сила образует с направлением движения некоторый угол, работа измеряется произведением действующей силы

на путь, пройденный точкой приложения силы, и на косинус угла между направлением силы и направлением движения.

Из формулы работы видно, что если сила и направление перемещения образуют острый угол ($\cos \alpha > 0$), работа положительная, а если угол тупой ($\cos \alpha < 0$), работа отрицательная. В первом случае силу называют движущей силой, во втором — силой сопротивления. При отсутствии перемещения и в случае силы, перпендикулярной направлению перемещения, работа не производится. Так, сила тяжести при перемещении тела по горизонтальному пути ($\alpha = 90^\circ$) работы не производит.

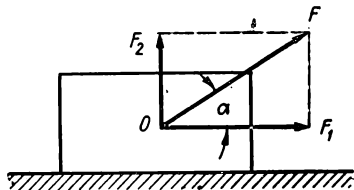


Рис. 20.

За единицу работы в системе СИ принят джоуль (дж). 1 дж — работа силы в 1 н на пути в 1 м, если направление силы совпадает с направлением движения, т. е. $1 \text{ дж} = 1 \text{ н} \cdot 1 \text{ м}$.

Единица работы в системе СГС — 1 эрг; 1 эрг — работа силы в 1 дину на пути в 1 см. Соотношение между этими единицами работы следующее: $1 \text{ дж} = 1 \text{ н} \cdot 1 \text{ м} = 10^5 \text{ дин} \cdot 100 \text{ см} = 10^7 \text{ эрг}$.

В связи с наличием трения и сопротивления среды не вся затраченная работа является полезной. Отношение полезной работы A_1 ко всей затраченной работе A называется *коэффициентом полезного действия* (к. п. д.) и обозначается буквой η (эта):

$$\eta = \frac{A_1}{A}.$$

Если к. п. д. выражен в процентах, то приведенная формула принимает вид

$$\eta = \frac{A_1}{A} 100\%.$$

На практике имеет значение не только величина совершенной работы, но и время, в течение которого она совершена. Поэтому для сравнения производительности различных машин вводится величина, показывающая, какую работу данный механизм совершает в единицу времени; эта величина называется мощностью. Итак, *мощность* механизма измеряется работой, выполняемой им в единицу времени.

Если за время t выполняется работа A , то мощность

$$N = \frac{A}{t}.$$

За единицу мощности принята такая мощность, при которой за единицу времени выполняется единица работы. В системе СИ за единицу мощности принимается 1 ватт (*вт*). 1 *вт* — это мощность, при которой за 1 *сек* выполняется работа в 1 *дж*.

В системе СГС за единицу мощности принят 1 *эрг/сек*:

$$1 \text{ эрг/сек} = \frac{1 \text{ эрг}}{1 \text{ сек}}; \quad 1 \text{ вт} = 10^7 \text{ эрг/сек.}$$

Так как $A = Fs$, то $N = \frac{Fs}{t} = Fv$, т. е. величина мощности равна произведению силы на скорость. Эта формула пригодна как для постоянной, так и для переменной силы. В последнем случае определяется мощность для того момента времени, для которого взято значение скорости и силы.

Задача. Определить работу, которую нужно совершить, чтобы сжать буферную пружину на $x = 5 \text{ см}$, если известно, что сила пропорциональна сжатию пружины и для сжатия пружины на 1 *см* нужно приложить силу в 30 000 *н*.

Решение. Здесь имеется случай работы переменной силы, которая изменяется от нуля до значения $F = kx$, соответствующего максимальному сжатию x ; k — коэффициент упругости, численно равный силе, сжимающей пружину на единицу длины, т. е. $k = 30\,000 \text{ н/см}$.

Так как сила, сжимающая пружину, пропорциональна сжатию и изменяется от 0 до kx , то ее среднее значение $F_c = \frac{kx}{2}$, а работа

$$A = F_c x = \frac{kx^2}{2}; \quad A = \frac{3\,000\,000 \text{ н/м} \cdot 0,05^2 \text{ м}^2}{2} = 3750 \text{ дж.}$$

Ответ. $A = 3750 \text{ дж}$.

§ 19. Энергия

Опыт показывает, что тела часто могут совершать работу над другими телами. Для того чтобы охарактеризовать тело в отношении его способности произвести работу над другим телом, вводится физическая величина, называемая *энергией*. Энергия является общей мерой различных форм движения материи; она характеризует способность тела выполнять работу. Изменение энергии тела измеряют работой, которую тело может совершить в определенных условиях, т. е. мерой энергии является работа. Поэтому единицы измерения энергии те же, что и единицы измерения работы.

Механическая энергия тела бывает потенциальной и кинетической.

Потенциальная энергия — это энергия взаимодействия, зависящая от взаимного расположения тел (например, предмет и Земля) или частей одного и того же тела (например, сжатая или растянутая пружина).

Если тело поднято на высоту h , то величина работы A , затраченной на его поднятие, равна произведению веса тела P на высоту h , т. е. $A = Ph$. При падении с той же высоты тело выполняет такую же работу, а потому потенциальная энергия тела равна этой работе.

Обозначая потенциальную энергию через $W_{\text{п}}$, имеем

$$W_{\text{п}} = Ph = mgh.$$

Потенциальной энергией, кроме тел, поднятых над Землей, обладают упругие тела, подвергшиеся деформации (так называемой упругой деформации). Так, например, в рассматриваемой выше задаче мы подсчитали работу, затраченную при сжатии пружины. Очевидно, такую же работу может выполнить сжатая пружина, т. е. ее потенциальная энергия

$$W_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}.$$

Задача. Определить средний расход воды Братской ГЭС за 1 сек, если известно, что ее мощность $N = 4\,500\,000$ квт, при разности уровней воды $H = 96$ м, к. п. д. генераторов $\eta = 98,1\%$ и к. п. д. турбин $\eta_1 = 93\%$.

Решение. Мощность, развиваемая потоком воды,

$$N_1 = \frac{\rho g V H}{t},$$

где ρ — плотность воды, V — объем воды, протекающей через турбины за время t .

Мощность N'_1 , отдаваемая гидротурбинами, составляет 93% мощности потока, т. е. она равна $N'_1 = \eta_1 N_1$.

Мощность на выходе генераторов составляет 98,1% мощности турбин, т. е.

$$N = \eta N'_1 = \eta \eta_1 N_1, \text{ отсюда } N_1 = \frac{N}{\eta \eta_1}.$$

Приравнявая два полученных выражения мощности, развиваемой потоком падающей воды, определим объем расходуемой воды, т. е.

$$\frac{\rho g V H}{t} = \frac{N}{\eta \eta_1}; \quad V = \frac{N t}{\rho g \eta \eta_1 H}; \quad V = 5,2 \cdot 10^3 \text{ м}^3.$$

Ответ. $V = 5,2 \cdot 10^3 \text{ м}^3$.

Кинетическая энергия — это энергия, которой обладает тело вследствие движения. Опыты показывают, что кинетическая энергия тела зависит от его скорости и массы. Введем эту зависимость для случая прямолинейного равноускоренного движения.

Пусть на тело действует постоянная сила F ; тогда при отсутствии трения и сопротивления среды тело движется равноускоренно. Работа силы F на пути s равна $A = Fs$. Но поскольку сила равна массе m , умноженной на ускорение a , то $A = mas$. Выражая ускорение через изменение скорости и времени, а путь — через среднюю скорость и время, находим

$$A = mas = m \frac{v - v_0}{t} \cdot \frac{v + v_0}{2} t = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}.$$

Выражение $\frac{mv^2}{2} = W_k$ определяет величину кинетической энергии в конце пути, а $\frac{mv_0^2}{2} = W_0$ — в начале этого пути. Таким образом, работа постоянной силы F на пути s при отсутствии сопротивления и трения идет на изменение (увеличение) кинетической энергии тела, т. е.

$$A = W_k - W_0.$$

В частном случае, при $v_0 = 0$, $A = W_k = \frac{mv^2}{2}$.

Итак, кинетическая энергия тела выражается формулой

$$W_k = \frac{mv^2}{2}.$$

§ 20. Полная энергия падающего тела

Рассмотрим, чему равна полная энергия свободно падающего тела с высоты h в трех положениях (рис. 21). Полная энергия тела W состоит из кинетической энергии W_k и потенциальной W_n , т. е. $W = W_k + W_n$. При поднятии тела массой m на высоту h тело обладает потенциальной энергией $W_n = mgh$, а его кинетическая энер-

гия на высоте h равна $W_k = 0$. Таким образом, полная энергия тела в верхнем положении I равна его потенциальной энергии: $W = W_n = mgh$.

В положении III , когда тело достигает поверхности Земли, оно приобретает скорость v и обладает лишь кинетической энергией $W_k =$

$= \frac{mv^2}{2}$, а его потенциальная энергия равна нулю. Полная энергия тела в положении III равна $W = \frac{mv^2}{2}$; но поскольку $v^2 = 2gh$, то $W = \frac{m2gh}{2} = mgh$.

В положении II тело обладает потенциальной энергией $W_n = mgh_1$ и кинетической энергией $W_k = \frac{mv_1^2}{2}$; здесь v_1 — скорость тела на высоте h_1 , в положении II .

Полная энергия $W = W_n + W_k = mgh_1 + \frac{mv_1^2}{2}$. Но так как $v_1 = \sqrt{2g(h - h_1)}$, то $W =$

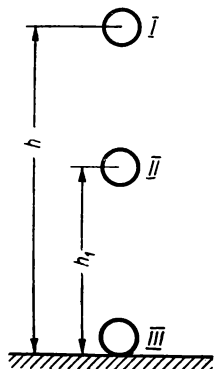


Рис. 21.

$= mgh_1 + \frac{m}{2} 2g(h - h_1) = mgh$. Ввиду того,

что положение II взято произвольно, сумма кинетической и потенциальной энергий тела при свободном падении в течение всего времени остается постоянной (mgh). Этот вывод представляет собой частный случай одного из важнейших законов природы — *закона сохранения и превращения энергии*, состоящего в следующем: во всех явлениях природы энергия не создается и не исчезает, а лишь переходит из одного вида в другой в равных количествах.

Задача 1. Пуля массой $m = 20$ г летит со скоростью $v = 400$ м/сек, попадает в бревно толщиной $s = 20$ см и вылетает из него со скоростью $v_1 = 100$ м/сек. Найти силу сопротивления при движении пули в бревне.

Решение. На основании закона сохранения энергии имеем

$$Fs = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}; \text{ отсюда } F = \frac{m}{2s} (v^2 - v_1^2);$$

$$F = \frac{0,02 \text{ кг}}{2 \cdot 0,2 \text{ м}} (400^2 \text{ м}^2/\text{сек}^2 - 100^2 \text{ м}^2/\text{сек}^2) = 7500 \text{ н.}$$

О т в е т. $F = 7500$ н.

Задача 2. Тепловоз, идущий по горизонтальному пути, развивает постоянную силу тяги $F = 150 \text{ кН}$. Определить силу сопротивления движению поезда массой $m = 1000 \text{ т}$, если на участке пути в $s = 600 \text{ м}$ его скорость увеличилась от $v = 32,4 \text{ км/ч}$ до $v_1 = 54 \text{ км/ч}$.

Решение. На основании закона сохранения энергии работа силы тяги Fs расходуется на работу по преодолению сопротивления F_1s и на увеличение кинетической энергии $\frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv^2}{2}$, т. е.

$$Fs = F_1s + \frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv^2}{2}, \text{ откуда } F_1 = F + \frac{m}{2s}(v^2 - v_1^2);$$

$$F_1 = 150\,000 \text{ н} + \frac{1\,000\,000 \text{ кг}}{2 \cdot 600 \text{ м}} (9^2 - 15^2) \text{ м}^2/\text{сек}^2 = \\ = 30\,000 \text{ н} = 30 \text{ кН}.$$

Ответ. $F_1 = 30 \text{ кН}$.

Задача 3. Охотник, находясь в неподвижной легкой надувной лодке, стреляет в летящую птицу под углом $\alpha = 30^\circ$ к горизонту. На сколько сместится лодка, если масса охотника с лодкой составляет $m_1 = 80 \text{ кг}$, масса дроби $m_2 = 40 \text{ г}$, средняя скорость дроби $v = 400 \text{ м/сек}$, средняя сила сопротивления воды движению лодки $F = 4 \text{ н}$?

Решение. При выстреле на охотника и лодку действует сила отдачи. Благодаря этому лодка с охотником приобретает скорость, горизонтальная составляющая которой определяется по закону сохранения количества движения $m_1v_1 = m_2v \cos \alpha$. Отсюда

$$v_1 = \frac{m_2v \cos \alpha}{m_1}.$$

Кинетическая энергия, которую приобретает лодка с охотником в момент выстрела, расходуется на работу по преодолению сопротивления воды, т. е. $\frac{m_1v_1^2}{2} = Fs$. Значит, смещение лодки

$$s = \frac{m_1v_1^2}{2F}; \quad s = \frac{m_2^2v^2 \cos^2 \alpha}{2m_1F}; \\ s = \frac{0,04^2 \text{ кг}^2 \cdot 400^2 \text{ м}^2/\text{сек}^2 \cdot 0,866^2}{2 \cdot 80 \text{ кг} \cdot 4 \text{ н}} = 0,3 \text{ м}.$$

Ответ. Лодка сместится на $0,3 \text{ м}$.

§ 21. Простые механизмы

Машина — это физическая система, служащая для передачи или преобразования энергии. В состав сложных машин входят *простые механизмы*: рычаг, наклонная плоскость, клин, винт, ворот и т. д. Простые механизмы преобразуют силы, скорости или направления движений в процессе совершения работы. Основными простыми механизмами являются рычаг и наклонная плоскость. Действие остальных механизмов аналогично действию рычага или наклонной плоскости, либо их комбинаций.

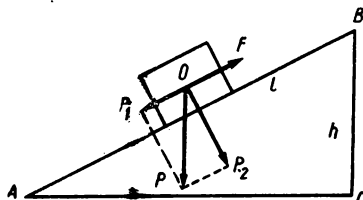


Рис. 22.

К простым механизмам применим закон равенства работ, который является частным случаем закона сохранения энергии. Рассмотрим условия равновесия некоторых простых механизмов.

1. *Наклонная плоскость.* На наклонной плоскости высотой $h = BC$ и длиной $l = AB$ лежит груз весом P (рис. 22). Разложим вес груза P на две составляющие: вдоль наклонной плоскости P_1 и перпендикулярно ей P_2 . Составляющая P_1 является скатывающей силой, а составляющая P_2 — силой давления.

Из подобия треугольников ABC и OPP_1 следует, что

$$\frac{h}{l} = \frac{P_1}{P}.$$

Заменяв скатывающую силу удерживающей силой F , равной ей по величине, но обратной по направлению, получим

$$F = P_1 = \frac{Ph}{l}.$$

Чтобы груз, лежащий на наклонной плоскости, находился в состоянии покоя или равномерного движения вдоль нее (без трения), нужно приложить силу, параллельную наклонной плоскости, во столько раз меньшую веса тела, во сколько раз высота наклонной плоскости меньше ее длины.

Таким образом, перемещая груз по наклонной плоскости без трения, выигрывают в силе во столько раз, во сколько раз проигрывают в пути. Этот вывод справедлив для всякой машины и всякого механизма.

Полученное выше соотношение можно представить и так:

$$Ph = Fl,$$

т. е. если не учитывать потерь на трение, работа движущей силы Fl равна работе силы сопротивления Ph . Этот закон равенства работ называют *золотым правилом механики*.

Сила, удерживающая тело в покое на наклонной плоскости, меньше при наличии трения, чем при отсутствии его, на величину силы трения.

Задача 1. Необходимо поднять груз на некоторую высоту, двигая его вдоль наклонной плоскости, составляющей с горизонтом угол α . Найти к. п. д. наклонной плоскости, если коэффициент трения груза о плоскость равен k .

Решение. Для равномерного перемещения груза весом P вдоль наклонной плоскости на высоту h к телу должна быть приложена сила, большая скатывающей силы $P_1 = P \sin \alpha$ на величину силы трения $F_{\text{тр}} = kP_2 = kP \cos \alpha$. Работа этой силы по поднятию груза на высоту h вдоль наклонной плоскости (затраченная работа) равна $A = Fs = (P \sin \alpha + kP \cos \alpha) \frac{h}{\sin \alpha}$.

Полезная же работа $A_1 = Ph$. Следовательно, к. п. д.

$$\eta = \frac{A_1}{A} = \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha + k \cos \alpha}.$$

Задача 2. На идеально гладкую наклонную плоскость, образующую угол α с горизонтом, положена доска массой m . Куда и с каким ускорением должен бежать по доске мальчик, масса которого M , чтобы доска оставалась на месте?

Решение. На доску действует скатывающая сила $F_1 = mg \sin \alpha$. Поэтому, чтобы доска оставалась в неподвижном состоянии, мальчик должен толкать ее вверх с такой же по величине силой. При этом на мальчика будет действовать сила F_1 , направленная вниз. Кроме того, на него действует еще скатывающая сила $F_2 = Mg \sin \alpha$. Таким образом, мальчик должен бежать вниз с ускорением

$$a = \frac{mg \sin \alpha + Mg \sin \alpha}{M} = \left(1 + \frac{m}{M}\right) g \sin \alpha.$$

2. Клин. Разновидностью наклонной плоскости является клин (рис. 23), составляющий основную часть колющих, режущих и строгающих инструментов: ножа, ножниц, топора, рубанка и т. д.

Рассмотрим действие клина при колке дров. Сила Q , приложенная к его основанию, может быть разложена на две равные состав-

ляющие F и F , действующие нормально на боковые поверхности клина AC и BC .

Из подобия треугольников ABC и OQF следует, что

$$\frac{F}{Q} = \frac{l}{h},$$

где $l = AC$, а $h = AB$.

Чтобы клин пребывал в состоянии покоя или равномерного движения (без трения), нужно приложить к нему силу, перпендикулярную его основанию (обуху), во столько раз меньшую силы, дейст-

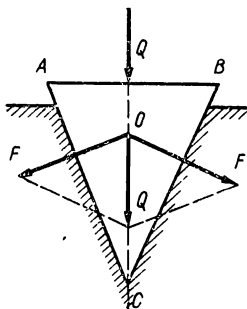


Рис. 23.

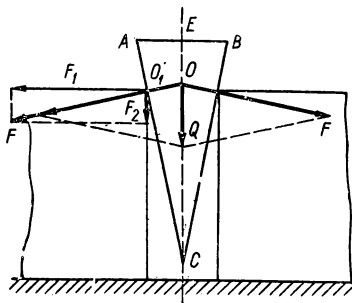


Рис. 24.

вующей перпендикулярно боковой поверхности клина (щеке), во сколько раз ширина основания меньше длины боковой поверхности.

Задача. На горизонтальной поверхности лежат два бруска массой $m = 1000$ кг каждый. Между брусками вставлен клин, ширина основания которого $h = 10$ см, а длина боковой поверхности $l = 25$ см. По клину производят кратковременный удар с силой $Q = 200$ н. Какое ускорение получают бруски во время удара? Коэффициент трения при движении брусков по поверхности $k = 0,2$. Трением между клином и брусками пренебречь.

Решение. Равнодействующая двух сил — горизонтальной составляющей F_1 , силы давления F и силы трения F_T сообщает бруску ускорение

$$a = \frac{F_1 - F_T}{m},$$

но $F_1 = \sqrt{F^2 - F_2^2}$ (рис. 24), где F — сила, которая действует перпендикулярно к боковой поверхности клина и определяется по формуле

$$F = Q \frac{l}{h}; \quad F = 200 \text{ н} \cdot \frac{25 \text{ см}}{10 \text{ см}} = 500 \text{ н}.$$

Сила трения $F_T = k(P + F_2)$. Сила F_2 определяется из подобия треугольников ACE и O_1FF_2 , т. е.

$$F_2 = F \frac{h}{2l}; \quad F_2 = 500 \text{ н} \cdot \frac{10 \text{ см}}{2 \cdot 25 \text{ см}} = 100 \text{ н};$$

тогда $F_T = 0,2(1000 \cdot 9,8 + 100) \text{ н} = 216 \text{ н}$; сила

$$F_1 = \sqrt{F^2 - F_2^2} = \sqrt{250\,000 \text{ н}^2 - 10\,000 \text{ н}^2} = 490 \text{ н}.$$

Отсюда находим

$$a = \frac{490 \text{ н} - 216 \text{ н}}{1000 \text{ кг}} = 0,27 \text{ м/сек}^2.$$

Отв. $a = 0,27 \text{ м/сек}^2$.

3. *Винт.* Цилиндрическое тело с резьбой, которая нарезается по винтовой линии, представляет собой винт. *Винтовой линией* называется линия, описанная на поверхности цилиндра гипотенузой прямоугольного треугольника. Его основание равно длине окружности цилиндра, а высота — шагу винта. *Шагом винта* называется расстояние между соседними точками винтовой линии (нарезками), лежащими на одной образующей цилиндра. Из рис. 25 видно, что винт сводится к наклонной плоскости.

Для перемещения винта к его головке по касательной на расстоянии r от оси прикладывается сила F , которая при одном обороте винта совершает работу $A = F \cdot 2\pi r$. Эта работа, расходуемая на преодоление сопротивления винта при передвижении его на расстояние, равное шагу винта.

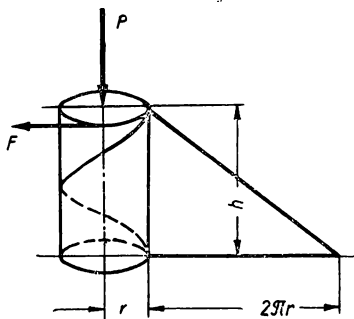


Рис. 25.

составляет $A = Ph$. На основании закона равенства работ имеем $F \cdot 2\pi r = Ph$. Отсюда

$$\frac{F}{P} = \frac{h}{2\pi r},$$

т. е. сила, действующая по касательной к окружности головки винта, при отсутствии трения во столько раз меньше силы, действующей на винт вдоль его оси, во сколько раз шаг винта меньше длины окружности головки.

Задача. Железобетонная балка весом $P = 50$ кн лежит на земле. Один из ее концов приподнимают домкратом, шаг винта которого $h = 0,5$ см, длина рукоятки $r = 0,5$ м и к. п. д. $\eta = 50\%$. Какое усилие прилагается к рукоятке домкрата?

Решение. Работа, идущая на преодоление сопротивления винту, является полезной, а работа силы, приложенной по касательной к рукоятке, расходуемая на преодоление сопротивления и на трение, — затраченной; поэтому

$$\eta = \frac{Qh}{F2\pi r}.$$

Сила Q , действующая на домкрат вдоль его оси, определяется из равенства моментов сил, действующих на балку:

$$P \cdot \frac{l}{2} = Ql,$$

где P — вес балки, приложенный в центре ее тяжести.

Тогда к. п. д.

$$\eta = \frac{Ph}{4\pi r F}; \quad \text{отсюда } F = \frac{Ph}{4\pi r \eta};$$

$$F = \frac{50\,000 \text{ н} \cdot 0,5 \text{ см}}{4 \cdot 3,14 \cdot 50 \text{ см} \cdot 0,5} = 80 \text{ н}.$$

Отв. К рукоятке домкрата прилагается усилие 80 н.

Контрольные вопросы к главе «Механическая энергия»

- 1) Что называется работой?
- 2) Дайте определение единиц работы в системах СИ и СГС и установите соотношение между ними.

3) Как вычисляется работа, когда сила приложена под углом к направлению перемещения?

4) В каком случае сила, действующая на движущееся тело, не производит работу?

5) На что расходуется работа при горизонтальном перемещении тела?

6) Что называется коэффициентом полезного действия механизма?

7) Что такое мощность и как она выражается через действующую силу и скорость движения тела?

8) Дайте определение единиц мощности в системах СИ и СГС и установите соотношение между ними.

9) Что называется энергией?

10) Какие существуют виды механической энергии? Дайте их определения.

11) В каких единицах измеряется кинетическая и потенциальная энергия?

12) Какое существует соотношение между произведенной над телом работой и полученной телом кинетической энергией, если отсутствует трение?

13) В чем состоит закон сохранения энергии?

14) Тело упало с некоторой высоты на землю. Куда девалась его потенциальная энергия?

15) Что называется машиной?

16) Каково условие равновесия тела на наклонной плоскости при действии на него силы, параллельной основанию наклонной плоскости, в случае отсутствия силы трения? при учете силы трения?

17) В чем состоит закон равенства работ в применении к наклонной плоскости?

18) Чему равна сила тяги при равномерном движении тела вдоль наклонной плоскости в случае отсутствия трения? при наличии трения?

19) Что называется к. п. д. наклонной плоскости?

20) Изменяется ли к. п. д. наклонной плоскости с изменением угла наклона? Если да, то как?

21) В каком случае клин под действием сил находится в равновесии?

22) Для каких целей можно использовать клин?

23) Приведите примеры, иллюстрирующие применение клина для скрепления.

24) Что называется винтовой линией? шагом винта?

25) Каково условие равновесия сил на винте?

26) В чем состоит закон равенства работ на винте без трения?

27) Можно ли выиграть в работе при использовании простых механизмов, если нет трения?

28) Каково условие равновесия подвижного блока?

Вопросы и задачи к главе «Механическая энергия»

74. Какую мощность развивает человек, когда он равномерно поднимается на третий этаж (данные взять из практики)?

75. Какую работу совершает при своем падении на землю тонкий вертикальный шест длиной $l = 4$ м и весом $P = 500$ н?

76. Стальные шарики массой $m_1 = 100$ г и $m_2 = 200$ г висят на нитях длиной $l = 50$ см таким образом, что нити параллельны и шарики соприкасаются. Меньший шарик отклонен на угол 90° , затем отпущен. Найти скорости шариков после удара. Потерей энергии пренебречь.

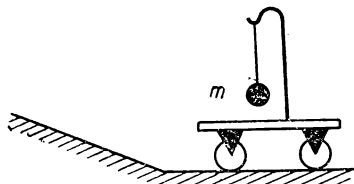


Рис. 26.

77. Ящик с песком массой $m_2 = 5$ кг подвешен на нити длиной $l = 4$ м. На какой угол отклонится нить, если в ящик ударит пуля массой $m_1 = 20$ г, летящая со скоростью $v_1 = 400$ м/сек?

78. Стоя на льду, конькобежец массой $m_2 = 80$ кг бросил вперед гирию массой $m_1 = 10$ кг и при этом сам покатился назад со скоростью $v_2 = 1,5$ м/сек. Какую ра-

боту совершил конькобежец, бросая гирию?

79. Изменится ли величина совершаемой работы и потребляемой мотором эскалатора средней мощности, если пассажир, который стоит на движущейся вверх лестнице эскалатора, сам будет также подниматься с постоянной скоростью? опускаться с постоянной скоростью?

80. Определить работу поднятия груза весом $P = 1000$ н с ускорением $a = 1$ м/сек² по наклонной плоскости длиной $l = 2$ м, если угол наклона плоскости к горизонту равен $\alpha = 30^\circ$. Коэффициент трения груза о поверхность $k = 0,1$.

81. Автомобиль «Волга» вместе с пассажирами весит 17 500 н и имеет двигатель мощностью $N = 51,5$ квт. Какую максимальную скорость он может развить на подъеме с уклоном $\alpha = 30^\circ$, если коэффициент трения колес о полотно дороги $k = 0,25$?

82. Автомобиль весом $P = 15\,000$ н движется вверх по уклону $h = 10$ м на каждый километр пути со скоростью $v = 36$ км/ч и развивает при этом мощность $N = 30$ квт. Определить коэффициент трения колес о почву.

83. Легкая тележка скатывается без трения с наклонной плоскости. На тележке укреплен отвес — шарик массой m на нити (рис. 26). Какое направление имеет нить отвеса при свободном скатывании тележки? (До начала скатывания нить удерживалась в направлении, перпендикулярном наклонной плоскости.)

84. Тележка с подвешенным на нити шариком (рис. 26) подъезжает со скоростью v к наклонной плоскости. В какую сторону от вертикали отклонится нить, удерживающая шарик, когда тележка начнет въезжать на наклонную плоскость?

85. Через блок, укрепленный на вершине наклонной плоскости, составляющей с горизонтом угол $\alpha = 30^\circ$, перекинута веревка, к концам которой привязаны грузы массами $m_1 = m_2 = 12 \text{ кг}$. Найти ускорение, с которым движутся грузы, и натяжение нити. Коэффициент трения $k = 0,1$. Трением в блоке и массой блока пренебречь.

86. Длина рукоятки винтового пресса $r = 40 \text{ см}$, шаг винта $h = 5 \text{ мм}$. Какую силу нужно приложить к рукоятке, чтобы пресс давил с силой $P = 100 \text{ кН}$? Трением пренебречь.

87. С какой силой рабочий весом $P = 800 \text{ н}$ давит на землю в случае подъема груза весом 500 н непосредственно при помощи каната? при помощи подвижного блока?

88. Определить ускорение, с которым движется груз массой m_1 в установке, изображенной на рис. 27. Массы грузов равны. Трением и массами блоков пренебречь.

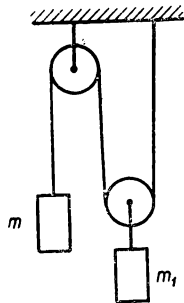


Рис. 27.

Глава IV. КРИВОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ

§ 22. Скорость криволинейного движения

При прямолинейном движении сила, действующая на тело, или совпадает с направлением скорости (ускоренное движение), или противоположна направлению скорости (замедленное движение). В криволинейном движении сила, действующая на тело, всегда направлена под углом к скорости тела в сторону искривления траектории.

Средняя скорость в криволинейном движении, как и в случае прямолинейного движения, определяется величиной пути, пройденного телом за единицу времени, т. е. отношением пути ко времени, за которое он пройден.

В каждый момент времени скорость направлена по касательной, проведенной к кривой в рассматриваемой точке траектории. Например, раскаленные частицы (искры), летящие от предмета, обтачиваемого на точильном круге, движутся по касательной к кругу.

Таким образом, скорость тела при криволинейном движении в каждый момент времени изменяет свое направление, поэтому такое движение всегда происходит с ускорением.

§ 23. Движение тела, брошенного горизонтально

Тело, брошенное горизонтально, одновременно участвует в двух движениях: в равномерном по горизонтали (по инерции) и в равноускоренном по вертикали (под действием силы тяжести). Траектория результирующего движения — парабола с вершиной в точке бросания тела. Время движения тела по параболе равно времени свободного падения с той же высоты.

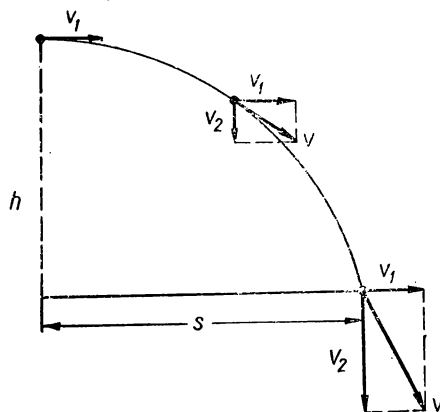


Рис. 28.

Отсюда видно, что если тело участвует одновременно в нескольких движениях, то каждое из них происходит независимо от других. Это положение механики называется *принципом независимости движений*.

Задача. Тело массой $m = 5$ кг брошено горизонтально со скоростью $v_1 = 10$ м/сек с башни высотой $h = 100$ м (рис. 28). Определить, на каком расстоянии от основания башни оно упадет на землю и какой кинетической энергией будет обладать в момент падения. Сопротивлением воздуха пренебречь.

Решение. Тело в горизонтальном направлении двигалось равномерно со скоростью v_1 , а поэтому искомое расстояние $s = v_1 t$. Так как время движения тела в горизонтальном направлении равно времени его свободного падения с высоты h , то

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 100 \text{ м}}{9,8 \text{ м/сек}^2}} = 4,5 \text{ сек.}$$

Следовательно,

$$s = v_1 t = 10 \text{ м/сек} \cdot 4,5 \text{ сек} = 45 \text{ м.}$$

Кинетическая энергия тела в момент падения на землю $W_k = \frac{mv^2}{2}$; здесь v — скорость тела в момент приземления, которая определяется по формуле

$$v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2},$$

где v_1 — скорость равномерного движения тела по горизонтали, а $v_2 = \sqrt{2gh}$ — скорость свободного падения с высоты h . Следовательно,

$$W_k = \frac{m(v_1^2 + v_2^2)}{2};$$

$$W_k = \frac{5 \text{ кг} (100 \text{ м}^2/\text{сек}^2 + 2 \cdot 9,8 \text{ м}/\text{сек}^2 \cdot 100 \text{ м})}{2} = 5150 \text{ Дж.}$$

Кинетическую энергию тела можно определить еще и так. Тело в момент бросания обладало кинетической и потенциальной энергиями. При падении потенциальная энергия тела превратилась в кинетическую, а поэтому кинетическая энергия тела в момент падения на землю в соответствии с законом сохранения энергии равна сумме потенциальной и кинетической энергий в момент бросания:

$$W = mgh + \frac{mv_1^2}{2};$$

$$W = 5 \text{ кг} \cdot 9,8 \text{ м}/\text{сек}^2 \cdot 100 \text{ м} + \frac{5 \text{ кг} \cdot 100 \text{ м}^2/\text{сек}^2}{2} = 5150 \text{ Дж.}$$

Ответ. $s = 45 \text{ м}$; $W = 5150 \text{ Дж}$.

§ 24. Движение тела, брошенного под углом к горизонту

Движение тела, брошенного под углом к горизонту, является сложным, как и движение тела, брошенного горизонтально: оно состоит из равномерного прямолинейного движения вдоль линии бросания (по инерции) и равноускоренного движения по вертикали (под действием силы тяжести). Результирующее движение происходит по параболе. Траектория тела, брошенного под углом к горизонту, симметрична относительно высшей точки параболы.

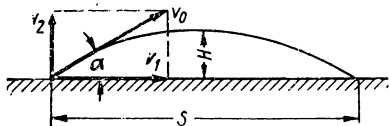
В действительности сопротивление воздуха уменьшает высоту полета, дальность полета и изменяет форму траектории, делая ее нисходящую часть более крутой, чем восходящую (*баллистическая кривая*).

Задача. Тело брошено под углом $\alpha = 30^\circ$ к горизонту со скоростью $v_0 = 49 \text{ м}/\text{сек}$. Определить время полета, дальность полета и высоту подъема тела. Сопротивлением воздуха пренебречь.

Решение. Разложим начальную скорость тела v_0 на горизонтальную и вертикальную составляющие (рис. 29): $v_1 = v_0 \cos \alpha$ и $v_2 = v_0 \sin \alpha$. Горизонтальная составляющая является скоростью равномерного движения тела по инерции, и для любого момента времени она имеет одно и то же значение. Вертикальная же составляющая v_2 является скоростью равнопеременного движения, и для любого момента времени она равна

$$v_2 = v_0 \sin \alpha - gt.$$

В высшей точке траектории вертикальная составляющая скорости равна нулю, т. е. $v_2 = 0$. Тогда время поднятия t' тела на максимальную высоту определится из равенства $0 = v_0 \sin \alpha - gt'$; откуда



$$t' = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}.$$

Рис. 29.

Так как время подъема тела равно времени его падения, то время полета тела

$$t = 2t' = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}; \quad t = \frac{2 \cdot 49 \text{ м/сек} \cdot 0,5}{9,8 \text{ м/сек}^2} = 5 \text{ сек}.$$

Дальность полета

$$s = v_1 t = v_0 \cos \alpha \frac{2v_0 \sin \alpha}{g} = \frac{v_0^2}{g} \sin 2\alpha;$$

$$s = \frac{49^2 \text{ м}^2/\text{сек}^2 \cdot 0,866}{9,8 \text{ м/сек}^2} = 212 \text{ м}.$$

Высота подъема тела обусловлена лишь вертикальной составляющей скорости:

$$H = v_0 \sin \alpha \cdot t' - \frac{gt'^2}{2} = v_0 \sin \alpha \frac{v_0 \sin \alpha}{g} - \frac{g}{2} \left(\frac{v_0 \sin \alpha}{g} \right)^2;$$

$$H = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}; \quad H = \frac{49^2 \text{ м}^2/\text{сек}^2 \cdot 0,5^2}{2 \cdot 9,8 \text{ м/сек}^2} \approx 30,6 \text{ м}.$$

О т в е т. $s = 212 \text{ м}$; $H \approx 30,6 \text{ м}$.

§ 25. Равномерное движение по окружности

Одним из простейших и весьма распространенных видов криволинейного движения материальной точки (тела) является равномерное движение по окружности, характеризующееся следующими величинами: периодом, частотой, линейной и угловой скоростями, ускорением.

Период T — это время, в течение которого материальная точка (тело) совершает один оборот.

Частота ν — это количество оборотов, совершаемых материальной точкой в единицу времени. Из определения периода и частоты следует, что между ними существует связь. Поскольку за 1 сек материальная точка совершает ν оборотов, длительность одного оборота

$$T = \frac{1}{\nu}.$$

Быстрота вращения материальной точки по окружности определяется угловой скоростью. *Угловая скорость* ω измеряется углом поворота радиуса-вектора, соединяющего движущуюся материальную точку с центром вращения, в единицу времени. Если радиус-вектор поворачивается на угол φ за время t , то угловая скорость

$$\omega = \frac{\varphi}{t}.$$

За единицу угловой скорости в системе СИ принимают $1 \text{ рад/сек} = \frac{1 \text{ рад}}{1 \text{ сек}}$ — это угловая скорость такого равномерного вращения, при котором радиус-вектор за 1 сек поворачивается на угол, равный 1 рад.

Так как за промежуток времени, равный периоду вращения, радиус-вектор поворачивается на угол $2\pi \text{ рад}$, то угловая скорость

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \text{ или } \omega = 2\pi\nu.$$

Линейная скорость v — это такая скорость, с которой материальная точка движется по окружности. Поскольку за время T , равное периоду вращения, точка проходит путь $2\pi R$, линейная скорость

$$v = \frac{2\pi R}{T}, \text{ или } v = 2\pi R\nu.$$

Так как $\omega = \frac{2\pi}{T}$, то

$$v = \omega R.$$

Как указывалось выше, криволинейное движение — это движение с ускорением. В случае равномерного движения по окружности ускорение определяется по формуле

$$a = \frac{v^2}{R}.$$

Это ускорение направлено по радиусу к центру окружности, поэтому оно называется *центростремительным ускорением*.

Поскольку вращающееся тело обладает массой m , то на это тело действует сила

$$F = ma = \frac{mv^2}{R},$$

которая называется *центростремительной*. Центростремительная сила удерживает движущееся тело на окружности, приложена к этому телу и направлена по радиусу к центру окружности. В свою очередь движущееся по окружности тело, по третьему закону Ньютона, действует на удерживающее тело посредством связей (или непосредственно) с силой, равной по величине центростремительной силе, но противоположно направленной ей; эта сила называется *центробежной*. Центростремительная и центробежная силы не могут быть заменены одной равнодействующей, так как они приложены к разным телам.

В качестве примера рассмотрим движение автомобиля по вогнутому и выпуклому мосту, памятуя, что сила может проявляться не только динамически, сообщая ускорение телу, но и статически, создавая давление, препятствующее движению тела. При движении по вогнутому мосту на автомобиль действует со стороны моста сила давления F , которая не только уравнивает вес автомобиля P , но и вынуждает его двигаться по окружности, создавая необходимую для этого центростремительную силу $F_{ц}$, т. е. $F = P + F_{ц} = P + \frac{mv^2}{R}$. При движении по выпуклому мосту сила давления со стороны моста на автомобиль будет меньшей, чем в случае прямолинейного движения, так как вес его частью проявляется статически, а частью динамически, будучи центростремительной силой, удерживающей автомобиль на окружности.

Задача 1. Небольшое тело скользит с вершины сферы вниз. На какой высоте от вершины тело оторвется от поверхности сферы? Трением пренебречь.

Решение. Разложим вес тела на две составляющие — P_1 , направленную по радиусу, и P_2 , направленную по касательной к ок-

тив движения спутника *A*, он начнет двигаться по эллипсу 2 (рис. 31). Период вращения контейнера будет немного меньше периода вращения спутника *B*. Поэтому они встретятся в точке соприкосновения орбит только после большого количества оборотов. Если же контейнер пустить в направлении движения спутника *A*, он будет двигаться по эллипсу 3. Скорость контейнера нужно подобрать из такого расчета, чтобы за время одного оборота контейнера вокруг Земли спутник *B* также сделал один оборот и прошел дополнительно путь *AB*. Это возможно, так как период вращения по эллипсу 3 несколько больше периода вращения по круговой орбите 1.

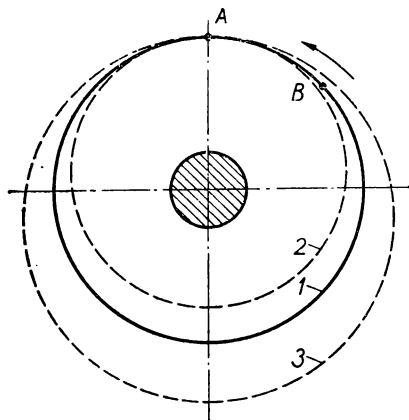


Рис. 31.

Тогда контейнер встретится со спутником в точке соприкосновения орбит 1 и 3.

О т в е т. Контейнер следует пустить по движению спутника *A*.

§ 26. Закон всемирного тяготения

Закон всемирного тяготения, установленный Ньютоном в 1687 г., формулируется так: *две материальные частицы притягиваются друг к другу с силой, пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними*. Так, если массы частиц m_1 и m_2 , а рас-

стояние между ними r , то сила F равна

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2};$$

здесь $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{сек}^2$ — так называемая *гравитационная постоянная*; в системе СИ она численно равна силе, с которой притягиваются две точечные массы по 1 кг, находящиеся на расстоянии 1 м. Размерность гравитационной постоянной в системе СИ

$$[\gamma] = \left[\frac{Fr^2}{m_1 m_2} \right] = \frac{\text{н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м}^2}{\text{сек}^2 \cdot \text{кг}^2} = \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{сек}^2}.$$

Численное значение гравитационной постоянной впервые было установлено английским ученым Кэвендишем при помощи крутильных весов в 1798 г.

Задача. Какую работу нужно выполнить, чтобы контейнер с приборами массой $m = 50$ кг поднять на высоту $h = 1000$ км (радиус Земли $R = 6370$ км)?

Решение. При удалении контейнера сила притяжения между контейнером и Землей изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния между ними. Поэтому средняя сила притяжения между контейнером и Землей не равна полусумме их в начальной и конечной точке пути. Чтобы определить работу, необходимую для перемещения контейнера, следует его путь разбить на большое количество настолько малых отрезков, что силу притяжения Земли на каждом из них можно считать постоянной. Работа по перемещению контейнера с поверхности Земли на высоту h равна сумме работ на всех отрезках пути, т. е. $A = A_1 + A_2 + \dots + A_n$. Работа на первом участке пути $A_1 = F_c(r_1 - R)$. В начале первого участка сила притяжения Земли $F = \gamma \frac{Mm}{R^2}$, а в конце этого участка $F_1 = \gamma \frac{Mm}{r_1^2}$. Среднее значение силы на рас-

сматриваемом участке пути можно представить так: $F_c = \gamma \frac{Mm}{Rr_1}$.

Следовательно, работа на первом участке пути $A_1 = \gamma \frac{Mm}{Rr_1} (r_1 - R) = \gamma Mm \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{r_1} \right)$, на втором участке пути $A_2 = \gamma Mm \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$. Подобным же образом запишется работа, которую нужно выполнить на третьем, четвертом и т. д. участках пути.

Полная работа по перемещению контейнера массой m на всех рассматриваемых участках пути

$$A = \gamma Mm \left[\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{r_1} \right) + \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \dots + \left(\frac{1}{r_{n-1}} - \frac{1}{r_n} \right) \right].$$

Легко заметить, что при выполнении сложения останутся лишь члены, содержащие расстояния от центра Земли до крайних точек перемещения:

$$A = \gamma Mm \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{r_n} \right).$$

Так как $r_n = R + h$, то

$$A = \gamma M m \frac{h}{R(R+h)}.$$

$$A = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{сек}^2} \cdot 5,98 \cdot 10^{24} \text{ кг} \times$$

$$\times 50 \text{ кг} \frac{10^6 \text{ м}}{6,37 \cdot 10^6 \text{ м} (6,37 \cdot 10^6 \text{ м} + 10^6 \text{ м})} = 4,24 \cdot 10^8 \text{ Дж}.$$

Ответ. $A = 4,24 \cdot 10^8 \text{ Дж}.$

§ 27. Зависимость ускорения свободного падения тел от широты местности и высоты над уровнем моря

На тело массой m , находящееся на поверхности Земли, действует сила тяготения

$$F = \gamma \frac{mM}{R^2},$$

где M — масса Земли, а R — ее радиус.

Вследствие вращения Земли вокруг своей оси NS (рис. 32) одновременно с планетой вращается и тело, находящееся на ней. На вращающееся тело действует центростремительная сила

$$F_{\text{ц}} = \frac{mv^2}{r}.$$

Здесь r — радиус вращения тела относительно оси NS , зависящий от широты местности.

Выражая линейную скорость v через угловую скорость вращения Земли ω , получим

$$F_{\text{ц}} = \frac{m\omega^2 r^2}{r} = m\omega^2 r,$$

т. е. центростремительная сила, действующая на тело, которое вращается вместе с Землей с постоянной угловой скоростью, пропорциональна радиусу вращения. Таким образом, центростремительная сила

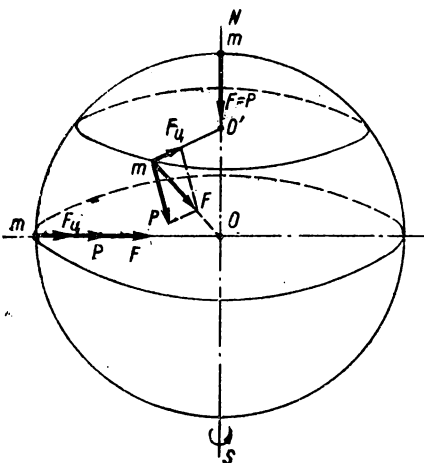


Рис. 32.

изменяется с изменением широты местности; она больше там, где больше радиус вращения.

Зная величину и направление одной составляющей силы тяготения — центростремительной силы $F_{ц}$, можно найти величину и направление второй составляющей — веса тела P , построив параллелограмм. Тогда $\vec{F} = \vec{F}_{ц} + \vec{P}$, где P — вес тела. Отсюда следует, что $\vec{P} = \vec{F} - \vec{F}_{ц}$, т. е. вес тела является величиной векторной, равной геометрической разности между силой тяготения и центростремительной силой. Так как центростремительная сила на полюсе Земли равна нулю, вес тела на полюсе Земли максимален и равен величине силы тяготения (приведенные рассуждения действительны для безвоздушного пространства). На экваторе Земли центростремительная сила максимальна, и ее направление совпадает с направлением силы тяготения, поэтому вес тела меньше силы тяготения на величину центростремительной силы.

Следует учитывать также, что Земля не является шаром: она сплюснута у полюсов, т. е. расстояние от центра Земли до тела, находящегося на ее поверхности у полюса, несколько меньше, чем в других местах, а значит, и сила тяготения на полюсах наибольшая (сила обратно пропорциональна квадрату расстояния R^2). Таким образом, вес любого тела на полюсе Земли больше, чем на экваторе, по двум причинам: вследствие меньшей центростремительной силы, которая здесь равна нулю, и вследствие меньшего радиуса Земли. Всякое тело, перенесенное с полюса на экватор, уменьшается в весе приблизительно на 0,005 его веса на полюсе.

Поскольку $g = \frac{P}{m}$, ускорение свободного падения изменяется на различных широтах так же, как и вес тела.

В заключение необходимо отметить, что масса тела не зависит от широты местности, так же как и от высоты поднятия тела над земной поверхностью.

Вес тела и его масса являются разными понятиями, они связаны следующей зависимостью: $P = mg$. Вес — это сила, а масса — мера инертности тела. Масса тела характеризует также его гравитационные свойства (что следует из закона всемирного тяготения) и полную энергию тела (что следует из закона взаимосвязи массы и полной энергии тела).

Иногда грубо массу отождествляют с количеством вещества в теле, однако такое утверждение является ошибочным.

На практике часто пользуются единицей силы (веса) 1 кг. Это объясняется следующим. При создании метрической системы мер не было четкого разграничения понятий массы и веса, и по прежним международным соглашениям вес международного прототипа килограм-

ма, изготовленного из платино-иридиевого сплава в виде гири, на уровне моря для географической широты 45° принимался за единицу веса (силы) 1 кг . По международному соглашению в системе СИ масса этого же прототипа килограмма принята за единицу массы. Вследствие вышеизложенного вес тела, выраженный в килограммах (кг), совпадает с массой тела, также выраженной в килограммах (кг), на уровне моря на широте 45° . Приблизительно такое же численное равенство существует между весом тела и его массой и для других широт. Вот почему, если известен вес тела, например 20 кг , 14 Г , 10 Т и т. д., то известна и его масса: 20 кг , 14 г , 10 т и т. д., и наоборот, если известна масса тела, известен и его вес.

Численные значения массы и веса в системе СИ не совпадают, и связь между ними устанавливается по формуле $P = mg$. Вес как сила в системе СИ измеряется ньютонами (н), а масса килограммами (кг).

Задача 1. Определить, во сколько раз ускорение силы тяжести на Солнце больше, чем на Земле, если известно, что радиус Солнца больше радиуса Земли в 109 раз, а плотность Земли больше плотности Солнца в 3,9 раза.

Решение. Пренебрегая вращением Солнца и Земли вокруг своих осей и считая, что Солнце и Земля — шары, для тела массой m , находящегося на поверхности Солнца, имеем:

$$mg_C = \gamma \frac{M_C m}{R_C^2},$$

а для тела, находящегося на поверхности Земли,

$$mg_3 = \gamma \frac{M_3 m}{R_3^2}.$$

Разделив почленно первое равенство на второе, получим

$$\frac{g_C}{g_3} = \frac{M_C R_3^2}{M_3 R_C^2}.$$

Выразив массы Солнца и Земли через их плотности и объемы, получим:

$$\frac{g_C}{g_3} = \frac{4/3\pi R_C^3 \rho_C R_3^2}{4/3\pi R_3^3 \rho_3 R_C^2} = \frac{R_C \rho_C}{R_3 \rho_3} = \frac{109}{3.9} \approx 28 \text{ раз}.$$

Ответ. На Солнце ускорение силы тяжести приблизительно в 28 раз больше, чем на Земле.

Задача 2. Найти зависимость ускорения свободного падения от высоты над поверхностью Земли. На какой высоте ускорение свободного падения составляет 25% ускорения у поверхности Земли?

Решение. Ускорение свободного падения g у поверхности Земли можно найти из равенства между весом тела и силой тяготения, т. е.

$$mg = \gamma \frac{Mm}{R^2}, \text{ откуда } g = \gamma \frac{M}{R^2}.$$

Аналогично ускорение свободного падения на высоте h

$$g_1 = \frac{M}{(R+h)^2}.$$

Следовательно, $\frac{g_1}{g} = \frac{R^2}{(R+h)^2}$, или $0,25 = \frac{R^2}{(R+h)^2}$. Решив полученное равенство, найдем $h = R$.

Ответ. На высоте, равной радиусу Земли, ускорение свободного падения равно 0,25 g .

§ 28. Причина невесомости в кораблях-спутниках

Чтобы спутник или космический корабль вышел на круговую орбиту вокруг Земли, ему необходимо сообщить в горизонтальном направлении определенную скорость, называемую *первой космической скоростью*. Величина ее определяется по величине центростремительной силы, действующей на спутник, вращающийся вокруг Земли. Величина же центростремительной силы должна быть такой, чтобы тело удерживалось на круговой орбите. Центростремительной силой в этом случае является сила притяжения спутника Землей, т. е. вес спутника. При таком условии тело будет пребывать в состоянии, подобном состоянию свободно падающего тела, т. е. в состоянии невесомости. На основании этого $mg = \frac{mv^2}{R}$; отсюда

$$v = \sqrt{gR}; v = \sqrt{9,81 \text{ м/сек}^2 \cdot 6371 \cdot 10^3 \text{ м}} = 7910 \text{ м/сек} \approx 7,9 \text{ км/сек}.$$

Если же спутнику сообщить скорость большую, чем первая космическая, он будет двигаться по эллипсу. При полете по эллиптической орбите скорость спутника непрерывно изменяется, достигая максимального значения в точке наименьшего расстояния от центра Земли (перигей) и минимального значения в точке наибольшего удаления от центра Земли (апогей).

При достижении скорости, равной $11,2 \text{ км/сек}$, называемой *второй космической скоростью*, спутник покинет Землю и начнет вращаться вокруг Солнца, так же как вращаются планеты Солнечной системы, в том числе и наша Земля.

Если же сообщить спутнику скорость $16,7 \text{ км/сек}$, он покинет пределы Солнечной системы и станет спутником Галактики. Эта скорость называется *третьей космической скоростью*.

Задача. С помощью ракеты тело поднято на высоту $h = 1000 \text{ км}$. Какую скорость v следует сообщить телу в направлении, перпендикулярном земному радиусу, чтобы оно двигалось по круговой орбите вокруг Земли? Каков будет при этом период вращения тела вокруг Земли? Сопротивлением воздуха пренебречь.

Решение. Сила притяжения тела Землей является центростремительной, поэтому на высоте h выполняется равенство

$$\gamma \frac{mM}{(R+h)^2} = \frac{mv^2}{R+h},$$

где m — масса тела. Учитывая, что $\gamma \frac{M}{R^2}$ равно ускорению свободного падения у поверхности Земли g , получим

$$v = R \sqrt{\frac{g}{R+h}}; \quad v = 6,37 \cdot 10^6 \text{ м} \sqrt{\frac{9,8 \text{ м/сек}^2}{6,37 \cdot 10^6 \text{ м} + 10^6 \text{ м}}} = 7340 \text{ м/сек}.$$

Период вращения тела

$$T = \frac{2\pi(R+h)}{v}; \quad T = \frac{2 \cdot 3,14 (6,37 \cdot 10^6 \text{ м} + 10^6 \text{ м})}{7340 \text{ м/сек}} = 6300 \text{ сек} = 1,75 \text{ ч}.$$

Ответ. Телу следует сообщить скорость 7340 м/сек ; период его вращения вокруг Земли будет равен $1,75 \text{ ч}$.

Контрольные вопросы к главе «Криволинейное движение»

- 1) Каково направление скорости в каждой точке криволинейного пути?
- 2) В чем состоит закон независимости действия сил?

3) По какой траектории движется тело, брошенное горизонтально, в безвоздушном пространстве?

4) По какой траектории движется тело, брошенное наклонно к горизонту, в безвоздушном пространстве и чем отличается его траектория от траектории тела, брошенного горизонтально?

5) В каком случае траектория полета тела называется баллистической кривой?

6) В какой части баллистическая кривая почти совпадает с параболой?

7) Что называется дальностью полета тела и от чего она зависит?

8) Что называется высотой полета и от чего она зависит?

9) Какое движение называется равномерным движением по окружности?

10) Чем отличается равномерное движение по окружности от равномерного прямолинейного движения?

11) Дайте определение величин, характеризующих вращательное движение (период, частота, угловая и линейная скорости).

12) Назовите единицы измерения линейной и угловой скорости в системе СИ и дайте их определения.

13) Какая существует связь между угловой и линейной скоростями?

14) Приведите формулы центростремительного ускорения и центростремительной силы, выраженные через линейную скорость, угловую скорость, период вращения и частоту.

15) Каково происхождение центростремительной силы при движении автомобиля по закруглению? по выпуклому и вогнутому мосту?

16) В чем состоит закон всемирного тяготения и каково его математическое выражение?

17) Каков физический смысл гравитационной постоянной?

18) Как изменяется вес тела в зависимости от широты местности и высоты поднятия над поверхностью Земли?

19) Какая существует связь между массой и весом тела?

20) Можно ли при помощи рычажных весов обнаружить изменение веса тела, если изменить его местоположение на Земле?

21) Динамометр проградуирован на экваторе. Каковы его показания на полюсе Земли?

22) Какое существует различие между весом тела и силой притяжения тела к Земле?

23) Почему тела внутри космического корабля, движущегося по орбите вокруг Земли, находятся в состоянии невесомости?

24) Какая скорость называется первой космической? второй космической? третьей космической?

Вопросы и задачи к главе «Криволинейное движение»

89. Один предмет выпал из окна вагона во время движения поезда, а второй — во время остановки. Одинаково ли время падения этих тел?

90. Камень брошен в горизонтальном направлении. Через 0,5 сек после начала движения численное значение скорости камня стало в 1,5 раза больше его начальной скорости. Найти начальную скорость камня. Спротивлением воздуха пренебречь.

91. Мальчик вращает пращу длиной $l = 1,5$ м в горизонтальной плоскости на высоте $h = 1,75$ м от Земли со скоростью, соответствующей частоте $\nu = 3$ об/сек. С какой скоростью упадет на землю камень, вылетевший из прачи?

92. В какой точке траектории летящий снаряд обладает наименьшей скоростью?

93. По шайбе массой $m = 92,5$ г, лежащей на льду, хоккеист ударил клюшкой. Определить работу, затраченную хоккеистом при ударе, если шайба пролетела по воздуху 24 м за 1,2 сек перед тем как упасть на лед.

94. Из винтовки попали в центр мишени, расположенной на том же горизонтальном уровне, что и винтовка, на расстоянии $s = 500$ м. Под каким углом к горизонту был направлен ствол винтовки, если скорость пули $v = 750$ м/сек?

95. Тело брошено со скоростью v_0 под углом α к горизонту. Определить v_0 и α , если известно, что максимальная высота подъема тела $h = 3$ м, а радиус кривизны траектории тела в верхней точке $R = 3$ м. Спротивлением воздуха пренебречь.

96. С высоты H свободно падает тело. Одновременно с ним из точки, лежащей на поверхности Земли, под углом α к горизонту бросают другое тело, и оба тела сталкиваются в воздухе. Определить величину угла α , если к моменту начала движения расстояние между телами по горизонтали составляло $s = \frac{H}{\sqrt{3}}$. Спротивлением воздуха пренебречь.

97. Камень бросили под углом $\alpha = 60^\circ$ к горизонту со скоростью $v = 15$ м/сек. Найти кинетическую, потенциальную и полную энергию камня в наивысшей точке траектории. Масса камня $m = 0,4$ кг. Спротивлением воздуха пренебречь.

98. Гирия массой 200 г, привязанная к нити длиной $l = 1$ м, описывает в горизонтальной плоскости окружность радиусом $R = 60$ см. При этом нить описывает коническую поверхность. Определить угловую скорость, период вращения гири и силу натяжения нити.

99. На систему Солнце—Земля действуют центробежная и центростремительная силы. К какому из тел приложена центростремительная сила?

100. При каком условии тело равномерно движется по окружности?

101. Почему самолет при повороте наклоняется в сторону поворота, а корабль — в противоположную сторону?

102. Самолет, летящий со скоростью $v = 720 \text{ км/ч}$, должен совершить поворот в горизонтальной плоскости по дуге радиусом $R = 5 \text{ км}$. Какой угол крена должен задать самолету летчик?

103. Если бы масса Луны была вдвое больше и Луна вращалась по той же орбите, то каков был бы период ее вращения?

104. Что будет казаться пассажирам поезда, движущегося по кривой со скоростью большей, чем та, на которую рассчитан наклон пути?

105. Летчик давит на сиденье кресла в нижней точке петли Нестерова с силой $F = 6750 \text{ н}$. Вес летчика $P = 750 \text{ н}$. Радиус петли $R = 250 \text{ м}$. Определить скорость полета.

106. Найти ускорение силы тяжести на поверхности Солнца, если известны радиус Солнца $R = 6,95 \cdot 10^5 \text{ км}$ и его масса $M = 1,97 \times 10^{30} \text{ кг}$.

107. Доказать, что ускорение свободного падения не зависит от массы падающего тела.

108. Известно, что с поднятием над поверхностью Земли на высоту $h = 1 \text{ км}$ вес тела убывает приблизительно на 0,0003 своей величины. На какой высоте вес тела уменьшится вдвое?

109. Какую скорость приобретет контейнер, снижаясь с высоты $h = 800 \text{ км}$ до ощутимо плотных слоев атмосферы, расположенных на высоте $h_1 = 100 \text{ км}$, если допустить, что сопротивление движению до этой высоты так мало, что им можно пренебречь?

110. Где легче было бы пробежать расстояние в 1 км по одинаковой дороге: на экваторе или на полюсе?

111. На каком расстоянии от поверхности Земли и с какой скоростью должен двигаться спутник, чтобы он находился над одной и той же точкой Земли? Масса Земли $M = 5,96 \cdot 10^{24} \text{ кг}$, радиус Земли $R = 6370 \text{ км}$.

112. В каком из ниже перечисленных примеров говорится о массе тела? 1) Ю. Власов поднял штангу в 212,5 килограмма. 2) 10 килограммов воды нагреты на 80°C . 3) Доска качелей выдерживает двух учащихся по 50 килограммов.

113. Космонавт, находясь в состоянии невесомости, свободно «плавает» в кабине спутника Земли. Каким образом он может вернуться на 180° вокруг своей продольной оси?

114. Будет ли вытекать вода из сосуда, находящегося на искусственном спутнике Земли, если в дне сосуда есть отверстие?

Глава V. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ. ЗВУК

§ 29. Колебательное движение

Движение, при котором тело в точно (или приближенно) равные промежутки времени проходит через одно и то же положение, называется *колебательным движением*. С этим видом движения мы часто сталкиваемся в природе и в технике. Колебательное движение совершают маятники часов, мембраны телефонов, поршни паровых двигателей и двигателей внутреннего сгорания, мосты, подвергающиеся переменной нагрузке, и т. д.

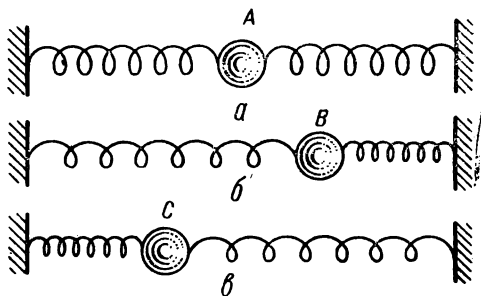


Рис. 33.

Колебательное движение называется *периодическим*, если за одинаковый промежуток времени, называемый *периодом*, тело проходит в одном и том же направлении через одни и те же положения. Простейший вид периодических колебаний — так называемое гармоническое колебание.

Рассмотрим характер движения, происходящего под действием упругой силы, например колебания пружинного маятника, который представляет собой груз, находящийся между двумя пружинами (рис. 33, а) и скользящий с очень малым трением вдоль горизонтального стержня. Если шарик пружинного маятника вывести из состояния равновесия в положение В (рис. 33, б), а затем отпустить, то он будет совершать колебательное движение. В самом крайнем положении В на него действует наибольшая возвращающая сила, направленная к положению равновесия. По мере приближения шарика к положению равновесия А эта сила уменьшается и в положении равновесия становится равной нулю. Однако шарик в точке А не

останавливается, а продолжает двигаться по инерции ко второму крайнему положению C (рис. 33, в), где возвращающая сила такая же по величине, как и в правом крайнем положении, но противоположна по направлению. Рассмотренный пример позволяет сделать вывод, что колебательное движение в этом случае обусловливается *упругой силой пружины и инерцией шарика*.

Упругая сила пропорциональна смещению x тела от положения равновесия и направлена к положению равновесия, т. е.

$$F = -kx,$$

где k — коэффициент возвращающей силы, а знак «минус» означает, что сила направлена в сторону, противоположную смещению x . Коэффициент k численно равен силе, вызывающей смещение на единицу длины от положения равновесия. В системе СИ коэффициент k измеряется в ньютонах на метр.

Периодическое колебание, совершаемое под действием силы, пропорциональной смещению и направленной к положению равновесия, называется *гармоническим колебанием*.

Выражая силу через массу колеблющегося тела m и его ускорение a , приобретаемое под действием силы, в соответствии со вторым законом Ньютона получим

$$ma = -kx; \text{ отсюда } a = -\frac{k}{m}x.$$

На основании полученного выражения гармоническое колебание можно определить так: гармоническим называется такое колебание, ускорение которого пропорционально величине смещения и имеет противоположное ему направление.

Гармоническое колебание характеризуется амплитудой, периодом, частотой и фазой.

Амплитудой называется наибольшее смещение колеблющейся точки от положения равновесия.

Время, в течение которого тело совершает полное колебание, т. е. проходит расстояние, равное четырем амплитудам, называется *периодом колебания*. Вместо периода T можно пользоваться величиной, обратной ему, так называемой *частотой* $\nu = \frac{1}{T}$. Частота в си-

стеме СИ измеряется в герцах: 1 *гц* — это частота колебания, при котором за 1 *сек* совершается одно колебание.

Рассмотрим более подробно гармоническое колебание на примере колебания маятника.

§ 30. Колебания маятника

Любое твердое тело, которое может совершать колебательное движение около некоторой оси, не проходящей через его центр тяжести, называется *маятником* (точнее, физическим маятником). Например, маятником является металлический шарик, подвешенный на нити, которая практически нерастяжима. В положении равновесия вес шарика уравнивается натяжением нити. Если маятник отклонить от положения, соответствующего состоянию равновесия, так, чтобы нить составляла небольшой угол α с вертикалью (рис. 34), а затем отпустить его, он начнет колебаться. Сила P_1 , возвращающая маятник в положение равновесия, является составляющей веса P (составляющая веса P_2 уравнивается натяжением нити). Из рис. 34 видно, что $P_1 = P \sin \alpha$; при малых углах отклонения $\sin \alpha$ можно заменить углом α , а дугу, по которой движется маятник, можно считать отрезком прямой — величиной смещения x . Тогда

$$P_1 = \frac{P}{l} x.$$

Так как P и l — величины постоянные, а сила P_1 по направлению всегда противоположна смещению, можно записать:

$$P_1 = -kx,$$

$$\text{где } k = \frac{P}{l}.$$

Таким образом, при малых значениях угла α колебания маятника происходят под действием силы, пропорциональной смещению маятника и направленной к положению равновесия, как и в случае пружинного маятника, т. е. маятник совершает гармоническое колебание.

Силы, не упругие по своей природе, но аналогичные им по виду зависимости от смещения, называются *квазиупругими*. К ним относятся и рассматриваемая составляющая веса маятника P_1 .

Количественные соотношения, характеризующие колебательное движение, устанавливаются обычно для математического маятника. *Математическим маятником* называется тяжелая материальная точка, подвешенная на тонкой нерастяжимой и невесомой нити. Рассмотренный выше маятник приближенно можно считать математическим.

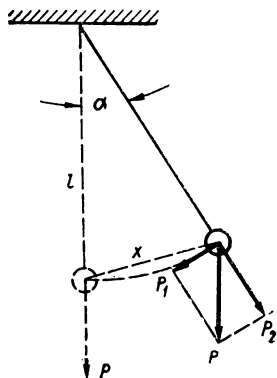


Рис. 34.

Голландский ученый Христиан Гюйгенс нашел, что при малых углах отклонения от положения равновесия период колебания математического маятника пропорционален корню квадратному из длины маятника и обратно пропорционален корню квадратному из ускорения свободного падения:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}},$$

где l — длина маятника, g — ускорение свободного падения. Из приведенной формулы следует, что при небольших углах отклонения период колебаний математического маятника не зависит ни от амплитуды колебания, ни от массы маятника.

Маятник является наиболее простым, удобным и точным прибором для определения ускорения свободного падения. Ускорение свободного падения g находят по формуле

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}.$$

Смещение математического маятника, а также любого тела, совершающего гармонические колебания, определяется формулой

$$x = a \sin(\omega t + \varphi_0),$$

где a — амплитуда колебания; стоящая под знаком синуса величина $(\omega t + \varphi_0)$ называется *фазой колебания*. В момент времени $t = 0$ фаза колебания обозначается через φ_0 и называется *начальной фазой колебания*.

При колебаниях маятника происходит процесс превращения потенциальной энергии в кинетическую, и наоборот. В крайних положениях маятник обладает наибольшей потенциальной энергией; при движении маятника к положению равновесия возрастает его скорость, а следовательно, увеличивается кинетическая энергия. В момент прохождения положения равновесия маятник обладает только кинетической энергией, равной потенциальной энергии при наибольшем отклонении, так как в любой момент времени выполняется закон сохранения энергии: $W_k + W_p = \text{const}$. В течение одного периода маятник два раза обладает максимальной потенциальной энергией и два раза — максимальной кинетической энергией. В приведенных рассуждениях трение и сопротивление среды во внимание не принимались.

Задача 1. Чему равен период колебания математического маятника, находящегося в лифте, который движется вниз с ускорением $0,25g$? Длина нити маятника $l = 60$ см.

Решение. Кабина лифта движется вниз с ускорением $0,25g$. Следовательно, результирующее ускорение равно $(g - 0,25g)$. Поэтому

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g - 0,25g}} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{0,75g}};$$

$$T = 2 \cdot 3,14 \sqrt{\frac{0,6 \text{ м}}{0,75 \cdot 9,8 \text{ м/сек}^2}} = 1,79 \text{ сек.}$$

Ответ. $T = 1,79 \text{ сек.}$

Задача 2. Материальная точка массой $m = 20 \text{ г}$ совершает гармоническое колебание с амплитудой $A = 10 \text{ см}$. Найти максимальную силу, действующую на точку, если коэффициент возвращающей силы $k = 0,18 \text{ н/м}$. Какова величина ускорения, скорости и потенциальной энергии точки в момент времени, когда ее смещение равно 6 см ?

Решение. Очевидно, на точку действует наибольшая сила в момент времени, когда ее смещение равно амплитуде, т. е. при $x = A$. Следовательно, $F_{\max} = kA$; $F_{\max} = 0,18 \text{ н/м} \cdot 0,1 \text{ м} = 0,018 \text{ н}$. Ускорение точки

$$a = -\frac{kx}{m}; \quad a = -\frac{0,18 \text{ н/м}}{0,02 \text{ кг}} \cdot 0,06 \text{ м} = -0,54 \text{ м/сек}^2.$$

Потенциальная энергия равна работе внешних сил, которую нужно совершить, чтобы вывести материальную точку из состояния покоя и отклонить ее на величину смещения x . Как было показано выше, работа упругой силы численно равна $\frac{kx^2}{2}$. Следовательно, потенциальная энергия

$$W_{\text{п}} = \frac{1}{2} kx^2; \quad W_{\text{п}} = 3,24 \cdot 10^{-4} \text{ Дж.}$$

Скорость определяется из формулы кинетической энергии

$$v = \sqrt{\frac{2W_{\text{к}}}{m}}.$$

Кинетическая энергия равна разности полной и потенциальной энергии, но поскольку полная энергия для любого момента времени равна потенциальной в крайнем положении, то

$$W_{\text{к}} = k \frac{A^2}{2} - \frac{kx^2}{2} = \frac{k}{2} (A^2 - x^2).$$

Следовательно,

$$v = \sqrt{\frac{k(A^2 - x^2)}{m}}; \quad v \approx 0,24 \text{ м/сек.}$$

Ответ. $a = -0,54 \text{ м/сек}^2$; $v \approx 0,24 \text{ м/сек}$; $W_{\pi} = 3,24 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}$.

Задача 3. Колебание точки задано уравнением $x = 10 \times \sin\left(15,7t + \frac{\pi}{4}\right)$. Найти амплитуду, частоту и период колебаний.

Определить смещение точки и фазу колебания в момент времени $t = \frac{T}{4}$.

Решение. Для решения задачи сравним заданное уравнение с уравнением гармонического колебания, записанного в таком виде:

$$x = a \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right).$$

Из сравнения следует, что амплитуда $a = 10 \text{ см}$; $\frac{2\pi}{T}t = 15,7t$, следовательно, период $T = \frac{2\pi}{15,7} = 0,4 \text{ сек}$; тогда $v = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,4 \text{ сек}} = 2,5 \text{ гц}$;

фаза колебания $\varphi = 15,7t + \frac{\pi}{4} = 15,7 \cdot 0,1 + \frac{\pi}{4} = \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4} = \frac{3}{4}\pi$,

или иначе: $\varphi = \frac{2\pi}{T}t + \frac{\pi}{4} = \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{4} + \frac{\pi}{4} = \frac{3}{4}\pi$. Смещение точки $x =$

$= 10 \text{ см} \sin \frac{3}{4}\pi = 10 \cdot 0,707 \text{ см} = 7,07 \text{ см}$.

Ответ. $a = 10 \text{ см}$; $v = 2,5 \text{ гц}$; $T = 0,4 \text{ сек}$; $x = 7,07 \text{ см}$;
 $\varphi = \frac{3}{4}\pi$.

§ 31. Затухающие колебания

Маятник, выведенный из состояния равновесия и не подвергающийся действию внешних сил, совершает колебания, которые называются *свободными*, или *собственными колебаниями*. Свободные колебания совершаются под действием только внутренних сил и поэтому могут происходить в течение очень длительного времени, т. е. они являются практически незатухающими. Частоту собственных

колебаний называют *собственной частотой*; она определяется свойствами колеблющегося тела. Так, собственная частота колебаний маятника определяется его длиной ($\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$).

В действительности вследствие сопротивления воздуха и трения в точке подвеса амплитуда колебаний маятника с течением времени уменьшается. Колебания, амплитуда которых с течением времени уменьшается, называются *затухающими*. Они также являются собственными, так как величины, характеризующие их, определяются свойствами самого колеблющегося тела.

Чтобы колебания маятника не затухали, надо непрерывно компенсировать энергию, которая расходуется в окружающую среду. В часовых механизмах потерянная энергия восстанавливается за счет энергии сжатой пружины или за счет потенциальной энергии опускающейся гири.

§ 32. Вынужденные колебания. Резонанс

Колебания тела под действием внешней, периодически изменяющейся силы называются *вынужденными колебаниями*. Вынужденные колебания являются незатухающими. Частота их равна частоте силы, действующей на тело.

Если на тело действуют две или больше периодически изменяющиеся силы, то каждая из них вызывает колебание тела независимо от других в соответствии с принципом независимости действия сил. В простейшем случае, когда тело участвует одновременно в нескольких гармонических колебаниях одного направления и периода, результирующее колебание можно определить, алгебраически складывая в каждом месте смещения слагаемых колебаний. При этом получим гармоническое колебание такого же периода, происходящее по той же прямой. Если тело одновременно участвует в нескольких колебаниях разного периода и происходящих по разным прямым, то результирующее колебание зависит от соотношения частот, амплитуд, направлений колебаний и начальных фаз слагаемых колебаний.

Амплитуда вынужденных колебаний тела зависит от свойств колеблющегося тела, амплитуды вынуждающей силы и от соотношения частоты вынуждающей силы и собственной частоты тела. При изменении частоты вынуждающей силы, действующей на тело, изменяется амплитуда его колебаний. С приближением частоты вынуждающей силы к частоте собственных колебаний амплитуда вынужденных колебаний возрастает, достигая максимального значения при равенстве этих частот. В этом случае говорят, что имеет место явление резонанса. Итак, *резонансом* называется явление резкого возрастания

амплитуды вынужденных колебаний тела, когда частота изменений вынуждающей силы равна частоте собственных колебаний тела.

С явлением резонанса необходимо считаться в практической деятельности.

§ 33. Волновое движение

Если какая-либо точка упругой среды приводится в колебательное движение, то со временем в колебание придут и другие точки этой среды. Вследствие инерции точек среды колебательное движение последующих точек запаздывает, т. е. каждая колеблющаяся точка среды отстает по фазе от предыдущей.

Распространяющееся в среде периодическое возмущение называется *волной*. В течение одного периода колебания волна распространяется на расстояние, называемое *длиной волны*. Иначе, длина волны — это расстояние между ближайшими двумя точками волны, колеблющимися в одинаковой фазе.

Для волнового движения характерна периодичность во времени и пространстве. Различают волны поперечные и продольные. В *поперечной* волне частицы колеблются в направлениях, перпендикулярных к направлению распространения волны, а в *продольных* — вдоль направления распространения волны.

Поперечные волны возникают только в твердых телах. В жидкости и газах они не образуются, поскольку при изменении формы газа или жидкости упругие силы не возникают. Последнее утверждение не относится к поверхности жидкости, в которой могут распространяться также поперечные волны, носящие, однако, более сложный характер; в этом случае колеблющиеся частицы поверхности жидкости движутся по замкнутым круговым или эллиптическим траекториям. Продольные же волны образуются как при изменении формы тела, так и при изменении его объема, поэтому они возникают и в газах, и в жидкостях, и в твердых телах.

Волна, встречающая преграду, отражается, а переходя из одной среды в другую, — преломляется.

Если период колебания обозначить через T , а длину волны через λ , то, согласно определению, скорость ее

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

где ν — частота колебания.

Задача. Волна распространяется со скоростью $v = 6$ м/сек при частоте $\nu = 4$ гц. Чему равна разность фаз точек волны, отстоящих друг от друга на расстояние $l = 50$ см?

Решение. Длина волны $\lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{6 \text{ м/сек}}{4 \text{ сек}^{-1}} = 1,5 \text{ м}$.

При изменении расстояния между точками волны на величину, равную длине волны λ , фаза φ меняется на 2π . Отсюда следует, что изменение фазы (разность фаз) на длине l определится из соотношения $\frac{\varphi}{2\pi} = \frac{l}{\lambda}$, т. е.

$$\varphi = 2\pi \frac{l}{\lambda} = 2\pi \frac{0,5 \text{ м}}{1,5 \text{ м}} = \frac{2}{3} \pi = 120^\circ.$$

Ответ. Разность фаз составляет 120° .

§ 34. Звук

Механические колебания, распространяющиеся в упругой среде и воспринимаемые органами слуха, называются *звуковыми волнами*, или *звуком*. Раздел физики, в котором изучаются звуковые явления, называется акустикой. Колебания с частотами свыше 20 000 *гц* называются *ультразвуками*.

Источником звука могут быть твердые тела, жидкости и газы. По форме и характеру звуковые волны делятся на звуковые удары, шумы и музыкальные звуки. Звуковому удару соответствует единичная волна, так называемая *ударная*. Ряд последовательных непериодических ударов образует *шумы*. Звуки же, состоящие из ряда непрерывно следующих одна за другой волн одинаковой длины и формы, называются *музыкальными звуками*.

Колеблющееся тело передает свои колебания частицам окружающей среды, которые в свою очередь передают колебания дальше. В результате в среде образуются и распространяются звуковые волны. Колебания в воздухе происходят в направлении распространения волны, т. е. звуковые волны в воздухе являются *продольными*.

В безвоздушном пространстве звуковые волны не могут распространяться, они распространяются лишь в твердых, жидких и газообразных телах. Различные тела по-разному проводят звук, т. е. обладают неодинаковой звукопроводностью. Так, мягкие пористые тела проводят звук плохо.

В каждой среде звук распространяется с определенной скоростью, которая определяется по формуле

$$v = \frac{s}{t};$$

здесь s — расстояние, которое проходит звук в течение времени t .

Измерения скорости звука в различных средах показали, что в воздухе при температуре 0°C скорость звука равна 332 м/сек ; с повышением температуры скорость звука возрастает. В жидкостях скорость звука больше, чем в газах, а в твердых телах — больше, чем в жидкостях.

Задача 1. Во сколько раз изменится длина звуковой волны при переходе ее из воздуха в воду? Скорость распространения звука в воздухе $v = 340 \text{ м/сек}$, в воде $v_1 = 1450 \text{ м/сек}$.

Решение. Частота волны, а следовательно, и ее период T при переходе из одной среды в другую не изменяется. Длина волны, как известно, равна расстоянию, на которое распространяется волна за один период: $\lambda = vT$ и $\lambda_1 = v_1T$. Отсюда

$$\frac{\lambda_1}{\lambda} = \frac{v_1}{v}; \quad \frac{\lambda_1}{\lambda} = \frac{1450 \text{ м/сек}}{340 \text{ м/сек}} = 4,3 \text{ раза.}$$

Ответ. В воде длина звуковой волны будет в 4,3 раза больше.

Задача 2. Для определения скорости звука в железе воспользовались участком строящегося газопровода, состоящим из 60 сваренных между собой двенадцатиметровых труб. При ударе по концу первой трубы у конца последней восприняли два звуковых сигнала, следующие один за другим через $t = 2 \text{ сек}$. Принимая скорость звука в воздухе равной 335 м/сек , определить скорость звука в железе.

Решение. Путь, пройденный звуком в воздухе и железе, одинаков и равен длине сваренных труб, т. е. $l = nl_1 = 60 \cdot 12 \text{ м} = 720 \text{ м}$. Скорость звука в железе $v_1 = \frac{l}{t_1}$. В железе звук проходит расстояние l быстрее, чем в воздухе, на $t \text{ сек}$, т. е. $t_1 = t_2 - t = \frac{l}{v} - t$. Следовательно,

$$v_1 = \frac{lv}{l - vt} = \frac{720 \text{ м} \cdot 335 \text{ м/сек}}{720 \text{ м} - 335 \text{ м/сек} \cdot 2 \text{ сек}} = 4820 \text{ м/сек.}$$

Ответ. Скорость звука в железе приблизительно равна 4820 м/сек .

§ 35. Высота тона. Громкость и тембр звука. Ультразвуки

Музыкальные звуки характеризуются высотой тона, громкостью и тембром. *Высота тона* соответствует частоте звука: чем больше частота, тем выше тон звука. Наше ухо воспринимает звуковые колебания с частотами $20\text{--}20\,000 \text{ гц}$.

Голос звука обуславливается силой звука. Сила звука — это величина, численно равная энергии, проходящей через единицу площади поверхности, расположенную перпендикулярно к звуковой волне, за единицу времени. Сила звука определяется амплитудой колебания. Звук будет тем громче, чем больше амплитуда колебания.

Звуки, исходящие от различных источников, неодинаковы по тембру, т. е. по окраске.

В сложном музыкальном звуке, кроме основного тона (с наименьшей частотой), есть еще дополнительные тоны, обусловленные частотами колебаний, относящимися между собой как $1:2:3:4:\dots$. Такие простые тоны, частоты которых вдвое, втрое и т. д. превышают частоту основного тона, называются *обертонами*. От наличия и громкости обертонов зависит тембр звука.

Встречая преграду, звук отражается. Звук, идущий от источника, и тот же звук, отраженный от преграды, слышатся отдельно, если они разделены промежутком времени не менее $0,1 \text{ сек.}$ Звук, отраженный от преграды, называют эхом. Звук, идущий от источника, распространяется во все стороны, образуя сферический фронт волны, поэтому громкость звука убывает обратно пропорционально квадрату радиуса сферы. Если звуковой волне придать направление при помощи рупора, то поверхность звуковой волны мало изменится с увеличением расстояния от источника звука, энергия меньше рассеивается и звук будет слышен на далеком расстоянии. Человеческое ухо также является рупором, воспринимающим звук; оно обладает высокой чувствительностью.

Простейший источник звука — камертон. Каждый камертон создает звук определенной частоты. Камертоны обычно устанавливают на ящики определенных размеров, имеющие отверстия с одной стороны. Если разместить рядом два одинаковых камертона так, чтобы отверстия ящиков были друг против друга, и заставить один из них звучать, а затем заглушить звук, то будет слышно звучание второго камертона. Если же второй камертон иных размеров (т. е. создающий колебания другой частоты), то он звучать практически не будет.

Опыт показывает, что вынужденные колебания камертонов, струн, замкнутых полостей и т. д. будут максимальными при совпадении частот источника звука и собственной частоты камертона, струн, полостей и т. д., т. е. в этом случае наблюдается так называемый *акустический резонанс*. Это явление широко используется в музыкальных инструментах для усиления звука; так, в частности, ящик, на котором установлен камертон, является резонирующим (резонатором).

При помощи резонаторов можно выделять звуки определенных частот, на которые они резонируют.

Ультразвуки — это звуки с частотой выше 20 000 гц, которые не воспринимаются человеческим ухом. Ультразвуки находят широкое применение в самых разнообразных областях человеческой деятельности. Ультразвуки, распространяясь от излучателя, при встрече с преградой отражаются от нее. Регистрируя отраженные звуки и зная время между посылкой и приемом импульса ультразвука, можно определить, где и на каком расстоянии находится отражающий предмет. Описанный принцип, основанный на отражении ультразвука, лежит в основе приборов для измерения глубин водоемов и определения рельефа их дна, для обнаружения и определения местоположения айсбергов, косяков рыб, подводных лодок и т. д., для выявления дефектов металлических изделий (ультразвуковая дефектоскопия).

Ультразвуковые дефектоскопы, сконструированные советским ученым С. Я. Соколовым, могут с успехом применяться также и для определения линейных размеров тел, что особенно важно в тех случаях, когда невозможно использование обычных измерительных приборов (например, при измерении толщины обшивки корабля, стенок котлов и т. д.).

Ультразвуки находят широкое применение для проделывания фасонных отверстий в твердых и хрупких материалах. С этой целью между обрабатываемой поверхностью и ультразвуковой головкой (инструментом) вводится жидкая суспензия (вода и абразив). Под влиянием возникающей в суспензии кавитации и колебаний частиц порошка от обрабатываемой поверхности откалываются мелкие частицы. Полученные в процессе сверления отверстия повторяют форму торца инструмента-излучателя.

Ультразвуки производят биологическое и физиологическое действие. Так, при обработке ими семян некоторых растений (картофеля, гороха и др.) увеличивается всхожесть и урожайность; молоко дольше не скисает; красные кровяные шарики разрушаются; живые организмы (лягушки, рыбы), подвергнутые воздействию ультразвука, гибнут в течение нескольких минут.

Ультразвуки используются при изготовлении различных эмульсий из нерастворимых жидкостей (например, эмульсии ртути в воде). Ими осаждают пыль и частицы дыма, стерилизуют медикаменты, продукты и т. д. и т. п.

Контрольные вопросы к главе «Колебания и волны. Звук»

- 1) Какое движение называется колебательным?
- 2) Какое колебательное движение называется периодическим?
- 3) Какие колебания называются гармоническими?

- 4) Дайте определения основных величин, характеризующих гармонические колебания (амплитуда, период, частота).
- 5) Какова единица частоты в системе СИ?
- 6) Какая существует связь между периодом колебания и частотой?
- 7) Какой маятник называется математическим?
- 8) Как изменяется ускорение маятника в зависимости от угла отклонения?
- 9) В какой точке скорость качающегося маятника максимальная? Чему равно ускорение в этой точке?
- 10) В каких точках ускорение качающегося маятника наибольшее и какова скорость в них?
- 11) От каких величин и как зависит период колебания математического маятника?
- 12) Как выглядит и как называется график смещения точки от положения равновесия в гармоническом колебании?
- 13) Какие колебания называются затухающими? незатухающими?
- 14) На каком свойстве основано применение маятника в часах и каково его назначение?
- 15) Какие колебания называются вынужденными?
- 16) В чем состоит явление резонанса? Каково значение его в технике?
- 17) Что называется волной?
- 18) Что называется длиной волны?
- 19) Какая волна называется поперечной и какая — продольной?
- 20) В каких телах возможны поперечные и в каких — продольные волны?
- 21) Каково соотношение между длиной волны, скоростью и периодом?
- 22) Какие волны называются звуковыми?
- 23) Что называется акустикой?
- 24) Поперечными или продольными являются звуковые волны в воздухе?
- 25) Как делятся звуки по форме и характеру?
- 26) Как измеряют скорость звука?
- 27) В какой среде скорость звука наибольшая: в твердой, жидкой или газообразной?
- 28) Какие явления природы создают ударные волны?
- 29) Могут ли звуковые волны распространяться в безвоздушном пространстве?
- 30) Что называется силой звука?
- 31) От чего зависит высота тона, громкость и тембр звука?
- 32) Что такое эхо? Почему в комнате эхо не слышно?
- 33) Что называется акустическим резонансом?

Вопросы и задачи к главе
«Колебания и волны. Звук»

115. Как изменится период колебания маятника, если с ним опуститься в глубокую шахту? подняться на высокую гору?

116. Как изменится ход часов «ходики», если с ними переехать в направлении севера? экватора?

117. Почему массивная часть маятника изготавливается в форме чечевицы?

118. Как изменится ход часов «ходики», если перевезти их из Киева в Москву? Как отрегулировать часы, чтобы при этом они шли верно?

119. Как изменится ход часов «ходики» при наступлении летних жарких дней по сравнению с холодными зимними днями?

120. Как изменится период колебания маятника, если длину маятника удвоить? утроить?

121. Определить частоту колебания маятника длиной 70 м в Москве ($g = 981,56 \text{ см/сек}^2$).

122. Период колебания маятника на поверхности Земли $T = 1 \text{ сек}$. Определить период колебания этого маятника на поверхности Луны.

123. Рассчитать, на сколько изменится ход часов «ходики» за сутки на поверхности Луны, зная, что радиус Луны в 3,8 раза меньше радиуса Земли, а ее масса в 81 раз меньше массы Земли.

124. Является ли движение маятника в направлении положения равновесия равноускоренным?

125. Уравнение движения точки дано в виде $x = 5 \sin \frac{\pi}{6} t \text{ см}$.

Каковы амплитуда, частота и период колебания точки? Найти моменты времени, в которые достигаются максимальные скорость и ускорение. Определить также смещение точки и фазу колебания в момент времени $t = \frac{T}{6}$.

126. Сложить два гармонических колебательных движения с одинаковыми периодами и амплитудами, отличающимися по фазе на 45° .

127. Начертите график колебательного движения, состоящего из двух гармонических колебаний, периоды которых относятся между собой как 1 : 2. Амплитуды составляющих колебаний принять одинаковыми.

128. На каком расстоянии от наблюдателя возникла молния, если он услышал первый удар грома через 5 сек после ее вспышки?

129. Какова длина железной трубы газопровода, если звук, возникший у одного конца трубы, приходит к наблюдателю, находящемуся у другого ее конца, по воздуху на 10 сек позже, чем по трубе?

Скорость звука в воздухе считать равной 335 м/сек, а в железе 4820 м/сек.

130. Как далеко находится преграда, если эхо слышно через 20 сек после возникновения звука? Скорость звука в воздухе считать равной 340 м/сек.

131. Где больше длина звуковой волны — в воде или в воздухе?

132. Маяк посылает пароходу одновременно два звуковых сигнала: первый — по воздуху, второй — по воде. На пароходе первый сигнал был услышан через 4 сек после второго. Найти скорость звука в воде, если расстояние от маяка до парохода $s = 1742$ м, а скорость звука в воздухе $v = 335$ м/сек.

133. Глубину моря измеряют ультразвуковым эхолотом, излучающим колебания с частотой 50 000 гц. Чему равна длина ультразвуковой волны в воде? Скорость ультразвука в воде 1400 м/сек.

Глава VI. МЕХАНИКА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

§ 36. Давление

Давлением называется величина, измеряемая силой, действующей перпендикулярно на единицу площади поверхности тела. Так, если сила F действует перпендикулярно на площадь S поверхности тела, то, согласно определению, давление

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

Если сила действует на площадь поверхности тела под углом, то при вычислении давления берется нормальная составляющая этой силы.

За единицу давления принимается такое давление, при котором на единицу площади поверхности в перпендикулярном направлении действует единица силы. Единицей давления в системе СИ является

1 н/м², а в системе СГС 1 дин/см²; $1 \text{ н/м}^2 = \frac{10^5 \text{ дин}}{10^4 \text{ см}^2} = 10 \text{ дин/см}^2$.

§ 37. Закон Паскаля для жидкостей и газов

В газах и жидкостях частицы подвижны, поэтому жидкости и газы не имеют собственной формы. Французский ученый Блез Паскаль установил, что *жидкость (или газ), находящаяся в закрытом сосуде, передает производимое на нее давление во все стороны равномерно (закон Паскаля).* Например, если в сообщающиеся сосуды с жидкостью

ввести плотно входящие поршни (рис. 35) и одним из них производить давление на поверхность жидкости, то это давление передается во все стороны одинаково. В результате и второй поршень окажется под таким же давлением, т. е. $p_1 = p_2$, или $\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}$, где F_1 и F_2 — силы, действующие на площади поверхностей поршней S_1 и S_2 .

Из приведенного соотношения следует, что силы, действующие на поршни, пропорциональны площадям их поверхностей. Этот принцип положен в основу устройства гидравлического пресса. Жидкостью в гидравлических прессах является вода или масло. Подобно простым механизмам, гидравлический пресс служит преобразователем силы. В настоящее время созданы гидравлические прессы, развивающие силу до 150 Мн. Гидравлические прессы используются для штамповки деталей из металлов и пластмасс, для прессовки фарфора и т. д. Особенно широко гидравлические прессы применяются в производстве пищевых продуктов: при изготовлении макарон, при извлечении растительного масла из семян, сока из винограда, яблок и других плодов и т. д.

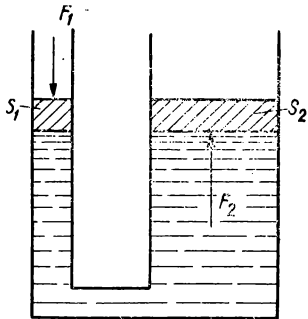


Рис. 35.

§ 38. Давление жидкости на дно и стенки сосуда

Вследствие притяжения к Земле жидкость оказывает давление на дно и стенки сосуда, а также на тела, находящиеся внутри нее. Давление, обусловленное весом столба жидкости, называется *гидростатическим*. Давление жидкости на разных высотах различно и не зависит от ориентации площадки, на которую оно производится.

Пусть жидкость находится в цилиндрическом сосуде с площадью сечения S ; высота столба жидкости h ; тогда давление жидкости на дно сосуда

$$p = \frac{P}{S} = \frac{mg}{S} = \frac{\rho Shg}{S} = \rho gh.$$

Таким образом, давление жидкости на дно пропорционально ее плотности и высоте столба. Согласно закону Паскаля, это давление передается во все стороны одинаково, следовательно, жидкость оказывает одинаковое давление на боковые стенки сосуда и на тела, погруженные в нее и находящиеся на той же глубине.

Если жидкость испытывает внешнее давление p_0 (например, давление воздуха), то давление внутри жидкости на глубине h

$$p = p_0 + \rho gh.$$

Задача. Нефть хранится в баке, имеющем форму цилиндра высотой $h = 8$ м и диаметром $d = 5$ м. Определить силу, с которой нефть давит на боковую поверхность бака. Плотность нефти $\rho = 0,76 \cdot 10^3$ кг/м³.

Решение. С увеличением глубины давление постепенно возрастает от нуля у поверхности до максимального значения на дне бака. Среднее давление $p_c = \frac{p}{2} = \frac{\rho gh}{2}$. Сила давления

$$\begin{aligned} F &= p_c S = \frac{\rho gh}{2} \pi dh = \frac{\pi \rho g d h^2}{2} = \\ &= \frac{3,14 \cdot 0,76 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 9,8 \text{ м/сек}^2 \cdot 5 \text{ м} \cdot 64 \text{ м}^2}{2} = 3,7 \cdot 10^6 \text{ н.} \end{aligned}$$

Ответ. $F = 3,7 \cdot 10^6$ н.

§ 39. Закон сообщающихся сосудов

Сообщающимися называются сосуды, соединенные в нижней части.

Пусть однородная жидкость в сообщающихся сосудах находится в состоянии покоя. Тогда давление на дно в каждом из сосудов будет одинаково, т. е. $p_1 = p_2$. Выражая давление через плотность и высоту уровней жидкости, получим

$$\rho gh_1 = \rho gh_2.$$

Отсюда следует, что для однородной жидкости высота ее уровней в сообщающихся сосудах одинакова. Это свойство используется для определения высоты уровня жидкости в закрытом сосуде, например в паровом котле. Принцип сообщающихся сосудов положен в основу устройства шлюзов, водопровода и т. д.

Если в сообщающиеся сосуды налить разные несмешивающиеся жидкости, то

$$\rho_1 gh_1 = \rho_2 gh_2; \text{ отсюда } \frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1},$$

т. е. в состоянии покоя высота столбов разнородных жидкостей в сообщающихся сосудах обратно пропорциональна их плотностям.

Задача. В сообщающиеся сосуды вначале налили ртуть, а затем в один из сосудов — воду высотой $h_0 = 21,5$ см, в другой — бензин, причем верхние уровни бензина и воды совпадали. Какова разность уровней ртути в сообщающихся сосудах, если плотность ртути $\rho = 13,6$ г/см³, а бензина $\rho_1 = 0,7$ г/см³?

Решение. Поскольку плотность воды больше, чем плотность бензина, уровень ртути в сосуде с водой ниже, чем уровень ртути в сосуде с бензином. Если от уровня ртути в сосуде, в который налита вода, провести горизонтальную линию АВ (рис. 36), то, очевидно, эту часть ртути, находящуюся в равновесии, можно не учитывать при расчетах. Тогда остается, с одной стороны, столб воды высотой h_0 , а с другой — столб ртути высотой h и бензина высотой $h_0 - h$. Так как жидкости находятся в равновесии, то выполняется равенство

$$h_0 \rho_0 g = h \rho g + (h_0 - h) \rho_1 g.$$

Отсюда

$$\begin{aligned} h &= \frac{\rho_0 - \rho_1}{\rho - \rho_1} h_0; \quad h = \\ &= \frac{1 \text{ г/см}^3 - 0,7 \text{ г/см}^3}{13,6 \text{ г/см}^3 - 0,7 \text{ г/см}^3} \times \\ &\times 21,5 \text{ см} = 0,5 \text{ см}. \end{aligned}$$

Ответ. Разность уровней ртути равна 0,5 см.

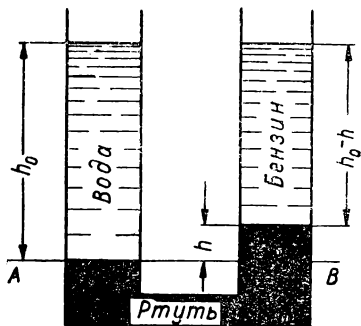


Рис. 36.

§ 49. Закон Архимеда

Древнегреческий ученый Архимед установил, что *жидкость (или газ) действует на погруженное в нее (него) тело с силой, направленной вертикально вверх и равной весу жидкости (газа) в объеме погруженной части тела.*

Таким образом, на тело, погруженное в жидкость (газ), действуют две силы: вес тела P , направленный вертикально вниз, и выталкивающая сила F , равная весу вытесненной жидкости (газа) и направленная вертикально вверх. Отсюда следует, что плавающее тело выталкивает столько жидкости, сколько само оно весит. Этот закон лежит в основе расчетов при конструировании судов, подводных лодок, аэростатов и т. д.

Разность между выталкивающей силой и весом тела называется *подъемной силой*.

Задача 1. По весу изготовленной для царя Гиерона короны в воздухе ($P = 9,81$ н) и в воде ($P_1 = 9,22$ н) Архимед, не разрушая изделия, смог установить, изготовлено ли оно из чистого золота. Как рассуждал Архимед?

Решение. Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо определить плотность короны и сравнить ее с плотностью золота, равной $\rho_1 = 19,3 \cdot 10^3$ кг/м³.

Плотность короны

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

где P — вес короны в воздухе, V — ее объем. Объем короны равен объему вытесненной воды, выраженному через вес воды P_2 и ее плотность ρ_2 , по формуле $V = \frac{P_2}{g\rho_2}$.

По закону Архимеда вес вытесненной воды равен выталкивающей силе: $P_2 = P - P_1$. Поэтому

$$V = \frac{P - P_1}{g\rho_2}.$$

Искомая плотность короны

$$\rho = \frac{P}{P - P_1} \rho_2; \quad \rho = \frac{9,81 \text{ н}}{9,81 \text{ н} - 9,22 \text{ н}} \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 = 16,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3.$$

Следовательно, корона состояла не из чистого золота.

Задача 2. Тело плавает в ртути таким образом, что в нее погружено 0,65 объема тела. Какая часть тела окажется погруженной в ртуть, если поверх ртути налить слой воды, полностью покрывающий тело?

Решение. По закону Архимеда вес тела равен весу вытесненной им ртути, т. е. $P = 0,65 V \rho g$, где V — объем тела, ρ — плотность ртути.

Пусть V_1 — объем части тела, оставшейся в ртути после того, как налили поверх нее воду. Вес тела во втором случае равен выталкивающей силе ртути и воды:

$$P = V_1 \rho g + (V - V_1) \rho_1 g,$$

где ρ_1 — плотность воды.

Приравнявая правые части найденных выражений для веса тела P , получим

$$V_1 \rho g + (V - V_1) \rho_1 g = 0,65 V \rho g.$$

Отсюда

$$V_1 = \frac{0,65 \rho - \rho_1}{\rho - \rho_1} V; \quad V_1 = \frac{0,65 \cdot 13,6 \text{ г/см}^3 - 1 \text{ г/см}^3}{13,6 \text{ г/см}^3 - 1 \text{ г/см}^3} V = 0,62 V.$$

Ответ. В ртуть будет погружено 0,62 объема тела.

Задача 3. Сколько балласта надо сбросить с равномерно опускающегося аэростата, чтобы он начал равномерно подниматься с той же скоростью? Вес аэростата с балластом $P = 16\,000 \text{ н}$, подъемная сила аэростата $F = 12\,000 \text{ н}$.

Решение. При равномерном спуске вес аэростата с балластом P уравнивается подъемной силой и силой сопротивления, т. е. $P = F + F_c$.

При равномерном подъеме подъемная сила аэростата уравнивается весом P_1 аэростата с остатком балласта и силой сопротивления F_c , т. е. $F = P_1 + F_c$.

Поскольку, по условию задачи, скорость подъема равна скорости спуска, сила сопротивления (как пропорциональная скорости) в обоих случаях одинакова. Из приведенных равенств находим $P_1 = 2F - P$. Следовательно, вес сброшенного балласта

$$P - P_1 = P - (2F - P) = 2(P - F); \quad P = 8000 \text{ н}.$$

Ответ. С аэростата надо сбросить 8000 н балласта.

§ 41. Атмосфера и ее состав

Земля окружена воздушной оболочкой — *атмосферой*. Молекулы воздуха, как и все тела, притягиваются к Земле, но не падают на нее благодаря хаотическому быстрому движению. Газы, составляющие атмосферу, распределяются в ней со все уменьшающейся по высоте плотностью в весьма толстом слое, достигающем 2—3 земных радиусов.

Вся толща атмосферы делится на тропосферу, стратосферу, мезосферу, термосферу и экзосферу.

Тропосфера — это нижний слой атмосферы высотой 10—16 км; здесь содержится 79% массы всей атмосферы. В тропосфере происходит постоянное перемешивание газов ветрами — восходящими и нисходящими потоками воздуха. Вследствие такого перемешивания газов состав атмосферы в тропосфере почти постоянный: приблизи-

тельно 78% азота, 21% кислорода и 1% других газов (в основном аргона и водорода). С высотой плотность воздуха в тропосфере и давление уменьшаются и температура понижается. Перемены, происходящие в той или иной части тропосферы, обуславливают погоду нашей планеты.

Стратосфера простирается до высоты 40 км. Здесь содержится 20% всей массы атмосферы. Из-за малой плотности воздуха и почти неизменной температуры (от -45°C до -60°C) в стратосфере практически отсутствует перемешивание газов. Условия полета воздушного транспорта в стратосфере значительно лучшие, чем в тропосфере, благодаря малому сопротивлению воздуха и отсутствию облаков, мешающих ориентации по небесным светилам.

В свою очередь нижний тонкий слой, отделяющий холодную стратосферу от тропосферы, называется *тропопаузой*. В верхней части атмосферы, начиная с высот порядка 40 км, температура с высотой быстро растет; эту часть атмосферы называют *мезосферой*.

За мезосферой находится *термосфера*. В этой части атмосферы с высотой температура быстро растет. Этот слой атмосферы сильно ионизирован, а поэтому его еще называют *ионосферой*. В термосфере содержится менее 0,5% массы атмосферы.

За ионосферой расположена *экзосфера*, которая переходит в межпланетную среду.

§ 42. Атмосферное давление и приборы для его измерения

Впервые атмосферное давление было измерено в XVII в. итальянским ученым Торричелли. Опыт Торричелли состоял в следующем. Он взял метровую стеклянную трубку, запаянную с одного конца, и наполнил ее ртутью. Отверстие трубки закрыл пальцем, чтобы ртуть не выливалась, и трубку опустил отверстием вниз в чашку со ртутью. Затем палец отпустил, и часть ртути из трубки вылилась; над поверхностью ртути образовалось безвоздушное пространство, называемое *торричеллиевой пустотой*.

Вытекание ртути из трубки прекращалось тогда, когда давление на поверхности ртути в чашке (атмосферное давление) уравновешивалось давлением оставшегося столбика ртути в трубке. Следовательно, атмосферное давление измеряется давлением столбика ртути в трубке Торричелли.

Опыты показали, что атмосферное давление на разных высотах над уровнем моря различное. На одной и той же высоте со временем оно несколько изменяется.

За нормальное атмосферное давление условились принимать давление столбика ртути высотой 76 см при 0°C . Такое давление на практике принято за единицу давления и названо *физической атмосферой*

(атм). Согласно формуле давления жидкости на глубине $p = \rho gh$,
 $1 \text{ атм} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 9,8 \text{ м/сек}^2 \cdot 0,76 \text{ м} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$.
 В технике за единицу давления обычно принимают *техническую атмосферу*: $1 \text{ ат} = 1 \text{ кг/см}^2 = 9,8 \cdot 10^4 \text{ н/м}^2$.

Атмосферное давление тесно связано с другими явлениями, определяющими погоду, поэтому его измеряют для предсказания погоды и для других целей. Приборы, служащие для измерения атмосферного давления, называются *барометрами*. Простейшим барометром является трубка Торричелли (последней придают разные формы, облегчающие точный отсчет высоты столбика ртути).

Металлический барометр называют *анероидом*. Он состоит из коробки с гофрированной крышкой, из которой выкачан воздух, и приспособления, которое связывает крышку коробки со стрелкой, фиксирующей изменение давления над ней. Барометр, стрелка которого снабжена приспособлением для записи показаний давления, называется *барографом*.

При подъеме до высоты 600 м через каждые 10,5 м давление понижается на 1 мм рт. ст. По понижению давления с высотой можно судить о высоте подъема. Барометры, на шкале которых вместо миллиметров ртутного столба нанесены показания в метрах высоты подъема, называются *высотомерами*, или *альтиметрами*.

Приборы, предназначенные для измерения давления в закрытых сосудах, называются *манометрами*.

Различают жидкостные и металлические манометры. В свою очередь жидкостные манометры бывают открытые и закрытые. Открытый жидкостный манометр представляет собой сообщающиеся сосуды, наполненные до определенного уровня однородной жидкостью. Один конец их соединен с сосудом, в котором измеряется давление пара или газа. По разности уровней жидкости в сообщающихся сосудах можно судить об измеряемом давлении. Манометры показывают, на какую величину давление в сосуде больше (или меньше) атмосферного. Если в коленах манометра находится не ртуть, то давление

пересчитывается по формуле $h = \frac{\rho_1 h_1}{\rho}$, где ρ_1 — плотность жидкости в манометре, h_1 — высота столба этой жидкости, а ρ и h — те же величины для ртути.

Закрытый жидкостный манометр тоже представляет собой сообщающиеся сосуды, один конец которых запаян. Шкала закрытого жидкостного манометра рассчитывается по закону Бойля — Мариотта.

Жидкостные манометры применяются для измерения малых давлений. Для измерения больших давлений пользуются металлическими манометрами. Главной частью металлического манометра является дугообразная упругая полая трубка, запаянная с одного конца. Открытый конец трубки прикреплен к корпусу манометра; он соеди-

няется с сосудом, в котором измеряется давление. При увеличении давления в трубке последняя выпрямляется (тем больше, чем выше давление). К запаянному концу трубки при помощи рычагов присоединена стрелка, перемещающаяся над проградуированной шкалой.

Задача 1. Показание барометра-анероида $p = 750$ мм рт. ст. Какое давление будет показывать анероид, установленный под колоколом (с последним соединен жидкостный манометр), если из-под колокола откачать воздух так, чтобы манометр показывал давление $p_1 = 70$ мм рт. ст.?

Решение. Атмосферное давление в данном опыте уравновешивается давлением столбика ртути p_1 и давлением воздуха p_2 под колоколом, т. е. $p = p_1 + p_2$. Отсюда $p_2 = p - p_1 = (750 - 70)$ мм рт. ст. = 680 мм рт. ст.

Ответ. Анероид покажет 680 мм рт. ст.

Задача 2. Манометр показывает давление в котле $p_1 = 1$ ат, а барометр-анероид — давление $p_2 = 760$ мм рт. ст. Какое давление производит пар на стенки котла?

Решение. Давление пара на стенки котла больше атмосферного на 1 ат. Следовательно, $p = p_1 + p_2 = 9,8 \cdot 10^4$ н/м² + $10,13 \times 10^4$ н/м² = $19,9 \cdot 10^4$ н/м².

Ответ. Давление пара на стенки котла равно $19,9 \cdot 10^4$ н/м².

Примечание. В приведенных задачах и в последующем давление дается не только в единицах СИ потому, что применяемые на практике приборы имеют шкалы, проградуированные в миллиметрах ртутного столба или в атмосферах.

§ 43. Движение жидкости и газа

При относительном движении слоев жидкости (или газа) между ними возникают силы, замедляющие движение одних слоев и ускоряющие движение других слоев. Сила, с которой один слой жидкости или газа действует на другой, называется *силой внутреннего трения*, или *силой вязкости*. В зависимости от величины силы внутреннего трения вещества подразделяют на более вязкие и менее вязкие.

Жидкость (газ) препятствует движению тел в них. Сила, препятствующая движению тела в жидкости (газе), называется *силой сопротивления*. Сила сопротивления зависит от формы тела, площади лобового сечения, скорости движения и рода жидкости (газа), в которой движется тело. В воздухе, в частности, силу сопротивления называют *аэродинамическим сопротивлением*.

До определенной скорости (так называемой критической) слои жидкости скользят друг по другу, т. е. относительное движение слоев текущей жидкости (газа) не нарушается. Такое течение называется *слоистым*, или *ламинарным*. Когда скорость течения превос-

ходит критическую, взаимное действие скользящих слоев изменяет относительное расположение частиц жидкости (газа); возникают завихрения. Такое движение называется *вихревым*, или *турбулентным*.

Если труба, по которой течет жидкость, не имеет ответвлений, то количество жидкости, проходящее через любое сечение трубы, одинаково; в противном случае при длительном течении в одних местах жидкость скапливалась бы, а в других происходил бы разрыв потока. Исходя из этого, при отсутствии трения объем жидкости, протекающей за единицу времени в одном месте, $v_1 S_1$ равен объему жидкости, протекающей за единицу времени в другом месте, $v_2 S_2$, т. е. $v_1 S_1 = v_2 S_2$. Течение, удовлетворяющее данному условию, называется *стационарным*. Отсюда следует, что при стационарном течении скорость движущихся частиц жидкости обратно пропорциональна площади сечения трубы.

Все изложенное выше относится в равной мере и к жидкостям, и к газам.

В текущей жидкости различают статическое и динамическое давление. *Статическое давление* — это давление, которое оказывает неподвижная жидкость на стенки трубки, *динамическое давление* обуславливается скоростью течения жидкости. Сумма статического и динамического давления называется *полным давлением*. Естественно, что статическое давление равно полному давлению при скорости жидкости, равной нулю; его измеряют манометром. При переходе из узкой части трубки в широкую жидкость тормозит свое движение, как бы наталкиваясь на преграду, и поэтому степень сжатия ее увеличивается. Наоборот, при переходе жидкости из широкой части в узкую увеличивается скорость и сжатие уменьшается.

Давление жидкости, текущей по трубе, больше там, где ее скорость меньше. Эта зависимость между скоростью жидкости и ее давлением называется *законом Бернулли*.

Сужение трубки в каком-либо месте сечения приводит к увеличению скорости протекающей жидкости, а значит и к уменьшению давления. Появляется всасывающая сила струи, используемая в пульверизаторе, карбюраторе, диффузионном насосе и других устройствах.

Рассмотрим теперь, как образуется подъемная сила крыла самолета. Направление результирующей силы со стороны потока на крыло зависит от формы последнего и от его ориентировки в потоке. Форма

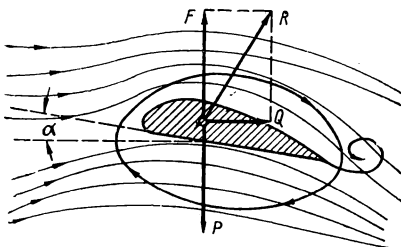


Рис. 37.

профиля крыла самолета, приведенная на рис. 37, является наиболее обтекаемой.

Для возникновения подъемной силы при полете крыло самолета должно быть расположено таким образом, чтобы образовывался некоторый угол между плоскостью крыла и направлением потока (от $1-1,5^\circ$ при полете и до 15° при посадке). Равнодействующая R сил давления и трения направлена под углом к крылу. Ее составляющие Q и F представляют собой соответственно лобовое сопротивление и подъемную силу.

Как показывают теория и опыт, подъемная сила в большей мере обусловлена пониженным давлением над крылом, чем повышенным

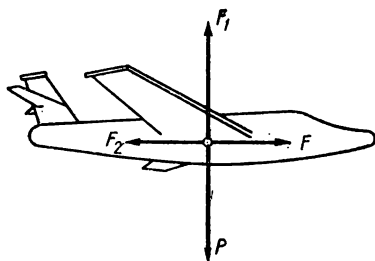


Рис. 38.

под крылом. Пониженное давление над крылом обусловлено появлением циркуляционного потока вокруг него при критической скорости. Направление циркуляционного потока совпадает с направлением встречного потока над крылом и противоположно встречному потоку под крылом. Вследствие этого возникает всасывающее действие крыла в область пониженного давления (в соответствии с законом Бернулли).

При полете на самолет действуют следующие силы (рис. 38):

F_1 — подъемная сила, преодолевающая вес P , и сила тяги винта F , преодолевающая силу лобового сопротивления F_2 .

Движущаяся жидкость (газ) обладает кинетической энергией. На гидроэлектростанциях энергия движущейся воды превращается в электрическую энергию. Гидроресурсы СССР, по приблизительным данным, исчисляются примерно в 450 млн. *квт* (3942 млрд. *квт·ч* ежегодно). Энергия ветра в последние годы также используется для нужд сельского хозяйства и промышленности.

Задача. Вода течет в горизонтально расположенной трубе переменного сечения. Скорость течения в широкой части трубы $v = 0,4$ м/сек. Определить скорость течения воды в узкой части трубы, диаметр которой в 1,5 раза меньше.

Решение. Скорость течения воды в узкой части трубы можно определить из условия стационарности течения:

$$vS = v_1 S_1, \quad \text{откуда } v_1 = \frac{vS}{S_1}.$$

Выражая площади поперечного сечения трубы через их диаметры, получим

$$v_1 = \frac{v \pi d^2 \cdot 4}{4 \pi d_1^2} = \left(\frac{d}{d_1} \right)^2 v; \quad v_1 = 0,9 \text{ м/сек.}$$

Ответ. В узкой части трубы скорость течения воды равна 0,9 м/сек.

Контрольные вопросы к главе «Механика жидкостей и газов»

- 1) Что называется давлением и в каких единицах оно измеряется?
- 2) Как передают жидкости (газы) производимое на них давление?
- 3) Если ружейная пуля попадает в сырое яйцо, то оно разлетается, если же в вареное, то пуля делает в нем отверстие. Почему?
- 4) Зависит ли давление жидкости на различные участки поверхности тела, находящегося на одной и той же глубине, от ориентации этих участков?
- 5) От каких величин зависит давление жидкости на дно сосуда? сила давления на дно сосуда?
- 6) Как объяснить тот факт, что давление жидкости на дно сосуда не зависит от формы сосуда?
- 7) Каковы условия равновесия разнородных жидкостей в сообщающихся сосудах?
- 8) В чем состоит закон Архимеда?
- 9) Чему равна сила, с которой погруженное тело действует на жидкость?
- 10) Какие положения могут принимать тела, погруженные в жидкости, в зависимости от их веса и веса вытесненной ими жидкости?
- 11) Каково условие плавания тела на поверхности жидкости?
- 12) Почему нельзя горящий керосин гасить водой?
- 13) Как изменится глубина погружения плавающего тела, если изменить плотность жидкости, в которую оно погружено?
- 14) На основании каких явлений можно утверждать, что существует атмосферное давление?
- 15) Какими приборами измеряется атмосферное давление? Каково их устройство?
- 16) Почему высота ртутного столба в барометрической трубке не зависит от ее внутреннего диаметра?
- 17) Почему при отклонении барометрической трубки от вертикального положения ртуть входит в трубку?

18) Как определить силу атмосферного давления на любую площадь?

19) Как изменяется атмосферное давление при удалении от поверхности Земли?

20) Каково устройство и назначение манометров и как пользуются ими?

21) Какие существуют виды течения жидкости?

22) В чем состоит причина сопротивления, которое испытывают тела при движении в жидкости или газе?

23) В каких движениях будет участвовать парашютист, если он совершит затяжной прыжок с большой высоты?

24) Где статическое давление выше — там, где скорость течения больше, или там, где она меньше?

25) В каком случае самолет пробегает при взлете более длинный путь: если разбег происходит по ветру или против ветра?

26) Что называется подъемной силой и чем она обусловлена?

Вопросы и задачи к главе «Механика жидкостей и газов»

134. Может ли уровень воды в фонтане достигнуть уровня воды в сосуде, питающем фонтан? Если нет, то почему?

135. Столб воды в сообщающихся сосудах равен 40 см, а уравновешивающий его столб другой жидкости 50 см. Укажите, какая это жидкость.

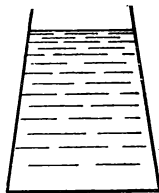
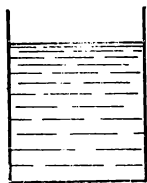


Рис. 39.

136. В цилиндрический сосуд налиты ртуть и вода в одинаковых по весу количествах. Общая высота двух слоев жидкости $H = 29,2$ см. Определить давление жидкости на дно сосуда. Плотность ртути $\rho = 13,6$ г/см³, воды $\rho_1 = 1$ г/см³.

137. Два сосуда различной формы (рис. 39), но одного и того же веса имеют равные площади оснований. В сосуды налиты одинаковые объемы воды. В каком из сосудов вода с большей силой давит на дно? Чему равна сила давления сосудов с жидкостью на стол?

138. Гидравлический пресс (площадь поверхности малого поршня $S_1 = 100$ см², а большого $S_2 = 2000$ см²) поднимает автомашину весом $P = 20\,000$ н. Сколько ходов совершает малый поршень за $t = 1$ мин, если за один ход он опускается на $h_1 = 25$ см? Мощность двигателя пресса $N = 0,5$ кВт, к. п. д. $\eta = 75\%$.

139. Почему в реке с илистым дном мы больше вязнем на мелком месте, чем на глубоком?

140. При точном взвешивании нужно вводить поправку на «потерю» веса в воздухе. Из какого материала следует сделать гири, чтобы при точном взвешивании не вводить эту поправку?

141. На дне сосуда с жидкостью лежит тело, плотность которого немного больше плотности жидкости. Можно ли, повышая давление на жидкость, заставить тело подняться вверх?

142. Определить наименьшую площадь S плоской льдины толщиной $h = 50$ см, способной удержать на воде человека весом $P = 750$ н. Плотность льда $\rho = 0,9 \cdot 10^3$ кг/м³, воды $\rho_1 = 10^3$ кг/м³.

143. При углублении дна реки грунт вывозят на барже в море. При переходе баржи из реки в море ее осадка уменьшилась на $h = 5$ см, а при обратном переходе — увеличилась на $h_0 = 1$ см. Сколько грунта оставила баржа в море, если ее площадь сечения $S = 1500$ м², а морская вода на 3% тяжелее речной?

144. При удалении от поверхности Земли давление изменилось на 3 мм рт. ст. Какова высота подъема?

145. Какой барометр чувствительнее — ртутный или водяной?

146. Можно ли через вертикальную трубку длиной 1 м откачать насосом из сосуда ртуть?

147. Если в трубке барометра сделать отверстие ниже уровня ртути, то будет ли через это отверстие выливаться ртуть наружу?

148. Указать, какие из движений можно считать стационарными и почему: а) течение воды в реке, б) поток людей, идущих из театра или кино, в) течение жидкости в центральной магистрали водопровода.

149. На поршень шприца производится давление с силой 10 н. С какой скоростью вытекает струя из отверстия шприца?

150. Рассчитать мощность воздушного потока, проходящего через аэродинамическую трубу, если площадь поперечного сечения трубы 1 м², скорость потока 20 м/сек, а плотность воздуха 1,29 кг/м³.

151. Космический корабль, имеющий лобовое сечение $S = 40$ м² и скорость $v = 10$ км/сек, попадает в облако микрометеоров. В 1 м³ пространства содержится один микрометеор. Масса каждого микрометеора $m_1 = 10^{-5}$ г. На сколько нужно увеличить силу тяги двигателя, чтобы скорость корабля не изменилась? Удары микрометеоров об обшивку корабля считать неупругими.

Глава VII. ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА

§ 44. Основные положения молекулярно-кинетической теории строения вещества

Молекулярная физика изучает явления, происходящие внутри макроскопических тел, т. е. она неразрывно связана с теорией строения вещества. Согласно современной науке, все вещества состоят из отдельных частиц, называемых молекулами, которые в свою очередь состоят из атомов.

Атом — это мельчайшая частица химического элемента, обладающая всеми его химическими свойствами. *Молекула* — это наименьшая частица вещества, сохраняющая его свойства и способная существовать самостоятельно.

Теория строения вещества, базирующаяся на том, что тела состоят из атомов и молекул, находящихся в непрерывном хаотическом движении, называется *молекулярно-кинетической теорией*. Основные положения молекулярно-кинетической теории были высказаны в Древней Греции. Еще Демокрит и Левкипп (VI—V в. до н. э.) учили, что все вещества построены из мельчайших частиц — атомов различных видов.

Широкое развитие атомная гипотеза получила в трудах М. В. Ломоносова, который четко изложил основы атомно-молекулярной теории строения вещества, подкрепив их опытными данными. Научные основы молекулярно-кинетической теории, заложенные Ломоносовым, получили дальнейшее развитие лишь спустя 100 лет, в середине XIX в., в работах многих выдающихся ученых (Д. Джоуля, Р. Клаузиуса, позднее Д. Максвелла, Л. Больцмана и др.). С тех пор молекулярно-кинетическая теория является основной теорией при изучении веществ, находящихся в газообразном, жидком и твердом состояниях.

Опытным подтверждением правильности молекулярно-кинетической теории вещества служат такие явления, как диффузия, броуновское движение и многие другие.

§ 45. Броуновское движение

Непосредственным доказательством непрерывного движения молекул является броуновское движение — непрерывное хаотическое движение взвешенных твердых и нерастворяемых частиц в жидкости (газе). Впервые наблюдал это явление английский ботаник Броун в 1827 г.

Опыт показывает, что чем меньше размеры частиц и чем выше температура среды, в которой они взвешены, тем больше скорость хаотического движения. Если взвешенная частица имеет большие размеры, то число ударов, получаемых ею с разных сторон, приблизительно одинаково, вследствие чего она остается неподвижной. Если же частица имеет малые размеры, число ударов в каком-либо одном направлении превышает число ударов в другом направлении, и частица перемещается то в одну, то в другую сторону. Диаметр взвешенных частиц в несколько тысяч раз больше, чем диаметр молекул.

Таким образом, броуновское движение — это движение частиц, взвешенных в жидкости или газе, обусловленное хаотическим движением молекул. Оно никогда не прекращается и не зависит от внешних причин, а является лишь проявлением движения молекул в жидкостях и газах.

§ 46. Диффузия. Движение молекул газов, жидкостей и твердых тел

Диффузией называется явление проникновения молекул одного вещества в промежутки между молекулами другого вещества. Диффузия наблюдается в газообразных, жидких и твердых веществах.

Диффузию в газах можно наблюдать на таком простом опыте. Если в каком-либо углу комнаты разбрызгать одеколон (или пустить дым из папиросы), то запах одеколона (дыма) распространится по всей комнате.

Диффузия легко обнаруживается и в жидкостях. В стакан чистой воды осторожно впустим каплю синих чернил и оставим его на некоторое время в полном покое; затем мы увидим, что вода окрасилась в однородно синий цвет.

Диффузия происходит не только в жидкостях и газах, но и в твердых телах. Для обнаружения диффузии в твердых телах провели следующий опыт. Положили две хорошо отшлифованные пластинки из золота и свинца одну на другую, причем пластинка из более плотного материала (золота) оказалась внизу. Нагрузив пластинки, оставили их на длительное время при постоянной температуре. Спустя пять лет произвели исследование, и молекулы свинца были обнаружены в пластинке золота на глубине до 1 см, а молекулы

золота — на такой же глубине в пластинке свинца. Этот опыт свидетельствует также о том, что вопреки силе тяготения молекулы более плотного вещества проникают в тело, находящееся сверху, а молекулы более легкого — в тело, находящееся снизу.

Таким образом, диффузия наблюдается в газах, жидкостях и твердых телах, но скорость ее в каждом случае различна. В газах диффузия проходит быстрее, в твердых телах — гораздо медленнее, чем в жидкостях.

Во всех телах с повышением температуры процесс диффузии ускоряется в силу возрастания скорости беспорядочного движения молекул.

Диффузия играет существенную роль в природе. Так, например, диффузия газов обеспечивает однородность атмосферы вблизи поверхности Земли. Диффузия способствует нормальному питанию растений и т. д. Явление диффузии широко используется во многих отраслях промышленности (например, для выделения сахара из свекольной стружки, при получении ядерного горючего и т. д.).

Диффузия, броуновское движение, испарение твердых и жидких тел и другие явления указывают на то, что тела состоят из молекул, находящихся в непрерывном беспорядочном движении. Неодинаковость скорости протекания диффузии в газах, жидкостях и твердых телах указывает на различие в движении атомов и молекул этих тел. Быстрое протекание диффузии в газах и заполнение газом всего объема, предоставленного ему, свидетельствует о том, что молекулы газа находятся в непрерывном поступательном движении во всех направлениях. В твердых телах диффузия протекает медленнее. Постоянство формы и объема твердых тел указывает на то, что молекулы в твердых телах проходят небольшие пути, в основном они совершают колебания вокруг своего положения равновесия. Подвижность жидкости свидетельствует о том, что по отношению к положению равновесия могут смещаться не только одиночные молекулы, но и целые группы молекул, а сравнительно большая диффузия молекул жидкости — о том, что в жидкости существует поступательное движение молекул. В жидкостях и газах возможно также вращательное движение молекул.

§ 47. Масса и размеры молекул

Число килограммов вещества, равное его молекулярному весу, называется *килограмм-молекулой*, или *киломолем*. Установлено, что киломоль любого вещества содержит одно и то же количество молекул, равное $N = 6,02 \cdot 10^{26}$ *кмоль*⁻¹ (число Авогадро). Огромное количество молекул в киломоль вещества указывает на очень малые их размеры.

Для сравнения массы атомов и молекул введены соответственно понятия «атомный вес» и «молекулярный вес». *Атомным весом* A химического элемента называется отношение массы этого элемента к $1/12$ массы атома изотопа углерода с массовым числом 12 (об изотопах и массовых числах см. в разделе «Атомная физика»). *Молекулярным весом* вещества M называется отношение массы молекулы этого вещества к $1/12$ массы атома углерода с массовым числом 12. Согласно этому определению, атомный вес углерода C^{12} равен точно 12, а, например, кислорода—15,9949, водорода—1,0080 и т. д.

Зная число Авогадро, можно подсчитать размеры молекул и их абсолютные массы. Рассмотрим это на примере. Так как киломоль (килограмм-атом) любого вещества содержит N молекул (атомов), масса одной молекулы (атома)

$$m = \frac{\mu}{N},$$

где μ — масса киломоля (килограмм-атома). Например, масса одного атома углерода C^{12}

$$m_C = \frac{12 \text{ кг}}{6,02 \cdot 10^{26}} = 2 \cdot 10^{-26} \text{ кг.}$$

Единицу массы, равную $1/12$ массы атома углерода C^{12} , называют *атомной единицей массы*. Согласно определению, атомная единица массы равна

$$\frac{1}{12} m_C = \frac{2 \cdot 10^{-26} \text{ кг}}{12} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Следовательно, масса любого атома равна $1,66 \cdot 10^{-27} \text{ А кг}$, а масса любой молекулы равна $1,66 \cdot 10^{-27} \text{ М кг}$.

Чтобы иметь представление о линейных размерах атомов, рассмотрим такой пример. 1 кмоль воды занимает приблизительно объем $V_0 = 0,018 \text{ м}^3$, значит, на долю одной молекулы приходится объем

$$V_1 = \frac{V_0}{N} = \frac{0,018 \text{ м}^3}{6,02 \cdot 10^{26}} = 3 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3.$$

Это объем не самой молекулы: он включает и пустое пространство, в котором она движется. Считая, что в жидкостях молекулы расположены «близко» друг к другу, определим приближенно линейный размер молекулы воды:

$$d \approx \sqrt[3]{3 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3} \approx 3 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

Масса молекулы воды

$$m = \frac{\mu}{N} = \frac{18 \text{ кг}}{6,02 \cdot 10^{26}} = 2,99 \cdot 10^{-26} \text{ кг.}$$

Линейные размеры атомов приблизительно составляют 10^{-8} см. Чтобы иметь представление, насколько мала эта величина, приведем следующие примеры. В 1 см^3 меди содержится столько атомов, что цепочка из них была бы длиной в 14 млрд. км, — эта величина больше чем в 90 раз превышает расстояние от Земли до Солнца.

Представление о размерах молекул дает и такой опыт. Разбавим 1 см^3 синих чернил в 1 л воды, а затем отольем отсюда 1 см^3 раствора и вновь разбавим в 1 л воды. Даже при таком разбавлении (в миллион раз) на глаз еще будет виден синеватый цвет воды.

В настоящее время только очень крупные молекулы, как, например, молекула альбумина (белок), имеющая размер $43 \cdot 10^{-8}$ см, могут быть сфотографированы при помощи электронного микроскопа.

§ 48. Взаимодействие молекул

Между молекулами любого тела на близких расстояниях действуют силы взаимного притяжения. Вследствие этого, например, трудно отделить одну часть твердого тела от другой. Расколотые части твердого тела не соединяются потому, что они не прилегают плотно одна к другой. Но если соприкасаются между собой хорошо



Рис. 40.

отполированные пластинки (например, плитки Иогансона, используемые на производстве), действие сил взаимного притяжения молекул хорошо заметно.

О существовании сил сцепления между молекулами можно судить также по тому, что для непосредственного отрывания смоченных водой и сложенных вместе стеклянных пластинок одной от другой требуется значительное усилие. Об этом свидетельствует и факт слияния двух капель жидкости при соприкосновении в одну. Силы сцепления в жидкостях, как и в твердых телах, значительны, но жидкость изменяет свою форму лишь потому, что молекулы

легко смещаются одна относительно другой; это свойство жидкостей называется *текучестью*. Сжать жидкость так же трудно, как и твердое тело. Молекулярные силы проявляются не только в притяжении, но и в отталкивании, чем объясняется сопротивление тел растяжению и сжатию. Связь между частицами в твердом теле похожа на связь, которая существует между шариками (рис. 40), соединенными при помощи пружин.

В газах молекулы удалены одна относительно другой на значительные расстояния, поэтому силы притяжения и отталкивания в них проявляются слабо.

Контрольные вопросы к главе «Основы молекулярно-кинетической теории строения вещества»

- 1) Что такое атом? Что такое молекула?
- 2) Каковы основные положения молекулярно-кинетической теории вещества?
- 3) Какими опытами подтверждается молекулярно-кинетическая теория вещества?
- 4) Каковы причины и особенности броуновского движения?
- 5) Скорость каких частиц больше — молекул жидкости или броуновских частиц? Почему?
- 6) Что называется диффузией и в каких веществах она происходит?
- 7) В чем состоит различие в движении молекул в твердых телах, жидкостях и газах?
- 8) Каковы линейные размеры молекул? Чем это подтвердить?
- 9) Что называется силами сцепления и в чем они проявляются?
- 10) Какие примеры подтверждают наличие сил притяжения и сил отталкивания между молекулами?
- 11) Чем объясняется возможность сваривания и спаивания двух металлов между собой?
- 12) Какие опыты или явления доказывают наличие пустых пространств между молекулами?

Глава VIII. РАСШИРЕНИЕ ТЕЛ ПРИ НАГРЕВАНИИ

§ 49. Линейное расширение тел при нагревании

Твердое тело имеет при данной температуре определенные форму и размеры. С изменением температуры твердых тел их форма и размеры изменяются. Обычно при нагревании твердые тела расширяются,

а при охлаждении сжимаются. Твердые тела различного химического состава при прочих одинаковых условиях по-разному изменяют свои размеры с изменением температуры.

Чтобы можно было находить линейные размеры тела при любой температуре и судить, какое из рассматриваемых тел больше (или меньше) изменяет свои линейные размеры при изменении температуры, вводится особая величина — коэффициент линейного расширения.

Обозначим длину твердого тела при 0°C через l_0 , а при температуре $t^\circ \text{C}$ — через l . Тогда $(l - l_0)$ — увеличение длины тела при нагревании на t° ; $\frac{l - l_0}{t}$ — увеличение длины тела при нагревании на 1°C ;

$\frac{l - l_0}{l_0}$ — увеличение каждой единицы длины тела при нагревании на t° . При этом предполагается, что увеличение длины при нагревании на каждый градус происходит равномерно. Отношение

$$\frac{l - l_0}{l_0 t} = \alpha$$

показывает, на сколько удлиняется каждая единица длины тела, взятого при 0°C , при нагревании на 1°C . Величина α называется *коэффициентом линейного расширения*.

Коэффициент линейного расширения для разных тел различен и определяется экспериментально.

Из формулы коэффициента линейного расширения можно найти длину тела при любой температуре:

$$l = l_0 (1 + \alpha t).$$

Двучлен $(1 + \alpha t)$, называемый биномом линейного расширения, показывает, во сколько раз изменяется длина тела, взятого при 0°C , при нагревании на t° .

Задача. Диаметр колеса паровоза при температуре $t_0 = 0^\circ \text{C}$ составляет $d_0 = 2 \text{ м}$. Определить разницу в числе оборотов колеса летом при температуре $t_1 = +35^\circ \text{C}$ и зимой при температуре $t_2 = -25^\circ \text{C}$ на пути пробега тепловоза $s = 200 \text{ км}$ ($\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$).

Решение. Число оборотов, совершаемых колесом при температурах t_1 и t_2 , соответственно равно

$$n_1 = \frac{s}{\pi d_1} \text{ и } n_2 = \frac{s}{\pi d_2}.$$

При изменении температуры меняются и все линейные размеры колеса, а поэтому

$$d_1 = d_0 (1 + \alpha t_1) \text{ и } d_2 = d_0 (1 + \alpha t_2).$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} n_2 - n_1 &= \frac{s}{\pi d_2} - \frac{s}{\pi d_1} = \frac{s}{\pi d_0} \left(\frac{1}{1 + \alpha t_2} - \frac{1}{1 + \alpha t_1} \right); \\ n_2 - n_1 &= \frac{200\,000 \text{ м}}{3,14 \cdot 2 \text{ м}} \left(\frac{1}{1 - 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 25} - \frac{1}{1 + 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 35} \right) = \\ &= \frac{100\,000}{3,14} \left(\frac{1}{0,9997} - \frac{1}{1,00042} \right) \approx 22,9 \text{ об.} \end{aligned}$$

Ответ. Зимой колесо делает на 200 км пути на 22,9 оборота больше.

§ 50. Объемное расширение тел

Для характеристики объемного расширения тел вводится *коэффициент объемного расширения*. Опыт показывает, что приращение объема тела при нагревании можно считать (как и в случае линейного расширения) пропорциональным повышению температуры.

Обозначая коэффициент объемного расширения через β , по аналогии с коэффициентом линейного расширения получим:

$$\beta = \frac{V - V_0}{V_0 t},$$

где V_0 — объем тела при 0°C , V — объем тела при $t^\circ \text{C}$. Коэффициент объемного расширения β — это величина, показывающая, на сколько увеличивается каждая единица объема тела, взятая при 0°C , при нагревании на 1°C .

Объем тела при любой температуре определяем из формулы коэффициента объемного расширения:

$$V = V_0 (1 + \beta t).$$

Пусть тело имеет форму куба, ребро которого при 0°C равно l_0 . Тогда его объем при 0°C $V_0 = l_0^3$. При нагревании куба на t° длина каждого ребра увеличится до значения l , а объем будет $V = l^3$. По-

ставляя значение длины при температуре t° в формулу объема, получим

$$V = l_0^3 (1 + \alpha t)^3 = V_0 (1 + 3\alpha t + 3\alpha^2 t^2 + \alpha^3 t^3).$$

Поскольку α — величина малая, в этой формуле величинами α^2 и α^3 можно пренебречь; тогда $V = V_0 (1 + 3\alpha t)$. Сравнивая данную формулу с формулой объема тела при любой температуре, находим

$$\beta = 3\alpha,$$

т. е. коэффициент объемного расширения твердого тела равен утроенному коэффициенту линейного расширения.

Опыт показывает, что при расширении и сжатии твердых тел возникают огромные силы, с которыми приходится считаться в технике. Так, между рельсами оставляют зазоры; один конец моста устанавливают на катки; трубы газопроводов и паропроводов в определенных местах имеют изгибы, кривизна которых при изменении температуры изменяется и т. д.

Что касается жидкостей, то целесообразно говорить лишь о коэффициенте объемного расширения. При определении коэффициента необходимо учитывать расширение сосуда, в котором жидкость содержится.

Опыт показывает также, что расширение воды отличается от расширения других жидкостей: вода имеет максимальную плотность, а значит, и наименьший объем при температуре 4°C ; при повышении или понижении температуры от 4°C плотность воды уменьшается (объем увеличивается). Этой особенностью воды объясняется тот факт, что водоемы зимой не промерзают до дна. Лишь при охлаждении до 4°C теплые слои воды поднимаются вверх, а холодные опускаются. При дальнейшем охлаждении вплоть до 0°C теплая вода опускается вниз, а более холодная перемещается вверх и, охлаждаясь, замерзает.

Задача. Для хранения нефть наливают в цилиндрическую цистерну высотой $h = 6$ м при температуре 0°C . До какого уровня можно налить нефть, чтобы при повышении температуры до $t = 30^\circ\text{C}$ она не выливалась из цистерны? Расширением цистерны пренебречь. Для нефти $\beta = 0,001 \text{ град}^{-1}$.

Решение. Обозначим высоту искомого уровня нефти при температуре 0°C через h_0 . Тогда объем нефти при 0°C будет $V_0 = Sh_0$, где S — площадь дна цистерны. При температуре $t = 30^\circ\text{C}$ $V = Sh = V_0 (1 + \beta t)$, или $Sh = Sh_0 (1 + \beta t)$. Отсюда находим

$$h_0 = \frac{h}{1 + \beta t}; \quad h = 5,8 \text{ м.}$$

Ответ. Нефть можно налить только до уровня 5,8 м.

Контрольные вопросы к главе «Расширение тел при нагревании»

- 1) Что называется коэффициентом линейного расширения? коэффициентом объемного расширения?
- 2) Каков физический смысл выражений $(V - V_0)$, $\frac{V - V_0}{t}$, $\frac{V - V_0}{V_0}$, $\frac{V - V_0}{V_0 t}$, где V_0 — объем тела при 0°C , а V — объем тела при температуре $t^\circ \text{C}$?
- 3) Каковы величины коэффициентов расширения жидких тел по сравнению с величинами коэффициентов расширения твердых тел?
- 4) Назовите примеры (из быта и техники) расширения тел при нагревании и сжатия при охлаждении.
- 5) Какова температура воды зимой на больших глубинах?
- 6) Как изменяется плотность тела при изменении его температуры?
- 7) Каковы особенности расширения воды?

Вопросы и задачи к главе «Расширение тел при нагревании»

152. Выразить плотность тела при любой температуре через плотность тела при 0°C .

153. Действие каких измерительных приборов основано на свойстве расширения тел?

154. Что произойдет с пластинками из разных металлов, скрепленными на концах между собой, если их нагреть?

155. Какое значение в природе имеет особенность теплового расширения воды?

156. Определить удлинение железного моста длиной $1,8 \text{ км}$ при изменении температуры от самой низкой зимней (-25°C) до самой высокой летней ($+35^\circ \text{C}$) ($\alpha = 0,12 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1}$).

157. Рельсы железнодорожного пути укладывали при температуре $t = 10^\circ \text{C}$. Длина каждого рельса при этом составляла $12,5 \text{ м}$. Какие зазоры на стыке двух рельсов были оставлены, если расчет производился для максимальной летней температуры $t_1 = +35^\circ \text{C}$ ($\alpha = 0,12 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1}$)?

158. В листе железа пробито круглое отверстие. Как будет изменяться площадь отверстия при нагревании листа железа? Какова площадь этого отверстия при температуре 500° , если при 0°C радиус отверстия составляет 25 см ($\alpha = 0,000012 \text{ град}^{-1}$)?

159. Часы с латунным маятником идут правильно при температуре 0°C . На сколько отстанут часы за сутки, если температура повысится до 20°C ($\alpha = 0,000019 \text{ град}^{-1}$)?

160. Если налить кипятка в стакан, изготовленный из обычного стекла, он часто лопается, а стакан, изготовленный из кварцевого стекла, остается целым. Чем это объясняется?

161. Для определения коэффициента объемного расширения глицерина в сообщающиеся сосуды налили глицерин при температуре $t_1 = 20^\circ \text{C}$, затем один из сосудов нагрели до температуры $t_2 = 100^\circ \text{C}$. Определить величину коэффициента объемного расширения глицерина, если высоты уровней в сосудах $h_1 = 50,5 \text{ см}$ и $h_2 = 52,6 \text{ см}$.

162. Объем стеклянной колбы при 0°C $V_0 = 500 \text{ см}^3$. При этой температуре в колбу до краев налили ртуть, а затем нагрели ее до температуры $t = 100^\circ \text{C}$, причем из колбы вытекло $V_1 = 7,65 \text{ см}^3$ ртути. Определить коэффициент объемного расширения ртути, если коэффициент линейного расширения стекла $\alpha = 0,000009 \text{ град}^{-1}$.

Глава IX. СВОЙСТВА ГАЗОВ

§ 51. Законы идеальных газов

В газах, жидкостях и твердых телах вид движения молекул различен. Это объясняется тем, что между молекулами вещества в различном состоянии существуют неодинаковые по величине силы притяжения и отталкивания.

В разреженных газах силами молекулярного притяжения можно пренебречь. Состояние газа характеризуется следующими величинами: массой, давлением, объемом и температурой; эти величины называются *параметрами состояния*. Обычно рассматривают зависимость между давлением, объемом и температурой при постоянной массе газа. Формулу, связывающую эти величины, называют *уравнением состояния газа*. Прежде чем вывести это уравнение, рассмотрим экспериментальные закономерности, относящиеся к случаям, когда при переходе газа из одного состояния в другое один из параметров поддерживается постоянным.

1. Зависимость давления газа от его объема (при постоянной температуре) описывается *законом Бойля — Мариотта*: для данной массы газа при постоянной температуре произведение давления на объем является величиной постоянной, т. е.

$$pV = C.$$

Значение постоянной C зависит от природы газа, его массы, температуры, единиц измерения давления и объема. График зависимости

давления данной массы газа от объема при постоянной температуре представлен на рис. 41; это равнобочная гиперболоа, называемая *изотермой*. Процессы, протекающие при постоянной температуре, называются *изотермическими*.

Для двух состояний данной массы газа при неизменной температуре выполняется соотношение

$$p_1 V_1 = p_2 V_2.$$

Отсюда можно определить один из неизвестных параметров газа, зная три других.

При давлении, близком к атмосферному, и для разреженных газов закон Бойля — Мариотта выполняется с высокой степенью точности. При высоких давлениях он не применим. Так, уже при давлении в 1000 ат наблюдается значительное отклонение от закона Бойля—Мариотта, а при давлении, например, в 15 000 ат объем газа более, чем в 16 раз, превышает тот объем, который он должен занимать согласно закону Бойля — Мариотта.

Задача. Сосуд емкостью $V_1 = 5$ л наполнен газом при давлении $p = 2$ атм. Какое количество воды войдет в сосуд, если под водой на глубине $h = 40$ м в самой низкой части его будет сделано отверстие (считать, что атмосферное давление $p_0 = 1$ атм)?

Решение. Объем вошедшей в сосуд воды $V = V_1 - V_2$. Объем газа V_2 в сосуде на глубине h определяется из формулы закона Бойля—Мариотта:

$$V_2 = \frac{p_1 V_1}{p_2},$$

где p_2 — давление газа в сосуде на глубине h . Это давление $p_2 = p_0 + \rho gh$, где ρ — плотность воды. Тогда

$$V_2 = \frac{p_1 V_1}{p_0 + \rho gh}; \quad V_2 = 0,002 \text{ м}^3 = 2 \text{ л}.$$

Следовательно, искомый объем воды $V = 5 \text{ л} - 2 \text{ л} = 3 \text{ л}$.

Ответ. В сосуд войдет 3 л воды.

2. Зависимость объема газа от его температуры (при постоянном давлении) описывается *законом Гей-Люссака*.

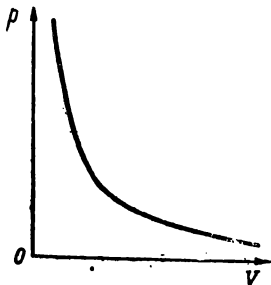


Рис. 41.

Тепловое расширение газа характеризуется коэффициентом объемного расширения

$$\beta = \frac{V - V_0}{V_0 t},$$

где V — объем газа при температуре $t^\circ \text{C}$; V_0 — объем при 0°C , а t — температура, до которой нагрет газ. Французский ученый Гей-Люссак установил, что коэффициент объемного расширения при постоянном давлении одинаков для всех газов и равен $\frac{1}{273} \text{ град}^{-1}$.

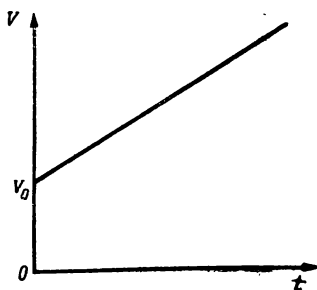


Рис. 42.

Формулу зависимости объема газа от температуры (при $p = \text{const}$) выведем из формулы коэффициента объемного расширения:

$$V = V_0 (1 + \beta t),$$

т. е. объем данной массы газа при постоянном давлении изменяется линейно с изменением температуры (закон Гей-Люссака). Вот почему графически зависимость объема от температуры представлена прямой (рис. 42), называемой *изобарой*. Процессы, протекающие при постоянном давлении, называются *изобарическими*.

Закон Гей-Люссака не выполняется для сильно сжатого газа, а также для газа, находящегося при температуре, близкой к температуре сжижения.

Задача. В вертикальной трубке, закрытой снизу, находится столбик воздуха, запертый столбиком ртути высотой $h = 30 \text{ см}$. На сколько опустится столбик ртути при изменении температуры от $t = 17^\circ \text{C}$ до $t_1 = -12^\circ \text{C}$?

Решение. Объем столбика воздуха при температуре t согласно закону Гей-Люссака $V = V_0 (1 + \beta t)$, а при температуре t_1 равен $V_1 = V_0 (1 + \beta t_1)$. Следовательно,

$$\frac{V_1}{V} = \frac{1 + \beta t_1}{1 + \beta t}.$$

Поскольку $V_1 = Sh_1$ и $V = Sh$, то $\frac{h_1}{h} = \frac{1 + \beta t_1}{1 + \beta t}$. Вычитая из левой и правой частей пропорции по единице и произведя преобразования, получим

$$\frac{h_1 - h}{h} = \frac{1 + \beta t_1 - 1 - \beta t}{1 + \beta t},$$

откуда

$$h - h_1 = h \frac{\beta(t - t_1)}{1 + \beta t}; \quad h - h_1 = 3 \text{ см.}$$

О т в е т. Столбик ртути опустится на 3 см.

3. Зависимость давления газа от его температуры (при постоянном объеме) описывается *законом Шарля*.

Величина, показывающая, на какую часть увеличивается первоначальное давление газа, находящегося при температуре 0°C , при нагревании на 1°C при постоянном объеме, называется *термическим коэффициентом давления*. Согласно определению, термический коэффициент давления

$$\gamma = \frac{p - p_0}{p_0 t},$$

где p — давление газа при температуре $t^\circ \text{C}$, а p_0 — при 0°C .

Французский ученый Шарль установил, что *термический коэффициент давления при постоянном объеме для всех газов одинаков и равен коэффициенту объемного расширения при постоянном давлении* $\gamma = \beta = \frac{1}{273}^\circ \text{град}^{-1}$.

Формулу зависимости давления газа от температуры (при $V = \text{const}$) находим из формулы термического коэффициента давления:

$$p = p_0 (1 + \gamma t),$$

т. е. *давление данной массы газа при постоянном объеме изменяется линейно с изменением температуры* (закон Шарля). График зависимости давления от температуры, представленный на рис. 43, называется *изохорой*. Процессы, протекающие при постоянном объеме, называются *изохорическими*.

Точные измерения коэффициента объемного расширения газа и термического коэффициента давления показали, что между ними существуют некоторые различия, но они настолько незначительны, что их учитывают лишь при весьма точных расчетах.

Закон Шарля также является приближенным законом: он справедлив при не слишком низких температурах и невысоких давлениях, т. е. при тех же условиях, что и закон Гей-Люссака.

Газ, который точно подчиняется законам Бойля — Мариотта, Гей-Люссака и Шарля, называется *идеальным газом*. Правда, свой-

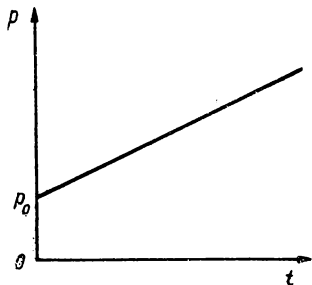


Рис. 43.

ства такого идеального газа являются лишь более или менее точным приближением к свойствам реального газа.

Задача. Давление в сосуде при температуре 0°C (по манометру) равно 2 ат . Какое давление будет показывать манометр при температуре $t = 100^\circ\text{C}$? Расширением сосуда при нагревании пренебречь.

Решение. Давление газа в сосуде при температуре 0°C больше показания манометра на величину атмосферного давления, т. е. $p_0 = 2 \cdot 9,8 \cdot 10^4\text{ н/м}^2 + 10,13 \cdot 10^4\text{ н/м}^2 = 29,73 \cdot 10^4\text{ н/м}^2$. Давление газа в сосуде при температуре 100°C находим по закону Шарля:

$$p = p_0 (1 + \gamma t); \quad p = 40,62 \cdot 10^4\text{ н/м}^2.$$

Следовательно, показание манометра при 100°C будет $40,62 \times 10^4\text{ н/м}^2 - 10,13 \cdot 10^4\text{ н/м}^2 = 30,49 \cdot 10^4\text{ н/м}^2 = 3,1\text{ ат}$.

Ответ. Манометр будет показывать давление $3,1\text{ ат}$.

§ 52. Абсолютная шкала температур

Как указывалось раньше, зависимость давления газа от температуры (при постоянном объеме) является линейной, т. е. $p = p_0 (1 + \gamma t)$. Из этой формулы следует, что с понижением температуры давление уменьшается, и при некоторой температуре оно должно было бы равняться нулю ($p = 0$, или $p_0 (1 + \gamma t) = 0$). Но поскольку $p_0 \neq 0$, то $1 + \gamma t = 0$. Отсюда находим, что

$$t = -\frac{1}{\gamma} = -273^\circ\text{C}.$$

Формулы зависимости давления и объема газа от температуры упрощаются, если установить новую термодинамическую шкалу, в которой за нуль (начало отсчета) принята температура -273°C . Точка -273°C называется *абсолютным нулем температуры*, а шкала, в которой ведется отсчет от абсолютного нуля, и цена градуса этой шкалы такая же, как и шкалы Цельсия, называется *абсолютной температурной шкалой*, или *шкалой Кельвина*.

В действительности абсолютный нуль несколько ниже, чем получается из закона Шарля. За абсолютный нуль принимается температура $-273,16^\circ\text{C}$. В настоящее время достигают температур выше абсолютного нуля на $0,0044^\circ\text{C}$.

Соотношение между шкалой Цельсия и абсолютной шкалой следующее: $T = 273 + t$.

Абсолютный нуль установлен в предположении, что при этой температуре прекращается поступательное движение молекул. Это вовсе не значит, что прекращается всякое движение: движение других частиц, из которых состоят молекулы, сохраняется.

§ 53. Уравнение состояния газа

Пусть зависимость давления газа от объема для данной массы газа при двух различных температурах (0°C и $t^\circ \text{C}$) представлена графиками (рис. 44). Рассмотрим газ, находящийся в некотором состоянии, изображенном на графике (p, V)-диаграммы точкой 1. Параметры этого состояния p, V, t . Затем охладим газ до температуры 0°C , не изменяя давления; получим новое состояние 2, характеризующееся параметрами $p, V'_0, 0^\circ \text{C}$. После этого, поддерживая температуру постоянной, дадим возможность газу расширяться (газ в начале опыта имел давление выше атмосферного) до нормального давления. Объем газа после расширения обозначим через V_0 . Полученное состояние газа 3 характеризуется параметрами $p_0, V_0, 0^\circ \text{C}$.

При переходе от состояния 1 к состоянию 2 выполняется закон Гей-Люссака: $V = V'_0(1 + \beta t)$, а при переходе из состояния 2 в состояние 3 — закон Бойля — Мариотта: $pV'_0 = p_0V_0$. Перемножив почленно полученные равенства, получим:

$$pV'_0V = p_0V_0V'_0(1 + \beta t),$$

или

$$pV = p_0V_0(1 + \beta t) = p_0V_0 \frac{273 + t}{273} = \frac{p_0V_0T}{T_0}.$$

Это равенство можно представить в виде

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0V_0}{T_0},$$

т. е. для данной массы газа произведение давления на объем, деленное на абсолютную температуру, является постоянным. Это уравнение впервые получено Б. Клапейроном; оно является математиче-

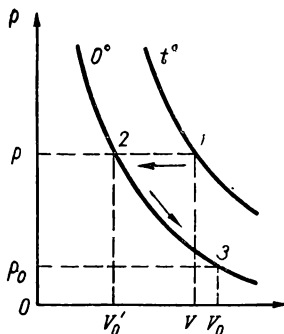


Рис. 44.

ским выражением *объединенного закона Бойля — Мариотта и Гей-Люссака, или уравнением состояния газа.*

Задача 1. От компрессора по шлангу, площадь сечения канала которого $S = 2 \text{ см}^2$, движется воздух при давлении $p = 5 \text{ атм}$ и температуре $t = 27^\circ \text{С}$. Найти скорость движения воздуха в шланге, если за время $t = 3 \text{ мин}$ протекает $m = 640 \text{ г}$ воздуха. Плотность воздуха при нормальных условиях $\rho_0 = 1,29 \text{ кг/м}^3$.

Решение. Скорость движения воздуха в шланге определяется из формулы для объема воздуха, протекающего по шлангу:

$$V = vtS,$$

где v — скорость воздуха в шланге; t — время движения воздуха; S — площадь поперечного сечения шланга. Подставив значение объема в уравнение состояния газа и заменив V_0 на $\frac{m}{\rho_0}$, получим:

$$\frac{pvtS}{T} = \frac{p_0 m}{T_0 \rho_0},$$

откуда

$$v = \frac{p_0 m T}{p t S \rho_0 T_0}; \quad v = 3 \text{ м/сек.}$$

Ответ. Воздух движется в шланге со скоростью 3 м/сек.

Задача 2. Баллон содержит газ при температуре $t = 27^\circ \text{С}$ и давлении $p = 4 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$. Каково будет давление, если из баллона выпустить половину массы газа, а температуру понизить до $t_1 = 12^\circ \text{С}$?

Решение. Уравнение состояния для всей массы газа

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0},$$

а для оставшейся массы газа

$$\frac{p_1 V}{T_1} = \frac{p_0 V'_0}{T_0}.$$

Учитывая, что $V_0 = 2V'_0$ (поскольку при нормальных условиях объем газа пропорционален его массе), получим

$$\frac{p}{T} = \frac{2p_1}{T_1}.$$

Отсюда находим

$$p_1 = \frac{pT_1}{2T}; \quad p_1 = 1,9 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2.$$

Отв. Давление в баллоне будет $1,9 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$.

Контрольные вопросы к главе «Свойства газов»

- 1) В чем состоит закон Бойля — Мариотта?
- 2) В чем состоит закон Гей-Люссака?
- 3) В чем состоит закон Шарля?
- 4) Каков физический смысл двучлена $(1 + \beta t)$, где β — коэффициент объемного расширения?
- 5) Какой газ называется идеальным?
- 6) Что называется температурным коэффициентом давления?
- 7) Что такое абсолютная температура и какова ее связь с температурой Цельсия?
- 8) Что выражает изотерма? изохора? изобара?
- 9) Какова связь между давлением, объемом и температурой газа?
- 10) Выведите уравнение состояния газа.

Вопросы и задачи к главе «Свойства газов»

163. Как зависит объем и давление газа от его абсолютной температуры?

164. Какая существует связь между давлением, температурой и плотностью газа?

165. Два баллона соединены трубкой с краном. В первом баллоне газ находится под давлением $p_1 = 16 \text{ ат}$, во втором — $p_2 = 12 \text{ ат}$. Емкость первого баллона $V_1 = 20 \text{ л}$, второго $V_2 = 60 \text{ л}$. Какое давление установится в баллонах, если открыть кран? Температура газа постоянна. Объемом соединяющей трубки пренебречь.

166. Объем пузырька воздуха при всплывании со дна озера на поверхность увеличивается в три раза. Какова глубина озера?

167. В стеклянной трубке, запаянной с одного конца, находится столбик воздуха, запертый столбиком ртути длиной $h = 150 \text{ мм}$. Если трубку держать вертикально открытым концом вверх, длина воздушного столбика $l = 4 \text{ см}$. Если же трубку держать открытым концом вниз, то длина воздушного столбика $l_1 = 6 \text{ см}$. Чему равно атмосферное давление?

168. В цилиндре под поршнем находится некоторое количество горючей смеси. После сгорания горючей смеси температура в цилиндре

повысилась до $t = 546^\circ \text{C}$, а расстояние между поршнем и дном цилиндра увеличилось до $h = 45 \text{ см}$. На сколько переместился поршень при охлаждении газа в цилиндре до $t_1 = 91^\circ \text{C}$? Весом поршня и его трением о стенки цилиндра пренебречь.

169. В вертикальном цилиндре при температуре $t = 27^\circ \text{C}$ под поршнем находится газ. Вес поршня с лежащими на нем гирями $P = 97 \text{ н}$, площадь поршня $S = 20 \text{ см}^2$, а атмосферное давление $p = 10,15 \cdot 10^4 \text{ н/м}^2$. Какой общий груз нужно снять с поршня, чтобы при медленном охлаждении цилиндра до 0°C поршень остался на месте?

170. Баллон был наполнен кислородом при температуре $t_1 = 27^\circ \text{C}$ и давлении $p = 5 \text{ ат}$ (по манометру). Каково будет показание манометра при температуре $t_2 = -23^\circ \text{C}$? Атмосферное давление в обоих случаях считать одинаковым и равным $p' = 1 \text{ ат}$.

171. Построить изотерму для $pV = 12 \text{ ат} \cdot \text{см}^3$.

172. Найти зависимость плотности газа от давления при постоянной температуре.

173. Каков физический смысл выражений $(p - p_0)$, $\frac{p - p_0}{t}$, $\frac{p - p_0}{p_0}$, $\frac{p - p_0}{p_0 t}$, где p_0 — давление газа при температуре 0°C , p — давление газа при температуре t (при постоянном объеме)?

174. Какое количество газа необходимо взять, чтобы отношение $\frac{pV}{T}$ было одинаковым для любого газа?

175. Показать, что законы Бойля — Мариотта, Гей-Люссака и Шарля являются частными случаями уравнения состояния газа.

176. Баллон, содержащий $m = 20 \text{ кг}$ углекислого газа, во время испытания взорвался при температуре $t = 386^\circ \text{C}$. Какое количество водорода можно хранить в таком баллоне при $t_1 = 27^\circ \text{C}$, имея пятикратный запас прочности? Расширением баллона при нагревании пренебречь. Для углекислого газа $\rho_0 = 1,98 \text{ кг/м}^3$, для водорода $\rho'_0 = 0,09 \text{ кг/м}^3$.

177. Баллон объемом 20 л содержит сжатый кислород при температуре $t = 27^\circ \text{C}$ и давлении $p = 7,5 \cdot 10^6 \text{ н/м}^2$. Какая масса кислорода израсходована во время газосварки, если давление в баллоне стало равным $p_1 = 5,9 \cdot 10^6 \text{ н/м}^2$, а температура понизилась до $t_1 = 22^\circ \text{C}$? Плотность кислорода $\rho_0 = 1,43 \text{ кг/м}^3$.

178. Давление ртутных паров при температуре $t = 60^\circ \text{C}$ $p = 0,025 \text{ мм рт. ст.}$. Вычислить плотность паров при этой температуре.

179. Какое количество молекул газа должно находиться в объеме $V = 1 \text{ м}^3$, чтобы при температуре $t = 27^\circ \text{C}$ давление газа на стенки сосуда равнялось $p = 1 \text{ н/м}^2$?

Глава X. ТЕПЛОТА

§ 54. Количество теплоты, необходимое для нагревания тела

Тела состоят из молекул, которые между собой взаимодействуют и непрерывно двигаются. Кинетическая энергия хаотического движения молекул вместе с их потенциальной энергией составляет внутреннюю энергию тела.

Передача энергии от одного тела к другому может происходить как путем совершения работы одного тела над другим, так и посредством теплопередачи. *Теплопередачей* называется процесс изменения внутренней энергии тела без совершения работы. Мерой энергии, излучаемой или отдаваемой телом в процессе теплопередачи, служит особая величина, называемая *количеством теплоты*. В системе СИ единица количества теплоты та же, что и для работы, т. е. джоуль.

Существуют три способа передачи теплоты от одних тел к другим: теплопроводность, конвекция и лучеиспускание. При *теплопроводности* теплота передается от слоя к слою тела. В случае *конвекции* теплота передается с одновременным перемещением слоев жидкости или газа от слоев с более высокой температурой к слоям с более низкой температурой, т. е. теплота передается с одновременным перемещением частиц — атомов или молекул. Конвекция может происходить лишь в жидкостях и газах. Наконец, при *лучеиспускании* (излучении) теплота передается лучами. Этот способ передачи теплоты может осуществляться и через безвоздушное пространство. Так, вся энергия, получаемая Землей от Солнца, передается путем лучеиспускания.

Количество теплоты, необходимое для нагревания тела, как показывает опыт, пропорционально массе тела m и изменению температуры $\Delta t = t_2 - t_1$, на которую нагревается тело, т. е.

$$Q = cm(t_2 - t_1).$$

Здесь t_1 — начальная температура тела; t_2 — конечная температура; c — удельная теплоемкость вещества, различная для разных веществ. *Удельная теплоемкость* численно равна количеству теплоты, необходимой для нагревания единицы массы вещества на 1°C . Удельная теплоемкость в системе СИ измеряется в $\text{дж/кг} \cdot \text{град}$.

Величина cm называется *теплоемкостью* тела; она численно равна количеству теплоты, которое надо сообщить телу, чтобы повысить его температуру на 1°C .

§ 55. Измерение удельной теплоемкости твердого тела

Удельную теплоемкость твердого тела можно определить различными способами. Наиболее простым из них является следующий. Нагреваем тело до определенной температуры и опускаем его в калориметр с водой известной массы и температуры. Между телом, водой и калориметром с мешалкой происходит теплообмен. Для этой системы на основе закона сохранения энергии составляем уравнение теплового баланса, из которого и определяем удельную теплоемкость твердого тела.

В этом случае уравнение теплового баланса имеет следующий вид: $Q = Q_1 + Q_2$, или $cm(t - \theta) = c_1m_1(\theta - t_1) + c_2m_2(\theta - t_1)$, где Q — количество теплоты, отданной исследуемым телом при его охлаждении; Q_1 — количество теплоты, полученной калориметром с мешалкой; Q_2 — количество теплоты, полученной водой, находящейся в калориметре; m , m_1 и m_2 — соответственно массы твердого тела, калориметра с мешалкой и воды; c , c_1 и c_2 — их удельные теплоемкости; t — температура исследуемого твердого тела; t_1 — начальная температура калориметра и воды в нем; θ — установившаяся температура калориметра с мешалкой, воды и тела. Из полученного уравнения и определяется удельная теплоемкость твердого тела

$$c = \frac{c_1m_1(\theta - t_1) + c_2m_2(\theta - t_1)}{m(t - \theta)}.$$

Примечание. При точных измерениях удельной теплоемкости твердого тела необходимо учитывать тепло, уходящее в окружающую среду.

§ 56. Теплотворность топлива

Теплотворностью топлива называется величина, численно равная количеству теплоты, выделяемой 1 кг топлива при полном сгорании. Количество теплоты, выделяемой при сгорании m килограммов топлива с теплотворностью q ,

$$Q = mq.$$

Из последней формулы следует, что теплотворность топлива q в системе СИ измеряется в джоулях на килограмм (дж/кг). Отношение количества теплоты, полезно затраченной на нагревание исследуемого тела, к количеству теплоты, выделенной при сгорании топлива, называется *коэффициентом полезного действия нагревателя*:

$$\eta = \frac{Q_1}{Q} = \frac{cm_1 \Delta t}{mq},$$

где c — удельная теплоемкость нагреваемого тела; m_1 — его масса; Δt — изменение температуры тела при нагревании; m — масса топлива; q — теплотворность топлива.

Задача. Автомобиль «Волга» имеет четырехцилиндровый двигатель мощностью $N = 52 \text{ кВт}$. Определить к. п. д. двигателя, если при скорости движения $v = 120 \text{ км/ч}$ на пути $s = 100 \text{ км}$ расходует $V = 15 \text{ л}$ бензина. Теплотворность бензина $q = 46 \text{ Мдж/кг}$; плотность бензина $\rho = 700 \text{ кг/м}^3$.

Решение. К. п. д. двигателя автомобиля

$$\eta = \frac{Nt}{qm},$$

где t — время движения, равное $\frac{s}{v}$; m — масса бензина, равная ρV ; тогда

$$\eta = \frac{Ns}{\rho V v q}; \quad \eta = 0,32, \text{ или } \eta = 32\%.$$

О т в е т. К. п. д. двигателя равен 32%.

§ 57. Плавление тел

Явление перехода вещества из твердого состояния в жидкое называется *плавлением*, а явление перехода вещества из жидкого состояния в твердое — *затвердеванием*.

Для каждого кристаллического вещества при определенном внешнем давлении существует определенная температура плавления, которая является также температурой затвердевания. Аморфные тела, в отличие от кристаллических, не имеют определенной температуры плавления; они переходят в жидкое состояние, постепенно размягчаясь. Так же происходит и процесс затвердевания аморфного тела. При плавлении происходит разрушение пространственной решетки кристалла, на что расходуется энергия. Количество теплоты, идущей на превращение твердого тела в жидкое при температуре плавления, называется *теплотой плавления*.

Теплота плавления определяется по формуле

$$Q = \lambda m,$$

где λ — различный для разных веществ коэффициент пропорциональности, называемый *удельной теплотой плавления*. Удельная теплота плавления численно равна количеству теплоты, необходимой для плавления единицы массы вещества при температуре плавления. Удельная теплота плавления в системе СИ измеряется в джоулях на килограмм (дж/кг).

Рассмотрим, как экспериментально определяется удельная теплота плавления льда. Лед, взятый при температуре 0°C , массой m , опускают в нагретую до температуры t воду массой m_1 , в калориметре массой m_2 . После того как лед расплавится, установится некоторая температура воды θ . Пренебрегая теплотой, идущей в окружающую среду, составим уравнение теплового баланса:

$$Q + Q_1 = Q_2 + Q_3,$$

где Q — количество теплоты, идущей на плавление льда; Q_1 — количество теплоты, идущей на нагревание воды, полученной из льда; Q_2 — количество теплоты, отданное нагретой водой, находящейся в калориметре; Q_3 — количество теплоты, отданное калориметром с мешалкой. Выражая количества теплоты через удельные теплоемкости веществ, их массы и температуры, получим:

$$\lambda m + c_1 m (\theta - t_0) = c_1 m_1 (t - \theta) + c_2 m_2 (t - \theta),$$

где t_0 — температура плавления льда. Отсюда определяем искомую удельную теплоту плавления λ льда:

$$\lambda = \frac{(c_1 m_1 + c_2 m_2) (t - \theta) - c_1 m (\theta - t_0)}{m}.$$

Опыт показывает, что при плавлении тел изменяют свой объем. При плавлении большинства веществ их объем увеличивается, а при затвердевании — уменьшается. Лед имеет меньшую плотность, чем вода, благодаря чему он плавает на воде. Обладая плохой теплопроводностью, слой льда надежно защищает находящуюся под ним воду от охлаждения до температуры затвердевания. Поэтому живые существа и растения не гибнут в водоемах во время морозов.

Сплавы обычно имеют более низкую температуру плавления, чем составляющие их компоненты.

Температура плавления веществ изменяется при изменении внешнего давления. Для всех веществ, объем которых при плавлении увеличивается, с увеличением давления температура плавления повышается, с уменьшением — понижается. Для льда температура плавления понижается на $0,0075^\circ\text{C}$ при увеличении давления на 1 ат , так как при плавлении объем льда уменьшается.

§ 58. Испарение

Явление перехода вещества в пар называется *парообразованием*. Этот процесс происходит путем испарения или кипения жидкости. Парообразование с открытой поверхности жидкости называется *испа-*

рением. Испаряются не только жидкости, но и твердые тела. Испарение твердых тел называется *возгонкой*, или *сублимацией*.

Так же как диффузия и броуновское движение, парообразование происходит вследствие непрерывного хаотического движения молекул, в результате которого последние выходят за пределы объема, занимаемого жидкостью. Молекулы при переходе из жидкости в пар преодолевают силы сцепления, выполняя так называемую *работу выхода*. Отсюда следует, что из жидкости могут вылетать только те молекулы, которые находятся вблизи поверхности и в процессе беспорядочного теплового движения приобретают кинетическую энергию, достаточную для совершения работы по преодолению сил молекулярного притяжения со стороны поверхностного слоя жидкости. При этом одновременно происходит и обратный процесс, так как некоторые молекулы пара, совершая беспорядочное движение, сталкиваясь друг с другом, попадают в сферу притяжения молекул жидкости и возвращаются в нее.

Таким образом, молекулы все время вылетают из жидкости и вновь возвращаются в нее. Если преобладает первый процесс, то говорят, что жидкость испаряется, если второй — конденсируется пар. Поскольку с поверхности жидкости вылетают наиболее быстрые молекулы, то при испарении жидкости без притока тепла извне средняя скорость хаотического движения молекул уменьшается и, следовательно, жидкость охлаждается. Это явление, в частности, используется в холодильных установках.

Испарение жидкости происходит при любой температуре и тем быстрее, чем выше температура, так как при более высокой температуре имеется большее число молекул, обладающих энергией, достаточной для совершения работы выхода из жидкости. Очевидно, испарение будет происходить интенсивнее, если свободная поверхность жидкости велика и быстрее удаляются образовавшиеся над жидкостью пары.

При конденсации пара средняя скорость хаотического движения молекул жидкости возрастает и жидкость нагревается. Количество теплоты, которое было затрачено на испарение жидкости, равно количеству теплоты, отдаваемой паром при его конденсации.

§ 59. Ненасыщающие и насыщающие пары

Если жидкость находится в открытом сосуде, то количество молекул, покидающих ее, превалирует над количеством молекул возвращающихся, и количество жидкости постепенно уменьшается. Если же жидкость находится в закрытом сосуде и вначале над ней не было пара, то до некоторого момента времени количество моле-

кул, покидающих ее, превышает количество возвращающихся молекул, т. е. количество пара будет увеличиваться. Пар, находящийся над жидкостью, в этом случае называют *ненасыщающим*, так как может происходить дальнейшее испарение жидкости в заполняемое паром пространство. Через некоторое время в пространстве над жидкостью окажется столько молекул, что установится равновесие между количеством молекул, вылетающих из жидкости, и молекул, возвращающихся в нее. Такое равновесие называется *динамическим*, а пар над жидкостью — *насыщающим*.

Ненасыщающий пар, как и газ, подчиняется законам идеальных газов. Чем более далек пар от состояния насыщения, тем лучше его состояние описывается законами Бойля — Мариотта, Гей-Люссака и Шарля. С увеличением количества пара над поверхностью жидкости при неизменной температуре давление его увеличивается. Давление будет максимальным тогда, когда пар становится насыщающим, так как в этом случае является максимальным количество молекул, занимающих предоставленный им объем.

Если при неизменной температуре объем, занимаемый насыщающим паром, уменьшить, то часть молекул перейдет в жидкость, и наоборот, если в тех же условиях объем насыщающего пара увеличить, то часть жидкости испарится, а давление насыщающего пара не изменится. Отсюда следует, что *давление насыщающего пара не зависит от объема*, т. е. он не подчиняется закону Бойля — Мариотта. При повышении температуры давление насыщающего пара возрастает, так как увеличивается количество молекул жидкости, которые обладают энергией, достаточной для вылета из жидкости. Однако зависимость давления насыщающего пара от температуры иная, чем у газов, т. е. насыщающий пар не подчиняется закону Шарля. При нагревании на 1°C давление насыщающего пара увеличивается неравномерно, а именно — при высоких температурах быстрее, чем при низких. Это объясняется тем, что при нагревании смеси жидкость — пар изменяется не только скорость хаотического движения молекул, но также и количество молекул, содержащихся в единице объема пара, т. е. с повышением температуры плотность насыщающего пара увеличивается. Следовательно, *давление насыщающего пара зависит от температуры: оно тем больше, чем выше температура*. В этом состоит резкое отличие насыщающих паров от газов.

Насыщающие пары различных жидкостей при одинаковой температуре имеют разное давление. Например, давление насыщающих паров спирта больше, чем паров воды, а паров эфира — больше, чем спирта. Из вышеизложенного следует, что ненасыщающий пар можно перевести в насыщающий, уменьшая его объем (сжимая), или понижая его температуру (охлаждая), или же одновременно сжимая и охлаждая его. Обратный переход пара из насыщающего в ненасыщающий достигается или увеличением объема без повышения темпера-

туры, или повышением температуры пара. В технике ненасыщающий пар получают путем нагревания насыщающего пара. Полученный таким образом ненасыщающий пар называется перегретым паром.

§ 60. Кипение

Чтобы могло происходить испарение, необходимо наличие поверхности раздела, т. е. пустого (или заполненного газом) пространства над жидкостью. Однако эту поверхность можно получить и внутри жидкости, так как любая жидкость способна в той или иной мере поглощать газы. При нагревании жидкости растворенные в ней газы начинают выделяться в виде пузырьков. Пузырьки внутри жидкости могут существовать в том случае, если давление пара в них равно или чуть больше внешнего давления, при котором находится жидкость (в противном случае появляющиеся пузырьки тотчас же были бы сжаты — существование их в этих условиях невозможно). Внутрь пузырьков и идет испарение.

Когда давление внутри пузырьков становится равным давлению над поверхностью жидкости, пузырьки выходят на поверхность жидкости и, лопаясь, выбрасывают пар. Это явление называется кипением жидкости. Таким образом, *кипением называется парообразование, происходящее одновременно внутри (в пузырьки воздуха) и с поверхностью жидкости*. Процесс кипения осуществляется при температуре, при которой давление насыщающего пара жидкости равно внешнему давлению на ее свободную поверхность. Температура, при которой жидкость кипит, называется *температурой кипения*, или *точкой кипения*. Температура кипения понижается с уменьшением внешнего давления на поверхность жидкости. Температура кипения для различных жидкостей неодинакова и зависит от примесей, находящихся в них. Как правило, температура кипения повышается с увеличением концентрации примеси.

Пузырьки в жидкости играют роль центров парообразования, без которых не может начаться процесс кипения; поэтому при отсутствии таких центров температура жидкости может превысить температуру кипения, а парообразование внутри жидкости — запоздать. Это явление называется *перегревом жидкости*.

Количество теплоты, необходимой для превращения жидкости в пар, определяется по формуле

$$Q = r m.$$

Коэффициент пропорциональности r называется *удельной теплотой парообразования*; для разных жидкостей она различна. Удельная теплота парообразования численно равна количеству теплоты, необ-

ходимой для превращения 1 кг жидкости в пар при температуре кипения (в системе СИ измеряется в Дж/кг). Удельная теплота парообразования для данной жидкости уменьшается с повышением температуры.

Определяется удельная теплота парообразования опытным путем. Обычно ее находят по теплоте конденсации. Для этого пар вещества, удельную теплоту парообразования которого определяют, впускают в холодную жидкость того же вещества. Зная массу жидкости и температуру ее до впускания пара и после, составляют уравнение теплового баланса. Пренебрегая количеством теплоты, идущей в окружающее пространство, получим

$$Q + Q_1 = Q_2 + Q_3,$$

где Q — количество теплоты, выделяющейся при конденсации пара; Q_1 — количество теплоты, отданной жидкостью, которая образовалась из пара; Q_2 и Q_3 — количества теплоты, отданные соответственно жидкости, находящейся в калориметре, и калориметру с мешалкой; или

$$rm + cm(t - \theta) = c_1 m_1 (\theta - t_1) + c_2 m_2 (\theta - t_1),$$

где m , m_1 и m_2 — соответственно массы пара, жидкости и калориметра с мешалкой; c , c_1 и c_2 — удельные теплоемкости жидкости, полученной из пара, жидкости, находящейся в калориметре, и калориметра; t — температура пара; t_1 — начальная температура жидкости и калориметра. Отсюда определяется удельная теплота парообразования

$$r = \frac{(c_1 m_1 + c_2 m_2)(\theta - t_1) - cm(t - \theta)}{m}.$$

Задача 1. Какое количество теплоты необходимо для превращения $m = 5$ кг льда, взятого при температуре $t = -20^\circ \text{C}$, в пар, температура которого 100°C ?

Решение. Искомое количество теплоты

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4,$$

где $Q_1 = c_1 m(t_0 - t)$ — количество теплоты, затраченной на нагревание льда от температуры t до температуры плавления льда t_0 ; $Q_2 = \lambda m$ — теплота плавления льда; $Q_3 = c_2 m(t'_0 - t_0)$ — количество теплоты, израсходованное на нагревание воды, полученной из льда,

от 0°C до температуры кипения воды t'_0 ; наконец, $Q_4 = rm$ — теплота парообразования воды. Тогда

$$Q = [c_1(t_0 - t) + \lambda + c_2(t'_0 - t_0) + r]m;$$

$$Q = 1,53 \cdot 10^7 \text{ дж.}$$

О т в е т. Необходимое количество теплоты $Q = 1,53 \cdot 10^7 \text{ дж.}$

Задача 2. В сосуде Дьюара хранится $V = 2 \text{ л}$ жидкого азота при температуре $t = -195^\circ \text{C}$. За двое суток весь азот испарился. Определить удельную теплоту испарения азота, если известно, что при температуре $t_0 = 0^\circ \text{C}$ в том же сосуде в течение $\tau_1 = 45 \text{ ч}$ растает $m_1 = 80 \text{ г}$ льда. Температура окружающего воздуха $t_1 = 20^\circ \text{C}$. Плотность жидкого азота $\rho = 0,8 \text{ г/см}^3$. Считать, что скорость подвода тепла внутрь сосуда пропорциональна разности температур снаружи и внутри сосуда.

Р е ш е н и е. Количество теплоты, поглощенной азотом и льдом, соответственно равно

$$Q = rm; \quad Q_1 = \lambda_1 m_1.$$

Эти количества теплоты получены от окружающей среды, и по условию задачи они равны

$$Q = k(t_1 - t)\tau; \quad Q_1 = k(t_1 - t_0)\tau_1,$$

где k — коэффициент пропорциональности. Приравнявая между собой правые части уравнений, выражающих одно и то же количество теплоты, получим

$$rm = k(t_1 - t)\tau; \quad \lambda_1 m_1 = k(t_1 - t_0)\tau_1.$$

Разделим одно равенство на другое:

$$\frac{rm}{\lambda_1 m_1} = \frac{(t_1 - t)\tau}{(t_1 - t_0)\tau_1};$$

отсюда

$$r = \frac{(t_1 - t)\tau\lambda_1 m_1}{(t_1 - t_0)\tau_1 m}.$$

Так как $m = \rho V$,

$$r = \frac{(t_1 - t)\tau\lambda_1 m_1}{(t_1 - t_0)\tau_1 \rho V}; \quad r = 1,92 \cdot 10^5 \text{ дж/кг.}$$

О т в е т. Удельная теплота испарения азота $r = 1,92 \cdot 10^5 \text{ дж/кг.}$

§ 61. Сжижение газов. Критическая температура

Опытным путем установлено, что не только любой пар, но и газ можно превратить в жидкое состояние. Переход газов в жидкое состояние называется *сжижением газов*. Газы — это ненасыщающие пары, поэтому сжиженный газ можно получить таким же путем, как из ненасыщающего пара получают насыщающий, а затем жидкость. Переход газа в жидкое состояние осуществляется понижением его температуры или повышением давления. Однако существует такая температура, выше которой никаким сжатием (увеличением давления) нельзя перевести газ в жидкое состояние. Эта температура, различная

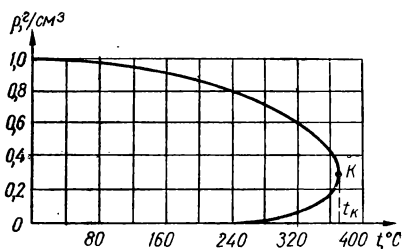


Рис. 45.

для каждого газа, называется *критической температурой*. Например, критическая температура воды равна $374,2^{\circ}\text{C}$.

Если в закрытом сосуде имеется жидкость и насыщающий ее пар, то с повышением температуры плотность пара возрастает (нижняя кривая рис. 45), а плотность жидкости уменьшается (верхняя кривая этого же рисунка). Температура t_K , при которой указанные кривые сходятся в одной точке

K , и соответствует критической температуре.

Газы — это те же пары. Условно газами называют такие пары, которые при нормальном давлении и обычных температурах всегда очень далеки от состояния насыщения.

Известно, что при быстром сжатии воздух нагревается, а при быстром расширении — охлаждается. При быстром сжатии и расширении газа не успевает произойти теплообмен с окружающей средой. Процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой, называется *адиабатическим процессом*. Метод сжижения газа, основанный на охлаждении газа при совершении им полезной работы расширения в адиабатическом процессе, предложил советский физик П. Л. Капица.

Второй важный метод сжижения газа предложили Дюар и Линде. Метод Дюара — Линде состоит в следующем. Газу, находящемуся при атмосферном давлении и сжимаемому до нескольких десятков атмосфер, дают возможность адиабатически расшириться до атмосферного давления. При этом температура газа понижается. Полученный охлажденный газ проходит по внешней трубе змеевика и охлаждает встречную порцию воздуха, идущего по внутренней трубе от компрессора. Такой процесс повторяется вплоть до сжижения газа.

Все вещества при низких температурах изменяют свои физические свойства. При температурах, близких к абсолютному нулю, многие металлы, например, становятся сверхпроводниками, одна из двух модификаций гелия становится сверхтекучей, свинец делается ковким и упругим, как сталь, и т. п.

Жидкий воздух и его составляющие находят широкое применение на практике. Так, жидкий кислород применяется для взрывных работ, хранения продуктов и в ряде других случаев.

§ 62. Влажность воздуха

Как известно, в состав атмосферы входят и пары воды. О количестве водяных паров в воздухе судят по абсолютной влажности. *Абсолютной влажностью воздуха* называется величина, измеряемая количеством водяного пара в 1 м³ воздуха. Водяной пар, находящийся в атмосфере, создает определенное давление. Часть атмосферного давления приходится на давление, создаваемое паром. Поэтому об абсолютной влажности воздуха можно судить по величине давления пара, находящегося в воздухе; выражается она в миллиметрах ртутного столба.

Чтобы судить о том, насколько далек воздух от насыщения водяным паром, вводится понятие об относительной влажности. *Относительной влажностью* называется выраженное в процентах отношение абсолютной влажности к количеству пара в 1 м³, насыщающего воздух при данной температуре, т. е.

$$B = \frac{f}{F} 100\%.$$

Поскольку значение F берется из таблиц, нахождение относительной влажности сводится к определению абсолютной влажности.

Абсолютную влажность воздуха можно определить по точке росы. Под *точкой росы* понимают температуру, при которой пар, находящийся в воздухе, становится насыщающим. Приборы для определения влажности называются *гигрометрами*. В простейшем гигрометре использован человеческий волос, который, будучи обезжирен, удлиняется при увеличении влажности воздуха. Кроме того, применяются гигрометры, при помощи которых устанавливается точка росы.

С большой точностью влажность определяется прибором, называемым *психрометром*. Он состоит из двух термометров, причем резервуар одного из них обернут марлей, опущенной в сосуд с водой. Вода поднимается по капиллярам марли и смачивает резервуар тер-

мометра. Если воздух насыщен водяным паром, то показания термометров будут одинаковыми. Если же воздух не насыщен паром, то вода с марли будет испаряться и термометр с влажным резервуаром покажет более низкую температуру, так как на испарение воды от термометра берется тепло. Чем суше воздух, тем большей будет разность показаний сухого и мокрого термометров. По разности показаний сухого и мокрого термометров и психрометрическим таблицам сразу определяется относительная влажность воздуха.

Задача. В сосуде объемом V находится воздух при температуре $t = 20^\circ \text{C}$ и влажности $B = 40\%$. Найти относительную влажность воздуха, если его нагреть до температуры $t_1 = 100^\circ \text{C}$, а объем уменьшить в четыре раза. Давление насыщающего водяного пара при 20°C равно $17,5 \text{ мм рт. ст.}$

Решение. Абсолютная влажность воздуха при температуре t равна

$$f = FB; \quad f = 7 \text{ мм рт. ст.}$$

Абсолютная влажность при температуре t_1 определяется из уравнения состояния газа:

$$\frac{F_1 V}{4T_1} = \frac{FV}{T}; \quad F_1 = \frac{4FT_1}{T}; \quad F_1 = 35,6 \text{ мм рт. ст.}$$

Относительная влажность

$$B = \frac{35,6 \cdot 100\%}{760} = 4,7\%.$$

Ответ. Относительная влажность воздуха равна $4,7\%$.

Контрольные вопросы к главе «Теплота. Влажность воздуха»

1) Что называется удельной теплоемкостью вещества и какими единицами она измеряется в системе СИ?

2) Что называется теплоемкостью тела?

3) Чем отличается формула количества теплоты, необходимой для нагревания тела, от формулы количества теплоты, отдаваемой телом при его остывании?

4) Что называется уравнением теплового баланса и на чем основано его составление?

5) Какими данными надо располагать, чтобы определить удельную теплоемкость твердого тела, и как получить эти данные?

6) Что такое теплотворная способность топлива и в каких единицах она выражается?

7) По какой формуле определяется количество теплоты, получаемой от сжигания топлива?

8) Что называется плавлением? отвердеванием?

9) Как происходит плавление кристаллического и аморфного тела?

10) Чем объясняется постоянство температуры во время плавления и затвердевания кристаллических тел?

11) Что называется удельной теплотой плавления и какими единицами она измеряется в системе СИ?

12) По какой формуле определяется теплота плавления?

13) Как составляется уравнение теплового баланса для плавления?

14) Какова обычно температура плавления сплава в сравнении с температурой плавления его компонентов?

15) Как зависит температура плавления от внешнего давления?

16) От каких условий зависит скорость испарения жидкости?

17) Чем отличается кипение от испарения?

18) Что называется теплотой парообразования?

19) Что называется удельной теплотой парообразования и какими единицами она измеряется?

20) Может ли кипеть вода при температуре 20°C ?

21) Какой пар называется насыщающим? ненасыщающим?

22) Испаряются ли твердые тела?

23) Зависит ли давление насыщающего пара от объема? от температуры?

24) Зависит ли давление ненасыщающего пара от температуры? от объема?

25) Чему равно давление насыщающего пара при кипении жидкости?

26) Какими способами можно обратить пар ненасыщающий в насыщающий, а последний в жидкость?

27) Что такое критическая температура?

28) Можно ли водяной пар, находящийся при температуре 400°C , превратить сжатием в воду?

29) Какие существуют методы сжижения газов и в чем их суть?

30) Что называется абсолютной влажностью? относительной влажностью?

31) Что называется точкой росы?

32) Каково устройство психрометра?

33) Изменяется ли длина человеческого волоса от изменения влажности? Если да, то как?

34) Какие приборы называются гигрометрами и на чем основано их действие?

Вопросы и задачи к главе «Теплота. Влажность воздуха»

180. Почему оконные стекла всегда запотевают изнутри?

181. Какое из тел равного объема имеет большую теплоемкость: кусок железа или кусок алюминия?

182. Земля ежегодно получает от Солнца $1,6 \cdot 10^{17}$ *квт · ч* энергии. Какое количество каменного угля необходимо было бы сжечь, чтобы получить такое же количество теплоты, если теплотворность его $q = 3 \cdot 10^7$ *дж/кг*?

183. В Советском Союзе в 1965 г. созданы турбины сверхвысокого давления, развивающие мощность $N = 500$ *Мвт* и имеющие к. п. д. $\eta = 49\%$. Определить, какую экономию условного топлива ($q = 3 \cdot 10^7$ *дж/кг*) за сутки дает одна такая турбина в сравнении с турбинами мощностью 25 *Мвт*, к. п. д. которых $\eta_1 = 24\%$.

184. Свинцовая пуля, летящая со скоростью $v = 452$ *м/сек*, ударяется о препятствие. Вычислить, какая часть пули расплавится, если $\eta = 50\%$ теплоты при ударе поглощается пулей. Температура пули перед ударом $t = 27^\circ \text{C}$, температура плавления свинца $t_0 = 327^\circ \text{C}$, удельная теплоемкость свинца $c = 126$ *дж/кг · град*, удельная теплота плавления свинца $\lambda = 2,26 \cdot 10^4$ *дж/кг*.

185. Для определения температуры печи в железный калориметр массой $m_1 = 70$ г налили $m_2 = 500$ г воды при температуре $t_1 = 20^\circ \text{C}$, опустив в нее железную гирику массой $m = 200$ г, предварительно нагретую в печи. Температура воды поднялась до $\theta = 35^\circ \text{C}$. Найти температуру печи по данным опыта. Теплом, израсходованным на частичное испарение воды, пренебречь.

186. Скорость свинцовой пули при прохождении доски уменьшается с $v = 825$ *м/сек* до $v_1 = 775$ *м/сек*. Какая часть пули расплавится, если ее начальная температура $t = 27^\circ \text{C}$? Удельная теплоемкость свинца $c = 126$ *дж/кг · град*, удельная теплота плавления свинца $\lambda = 2,26 \cdot 10^4$ *дж/кг*.

187. Способствует или. препятствует охлаждению растений покрытие их инеем?

188. На что расходуется электроэнергия, потребляемая домашним холодильником?

189. Спутник массой $m = 50$ *кг*, возвращаясь на Землю, на высоте 30 *км* попадает в плотные слои атмосферы. Какое количество теплоты выделится в результате его торможения, если скорость спутника была 8 *км/сек*?

190. Определить, какое количество теплоты надо затратить для того, чтобы 2 *кг* льда при температуре -10°C превратить в пар температурой 100°C .

191. На примусе, к. п. д. которого $\eta = 40\%$, нагревается кастрюля с водой и льдом от температуры $t_0 = 0^\circ$ до $t = 100^\circ \text{C}$; масса

воды $m = 3$ кг, масса льда $m_1 = 2$ кг, удельная теплота плавления льда $\lambda = 3,35 \cdot 10^5$ дж/кг, удельная теплоемкость воды $c = 4190$ дж/кг · град, теплотворность керосина $q = 4,6 \cdot 10^7$ дж/кг. Какое количество керосина при этом будет израсходовано?

192. Определить к. п. д. вагранки, если для плавления 2 т чугуна, взятого при температуре -10°C , затрачено 75 кг угля ($q = 30$ Мдж/кг). Температура плавления чугуна 1150°C , его удельная теплоемкость 540 дж/кг · град, удельная теплота плавления $\lambda = 0,96 \cdot 10^5$ дж/кг.

193. Почему при повышении температуры давление насыщающего пара возрастает быстрее, чем давление газов?

194. Какой воздух при одинаковой температуре и давлении тяжелее — сухой или влажный?

195. Какое количество воды испарится в 1 м³ воздуха, если его температура 15°C , а точка росы равна 5°C ?

196. При каких условиях в случае увеличения абсолютной влажности воздуха происходит уменьшение его относительной влажности?

197. Почему газовый термометр дает правильные показания только при совершенно сухом воздухе?

198. Какое количество росы выпадает из 1 м³ воздуха при изотермическом уменьшении его объема в пять раз, если температура воздуха 10°C , а относительная влажность $B = 60\%$? Абсолютная влажность F , соответствующая насыщающему водяному пару, при температуре 10°C равна $9,43$ г/м³.

Глава XI. СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ

§ 63. Общие свойства жидкостей

Плотность жидкости примерно в 1700 раз больше плотности ее пара. Отсюда следует, что молекулы жидкости расположены на сравнительно близких расстояниях одна от другой. Поэтому характер движения жидкости и многие свойства ее в значительной степени определяются силами взаимодействия между молекулами. Опытами и наблюдениями установлено, что между молекулами жидкости существуют силы притяжения и отталкивания. Силы отталкивания проявляются при сжатии (жидкости почти не сжимаются), а силы притяжения — при разрыве жидкости.

На основании теоретических исследований советский физик Я. И. Френкель установил, что в течение 1 сек молекула перемещается с места на место 10^{10} — 10^{11} раз, совершая в местах кратковременной остановки около 100 колебаний. Таким образом, в малых областях

молекулы жидкостей более или менее длительное время сохраняют неизменным взаимное расположение. Существование этих областей обуславливает основное свойство жидкостей — *текучесть*.

Жидкость приобретает форму сосуда, в котором она находится. Если исключить действие силы тяжести или взять ее в малых количествах, жидкость приобретает форму шара. Так, капля анилина, введенная в водный раствор поваренной соли, плотность которого равна плотности анилина, принимает форму шара.

Итак, молекулы жидкости, двигаясь хаотически, большую часть времени находятся около определенных мест, сохраняя некоторую зависимость взаимного расположения.

Жидкое состояние вещества является промежуточным между газообразным и твердым и имеет сходство как с тем, так и с другим. Около критической температуры свойства жидкостей близки к свойствам плотного пара, а в условиях затвердевания сходны со свойствами твердого тела.

§ 64. Поверхностное натяжение

Молекулы поверхностного слоя жидкости в энергетическом отношении отличаются от молекул, находящихся внутри жидкости. Молекула *A* (рис. 46), находящаяся в центре сферы радиуса *r*, равного

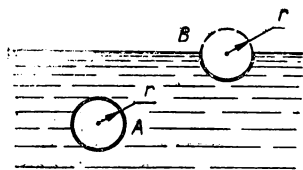


Рис. 46.

наибольшему расстоянию от данной молекулы до молекулы, с которой еще взаимодействует молекула *A*, будет притягиваться всеми молекулами, находящимися в *сфере молекулярного действия*. Равнодействующая сила, действующая на рассматриваемую молекулу, непрерывно изменяет свою величину и направление, что вызывает постоянный дрейф молекулы внутри жидкости.

Молекула *B*, находящаяся на поверхности жидкости, испытывает притяжение со стороны молекул жидкости, лежащих в нижнем сегменте сферы молекулярного действия, и со стороны молекул воздуха и паров жидкости, находящихся в верхнем сегменте этой сферы. Поскольку концентрация молекул газа и паров гораздо меньше концентрации молекул жидкости, на молекулу *B* действует сила, направленная внутрь жидкости перпендикулярно ее поверхности. Под действием этих сил часть молекул уходит с поверхности внутрь жидкости. Поверхностный слой при этом сокращается и находится в состоянии своеобразного натяжения.

Наличие поверхностного слоя жидкости подтверждается рядом явлений и опытов. Силы, сокращающие поверхностную пленку, назы-

ваются *силами поверхностного натяжения*. Сила поверхностного натяжения тем больше, чем длиннее граница пленки, т. е.

$$F = \alpha l,$$

где α — коэффициент поверхностного натяжения, зависящий от природы жидкости и наличия в ней примесей. Коэффициент поверхностного натяжения жидкости численно равен силе поверхностного натяжения, действующей на единицу длины границы пленки. С повышением температуры α уменьшается. Коэффициент поверхностного натяжения можно определить, например, по весу капли P и радиусу r ее шейки (в момент отрыва капли). Перед отрывом вес капли равен силе поверхностного натяжения ($P = F$). Сила поверхностного натяжения $F = 2\pi r\alpha$, где $2\pi r$ — длина границы поверхностного слоя. Из равенства $F = P$ имеем: $2\pi r\alpha = P$; отсюда

$$\alpha = \frac{P}{2\pi r}.$$

На практике взвешивают несколько десятков капель, а затем находят вес одной капли. Радиус шейки капли принимают приближенно равным внутреннему радиусу трубки, из которой вытекают капли.

§ 65. Явление смачивания

При соприкосновении твердого тела с жидкостью имеет место или смачивание, или несмачивание данной жидкостью твердого тела. Жидкость называется *смачивающей* по отношению к твердому телу, если у нее силы взаимодействия между собственными молекулами меньше, чем силы взаимодействия между молекулами жидкости и твердого тела; в противном случае жидкость называется *несмачивающей*.

Неодинаковое смачивание жидкостями различных тел используется для обогащения руд, т. е. для отделения от руд тех минералов, которые не используются промышленностью (породы). Для обогащения руд дробят и взбалтывают в жидкостях (в воде с маслом). При взбалтывании образуется пена, состоящая из пузырьков воздуха. Крупинки породы (кварц, силикаты и др.) смачиваются водой и тонут, а крупинки руды цветного металла (свинцовый блеск, медный колчедан и др.) смачиваются маслом, но не смачиваются водой, и это приводит к тому, что они втягиваются внутрь пузырьков воздуха и вместе с ними всплывают на поверхность. Этот способ обогащения руд и разделения разных металлов называется *флотацией*.

§ 66. Капиллярные явления

В тонких трубках, называемых *капиллярами*, смачивающая жидкость поднимается выше, а несмачивающая — ниже уровня жидкости в широком сосуде. Подъем смачивающей жидкости в капилляре происходит до тех пор, пока сила поверхностного натяжения F не уравновесится весом P столба жидкости в капилляре. Сила поверхностного натяжения $F = 2\pi r\alpha$, где r — радиус внутреннего канала трубки, а α — коэффициент поверхностного натяжения жидкости. Вес $P = \rho g \pi r^2 h$, где ρ — плотность жидкости, h — высота столба жидкости в капилляре. Тогда $2\pi r\alpha = \rho g \pi r^2 h$, откуда

$$h = \frac{2\alpha}{\rho g r},$$

т. е. высота поднятия жидкости в капиллярной трубке пропорциональна коэффициенту поверхностного натяжения жидкости и обратно пропорциональна радиусу трубки.

Задача. Для определения коэффициента поверхностного натяжения воды в нее опустили две стеклянные трубки с радиусами внутреннего канала $r = 0,25$ мм и $r_1 = 0,5$ мм. Вода поднялась в одной трубке выше, чем в другой, на $h = 30$ мм. Вычислить коэффициент поверхностного натяжения воды.

Решение. Разность уровней воды в стеклянных трубках

$$h = \frac{2\alpha}{\rho g r} - \frac{2\alpha}{\rho g r_1}.$$

Следовательно,

$$\alpha = \frac{\rho g r r_1 h}{2(r_1 - r)}; \alpha = 0,073 \text{ н/м}.$$

Ответ. Коэффициент поверхностного натяжения воды равен 0,073 н/м.

§ 67. Кристаллические и аморфные тела

Под *твердым телом* в обыденной жизни понимают тело, имеющее определенную форму. Иначе говоря, форма и размеры твердого тела могут изменяться лишь при воздействии на него внешних сил.

Твердые тела бывают кристаллические и аморфные. В *кристаллических телах* атомы или молекулы располагаются в определенном порядке, образуя так называемую *пространственную решетку*. Форма пространственной решетки данного вещества определяется расположением частиц (атомов, молекул), из которых состоит вещество.

Кристаллические тела в свою очередь делятся на *монокристаллы* и *поликристаллы*. Монокристаллы в разных направлениях имеют различные физические свойства (прочность, теплопроводность, электропроводность и т. д.), т. е. они *анизотропны*. Поликристаллы — это вещества, состоящие из множества мелких кристаллов (зерен). Благодаря хаотическому расположению кристаллических зерен поликристаллы являются *изотропными*: они обладают одинаковыми физическими свойствами в разных направлениях.

Аморфные тела представляют собой как бы переохлажденные жидкости, т. е. жидкости с большим коэффициентом вязкости. К аморфным телам относятся смолы, стекло, пластмассы и т. д.

В настоящее время привлекают внимание аморфные вещества, состоящие из органических соединений, — *полимеры*. Они состоят из более простых соединений — мономеров, объединяющихся в группы от нескольких молекул до нескольких тысяч молекул.

В промышленных масштабах полимеры начали получать лишь с 1920 г. В настоящее время производство полимеров растет из года в год благодаря их ценным и разнообразным техническим свойствам. Они просты в технологической обработке, обладают исключительно высокой прочностью, легкостью, эластичностью, теплостойкостью (в пределах от -90° до $+500^{\circ}$ С и выше), светостойкостью, химической стойкостью, хорошими электроизоляционными и теплоизоляционными свойствами, невосприимчивостью к коррозии и т. д. Полимеры нашли и будут находить применение во всех областях техники и в быту, заменяя металлы, древесину, ткани и другие материалы.

Кристаллические тела, как отмечалось выше, имеют постоянную температуру плавления, а аморфные ее не имеют.

§ 68. Деформация твердых тел

В твердых телах, как и в жидкостях, между молекулами существуют силы отталкивания и силы притяжения. Под действием приложенных внешних сил тела изменяют свою форму и объем — деформируются. Опыт показывает, что величина деформации зависит от размеров тела, места приложения силы, ее направления и материала, из которого изготовлено тело. Если после прекращения действия силы форма и объем тела полностью восстанавливаются, то деформацию называют *упругой*, а тело — *абсолютно упругим*, если же нет, то деформацию, оставшуюся в теле, называют *остаточной*, а тела — *пластичными*. Упругость и пластичность в некоторой степени присущи всем телам.

Различают следующие виды деформаций: растяжение, сжатие, сдвиг, изгиб и кручение.

Деформация растяжения заключается в том, что тело удлиняется в продольном направлении и сужается в поперечном. Она

возникает в том случае, когда к двум основаниям образца вдоль оси приложены две равные и направленные в противоположные стороны от образца силы.

Деформация сжатия отличается от деформации растяжения лишь тем, что силы, приложенные к образцу, имеют направление в его сторону.

При *деформации сдвига* происходит смещение параллельных основанию образца слоев под действием сил, приложенных к верхнему и нижнему основанию образца и направленных в его сторону.

Деформация кручения состоит в относительном повороте параллельных между собой сечений, проведенных перпендикулярно оси образца. Возникает она в образце с одним закрепленным концом, если к свободному его концу приложена пара сил в плоскости, перпендикулярной оси образца.

Деформация изгиба появляется в образце, ось которого нейтральна, а в противоположные от нее стороны к боковой поверхности действуют возрастающие по численному значению силы, параллельные оси; при этом в одну сторону от оси силы сжимают образец, а в другую — растягивают. Деформация изгиба возникает, например, тогда, когда один конец образца закреплен, а на другой действует сила, перпендикулярная к оси образца.

§ 69. Закон Гука

Рассмотрим более подробно деформацию растяжения. Такая деформация характеризуется *абсолютным удлинением* $\Delta l = l_1 - l$ (где l — длина тела до растяжения; l_1 — длина тела после растяжения) и *относительным удлинением* $\frac{\Delta l}{l}$.

В соответствии с законом Гука, для упругой деформации растяжения *относительная деформация* $\frac{\Delta l}{l}$ пропорциональна *приложенному напряжению* p , равному силе F , отнесенной к единице площади поперечного сечения S образца:

$$\frac{\Delta l}{l} = k \frac{F}{S},$$

где k — коэффициент упругости. Вместо коэффициента упругости k вводят обратную ему величину, называемую *модулем упругости*, или *модулем Юнга*. Тогда закон Гука принимает вид:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{E} p, \quad \text{или} \quad \frac{\Delta l}{l} E = p.$$

Если $\Delta l = l$, то $E = p$, т. е. модуль упругости численно равен напряжению, которое удлинит образец в два раза. Практически только резина может быть растянута в два раза, остальные тела разрушаются раньше.

Свойство материала сопротивляться действию внешних сил не разрушаясь называется его *прочностью*. Напряжение, при котором материал, подвергнутый деформации, разрушается, называется *пределом прочности*. Предел прочности приводится в справочных таблицах.

З а д а ч а. Какое напряжение нужно приложить к торцам латунного цилиндра, чтоб длина его осталась неизменной при повышении температуры от $t' = 0^\circ$ до $t = 100^\circ \text{C}$? Коэффициент линейного расширения латуни $\alpha = 18 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, модуль упругости $E = 9,8 \cdot 10^{10} \text{ н/м}^2$.

Р е ш е н и е. К торцам цилиндра надо приложить напряжение, которое вызывает абсолютную деформацию сжатия, равную приращению длины вследствие нагревания. По закону Гука

$$\Delta l = \frac{pl}{E}.$$

Абсолютное удлинение цилиндра вследствие нагревания

$$\Delta l = l - l' = l_0 \alpha (t - t').$$

Приравняв правые части, после сокращения ($l \approx l_0$) получим:

$$\frac{p}{E} = \alpha (t - t').$$

Так как начальная температура $t' = 0^\circ \text{C}$, то

$$p = \alpha E t; \quad p = 1,8 \cdot 10^8 \text{ (н/м}^2\text{)}.$$

О т в е т. К торцам цилиндра нужно приложить напряжение $1,8 \times 10^8 \text{ н/м}^2$.

Контрольные вопросы к главе «Свойства жидкостей и твердых тел»

1) Какую форму принимает жидкость, находящаяся в свободном состоянии, и почему?

2) Что такое сфера молекулярного действия и каков примерно ее радиус?

3) Какими опытами подтверждается наличие поверхностного слоя жидкости?

4) Как движутся молекулы в жидкости?

5) Что называется силой поверхностного натяжения?

- 6) Что называется коэффициентом поверхностного натяжения жидкости, от чего он зависит и какими единицами измеряется?
- 7) При какой температуре коэффициент поверхностного натяжения жидкости равен нулю?
- 8) Как можно определить коэффициент поверхностного натяжения жидкости?
- 9) Как объясняются явления смачивания и несмачивания? Где используются эти явления?
- 10) В чем состоит явление капиллярности?
- 11) От чего зависит высота поднятия жидкости в капилляре?
- 12) Обладают ли жидкости упругостью?
- 13) Приведите примеры явлений капиллярности, встречающиеся в природе и технике.
- 14) Как подразделяются твердые тела? Привести примеры.
- 15) Чем объясняется правильность кристаллической формы твердых тел?
- 16) Что называется деформацией тела и от чего она зависит?
- 17) Какими видами упругости обладают вещества в твердых, жидких и газообразных состояниях?
- 18) Что называется упругой деформацией? неупругой деформацией?
- 19) В чем состоит закон Гука для упругой деформации?
- 20) Каково отличие между хрупкими и пластическими веществами?
- 21) Что называется модулем Юнга? В каких единицах он измеряется?
- 22) Каковы особенности структуры твердого тела?

Вопросы и задачи к главе «Свойства жидкостей и твердых тел»

199. В тонкой стеклянной трубке, лежащей горизонтально, находится столбик воды. Какое явление будет иметь место, если один конец трубки подогревать?

200. Почему волоски кисточки, расходящиеся в воде, после того как ее вынуть из воды, слипаются?

201. Почему стеклышко, положенное на мокрое стекло, легко снять, сдвигая его в сторону, и трудно снять, отрывая вертикально вверх?

202. Каков радиус капилляра, если вода стоит в нем выше, чем в широком сосуде, на 4 см?

203. Стеклянная трубка имеет форму, показанную на рис. 47. Длина каждого звена 10 см, а внутренний радиус самой узкой части равен $r = 0,1$ мм. Трубку опускают вертикально в сосуд с водой,

а затем медленно, без толчков, поднимают. Как будет перемещаться уровень воды в трубке? $\alpha = 0,073 \text{ н/м}$.

204. При определении коэффициента поверхностного натяжения спирта методом отрыва каплей было отсчитано $n = 500$ капель, которые заняли объем $V = 4,5 \text{ см}^3$. В момент отрыва капля диаметр шейки, образующейся перед отрывом капли, $d = 1 \text{ мм}$. Вычислить коэффициент поверхностного натяжения спирта. Плотность спирта $\rho = 0,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

205. Какую работу против сил поверхностного натяжения надо произвести, чтобы выдуть мыльный пузырь диаметром $d = 4 \text{ см}$? Коэффициент поверхностного натяжения мыльной воды $\alpha = 0,045 \text{ н/м}$.

206. Железная балка наглухо заделана между двумя стенами при температуре 0°С . Какое давление она будет производить на стены при повышении температуры до $t = 20^\circ \text{С}$? $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, $E = 19,6 \times 10^4 \text{ н/мм}^2$. Почему длина балки не играет роли при выяснении величины давления?

207. Стальная проволока длиной $l = 2,8 \text{ м}$ и площадью поперечного сечения $S = 1 \text{ мм}^2$ укрепена одним концом в подвесном устройстве таким образом, что может легко совершать колебания в вертикальной плоскости. К проволоке подвешен груз весом $P = 70 \text{ н}$. Вытянутую проволоку с грузом отклоняют на угол 90° и отпускают. Определить удлинение проволоки в момент прохождения грузом нижней точки траектории. Весом проволоки пренебречь. $E = 19,6 \times 10^{10} \text{ н/м}^2$.

208. Железный стержень длиной $l = 50 \text{ см}$ и площадью поперечного сечения $S = 6,25 \text{ см}^2$ нагревают на $\Delta t = 400^\circ \text{С}$. Какую работу производит стержень при остывании? Модуль Юнга для железа $E = 19,6 \cdot 10^{10} \text{ н/м}^2$.

209. С какой силой давит на стены наглухо закрепленный в них железный стержень площадью поперечного сечения $S = 20 \text{ см}^2$ при повышении его температуры на 30°С ? Модуль Юнга для железа $E = 19,6 \cdot 10^{10} \text{ н/м}^2$.

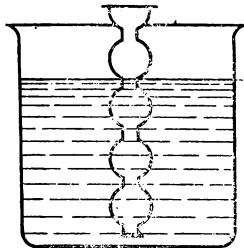


Рис. 47.

Глава XII. ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

§ 70. Развитие учения о природе теплоты

Тепловой энергией Солнца человечество пользовалось с древнейших времен. Затем люди начали пользоваться для бытовых нужд тепловой энергией, выделяемой при сгорании топлива. Следующий

шаг в применении тепловой энергии сделан во II в., когда Герон создал специальный механизм, приводимый в движение паром. Но этот механизм был несовершенен и остался без внимания со стороны научно-технической мысли. Лишь в XVI—XVIII вв. изобретатели Леонардо да Винчи, Папин, Ньюкомен и др. создали установки, в которых использовалась тепловая энергия для получения работы. Правда, и эти установки были несовершенными, а следовательно, и непригодными для непосредственного заводского применения.

Первая паровая машина, пригодная для промышленных целей, создана русским теплотехником-самоучкой И. И. Ползуновым в 1765 г. на Алтае; им построена первая в мире двухцилиндровая машина непрерывного действия. Однако в условиях феодально-крепостнической России изобретение Ползунова не получило широкого применения. В 1784 г. англичанин Д. Уатт построил более совершенную паровую машину, нашедшую широкое применение на заводах и фабриках, в сухопутном и водном транспорте. XVIII век назвали веком пара.

Одновременно с опытным изучением законов тепловых явлений шло и теоретическое осмысление их. С начала XVIII в. теплоту было принято считать особым невесомым веществом — так называемым *теплородом*. Считалось, что увеличение количества теплорода в теле вызывает повышение, а убыль — понижение температуры. Первую глубокую критику теплорода и новый взгляд на теплоту высказал великий русский ученый М. В. Ломоносов в 1744 г. в своей работе «Размышление о причине теплоты и холода».

Представления Ломоносова о теплоте получили полное признание лишь спустя 100 лет, благодаря работам Румфорда и Дэви. В 1798 г. Румфорд обратил внимание на выделение большого количества теплоты при сверлении пушечных жерл. Объяснить при помощи теории теплорода это явление не удалось, так как оказалось, что стружки имеют удельную теплоемкость не меньшую, а такую же, как и сплошной кусок металла. Румфорд пришел к выводу, что теплота сама по себе является формой движения. Еще с большей очевидностью эта мысль была подтверждена опытом Дэви в 1799 г., который наблюдал плавление льда теплом, выделившимся при трении одного куска льда о другой в вакууме, при температуре -2°C . Это явление также никак нельзя было объяснить на основании теории теплорода, потому что удельная теплоемкость воды больше удельной теплоемкости льда.

Еще Ломоносов ответил на вопрос, что такое теплота. Согласно его воззрениям, сущность теплоты — в движении частиц, образующих тело. По молекулярно-кинетической теории тело более высокой температуры отличается от тела более низкой температуры тем, что в первом средняя кинетическая энергия хаотического движения молекул больше. Повышение температуры тела означает увеличение сред-

ней скорости хаотического движения его атомов или молекул, понижение температуры, наоборот,— уменьшение средней скорости этого движения.

Во всех механизмах существует трение. Поэтому часть энергии расходуется на работу по преодолению сил трения. За счет этой работы нагреваются механизмы. Можно привести очень много примеров, подтверждающих возникновение теплоты за счет совершения работы. На основании сказанного тепловую энергию следует измерять теми же единицами, что и работу. В действительности только в Международной системе единиц СИ теплота измеряется теми же единицами, что и работа, т. е. *джоулями*. Раньше количество теплоты измеряли калориями и килокалориями. *Калория*— это количество теплоты, необходимое для нагревания 1 г воды на 1° С от 19,5 до 20,5° С. Единица, в 1000 раз большая калории, называется *килокалорией* (1 ккал = 1000 кал). Соотношение между килокалорией и единицами работы впервые установлено экспериментально Дж. Джоулем. Величина, измеряемая количеством работы, которое надо затратить, чтобы получить единицу количества теплоты, называется *механическим эквивалентом теплоты*. Он равен

$$I = 427 \text{ кгм/ккал} = 427 \cdot 9,8 \text{ дж/ккал} = 4,19 \text{ дж/кал.}$$

Величина, обратная механическому эквиваленту теплоты, называется *термическим эквивалентом работы* k . Он численно равен количеству теплоты, которое нужно затратить, чтобы получить единицу работы, $k = 0,24 \text{ кал/дж}$.

§ 71. К. п. д. тепловых двигателей

Тепловая энергия превращается в работу при помощи тепловых двигателей. Из тепловых двигателей вначале широкое практическое применение получили паровые машины и двигатели внутреннего сгорания, затем паровые турбины и реактивные двигатели. Все тепловые двигатели имеют следующее схематическое устройство: нагреватель, рабочее тело и холодильник. Таким образом, не все тепло, полученное от нагревателя, превращается в работу, часть его при этом обязательно должна передаваться холодильнику.

Если количество теплоты, полученной от нагревателя, равно Q_1 , а отданное холодильнику — Q_2 , то $Q_1 - Q_2$ — количество теплоты, отданной рабочим телом. Следовательно, только часть тепловой энергии в тепловых двигателях идет на работу. Для оценки экономичности такой отдачи тепловой энергии вводится понятие к. п. д. тепловых машин.

Коэффициентом полезного действия теплового двигателя называется отношение количества теплоты, израсходованной на совершение работы, к количеству теплоты, полученной от нагревателя:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

Французский инженер-теплотехник С. Карно теоретически показал, что к. п. д. теплового двигателя всегда меньше величины

$$\frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

где T_1 — температура нагревателя, а T_2 — температура холодильника. Таким образом, Карно показал, что к. п. д. теплового двигателя зависит от температуры нагревателя и холодильника и не зависит от рабочего тела. Отсюда следует, что для повышения к. п. д. теплового двигателя нужно повышать температуру нагревателя и понижать температуру холодильника. Только при $T_2 = 0$, т. е. при абсолютном нуле в холодильнике, к. п. д. был бы равен единице, при всех других температурах он меньше единицы.

Учитывая наличие трения в механизмах, совершающих работу за счет энергии, полученной от рабочего тела, приходим к выводу, что к. п. д. всякого механизма меньше к. п. д., найденного теоретически. К. п. д. тепловых машин с котлами сверхвысокого давления пара (до 170 ат) при высоких температурах (до 500—600° С) может достигать 35—40%.

§ 72. Работа при расширении газа

Сжатый газ, находящийся под поршнем в цилиндре, расширяясь, совершает работу. Рассчитаем работу, совершаемую газом при его расширении, если давление под поршнем остается постоянным. Пусть площадь поверхности поршня S , а давление газа p ; тогда сила, с которой газ давит на поршень, $F = pS$. Если при этом поршень переместится на расстояние h , то газ совершает работу

$$A = phS = p(V_2 - V_1),$$

где $hS = V_2 - V_1$ — изменение объема газа.

Зависимость между постоянным давлением и объемом можно изобразить графически. Процесс изменения объема газа при постоянном давлении называется *изобарическим*, а график — *изобарой*. Работа расширения при постоянном давлении численно равна площади, ограниченной графиком давления, осью абсцисс и ординатами, соответствующими начальному и конечному значению объема.

§ 73. Паровые двигатели

Паровыми двигателями называются машины, преобразующие тепловую энергию, полученную при сгорании топлива, в потенциальную энергию пара, а последнюю — в работу. В тепловых машинах вещество, производящее работу, называют *рабочим телом*, или *рабочим веществом*. В паровых двигателях рабочим веществом является пар: потенциальная энергия пара приводит в движение поршень.

Паровые двигатели делятся на *паровые машины* и *паровые турбины*. На рис. 48 приведена схема устройства одноцилиндровой паровой машины. Пар от парового котла по паропроводу *А* поступает

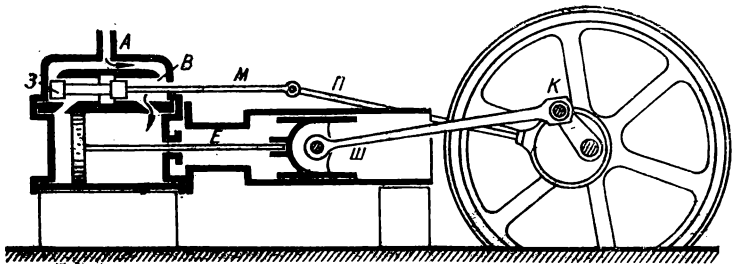


Рис. 48.

в парораспределительную коробку *В*, а оттуда в рабочий цилиндр *С* — попеременно то с одной, то с другой стороны поршня, в зависимости от положения золотника *З*. Золотник не может одновременно закрывать отверстие входа и выхода пара. В случае, изображенном на чертеже, пар поступает в правую часть цилиндра, толкая поршень влево, а отработанный пар вытесняется из левой части цилиндра и выходит через выхлопную трубу (на рисунке она не показана). Затем, наоборот, пар попадает в левую часть цилиндра и толкает поршень вправо, а отработанный пар выходит из правой части цилиндра.

При помощи штока *Е*, шатуна *Ш* и кривошипа *К* обратно-поступательное движение поршня превращается во вращательное движение вала махового колеса. Вращение махового колеса через приводные ремни передается шкивам рабочих станков. В свою очередь маховое колесо через передающий механизм *П* и *М* перемещает золотник, который поочередно впускает пар то с одной, то с другой стороны поршня. При движении поршня вправо золотник движется влево, и наоборот.

Пар перемещает поршень при постоянном давлении до перекрытия золотником. После перекрытия пара движение поршня продолжается за счет расширения пара. Работа пара в паровой машине изображается площадью фигуры, изображенной на рис. 49.

Отработанный пар выпускают в конденсатор; в последнем пар, охлаждаясь, превращается в воду, которая откачивается насосом снова в котел или используется для отопления.

Высокий к. п. д. современных паровых машин достигается повышением давления и многократным расширением пара, при котором он последовательно переходит из одного цилиндра машины в другой.

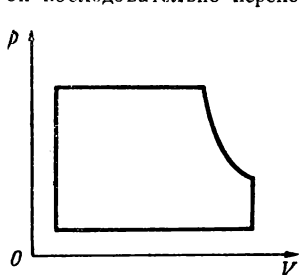


Рис. 49.

Кроме паровой машины, на практике чаще применяют паровые турбины. В паровых турбинах, в отличие от поршневых двигателей, где используется энергия упругого пара, используется кинетическая энергия струи вытекающего пара. Струя пара попадает непосредственно на лопасти колеса, приводя его во вращательное движение. Во многих случаях турбины трудно применять для непосредственного превращения тепловой энергии в механическую из-за большой их скорости в одном направлении.

Преимущества паровых турбин перед паровыми машинами следующие: при одинаковых с паровыми двигателями габаритах они более мощные, имеют большую скорость вращения, не используют пасовых и зубчатых передач; в них отсутствует возвратно-поступательное движение, они имеют более чистый конденсат. Паровые турбины имеют больший к. п. д., чем паровые двигатели (до 30%). В СССР построены турбины, развивающие мощность 500 тыс. и 800 тыс. *квт.*

К. п. д. паровой установки значительно повышается при применении отработанного пара для бытовых нужд, в частности для отопления зданий. Станции, использующие тепло отработанного пара, называются *теплоэлектроцентралями* (ТЭЦ). Централизованное снабжение жилых домов и промышленных предприятий энергией отработанного пара называется *теплофикацией*.

Задача. Снаряд массой $m = 6,5$ кг вылетает из ствола орудия со скоростью $v = 780$ м/сек. Определить, какой объем займет газ, образовавшийся при сгорании пороха. Давление в канале ствола считать постоянным. Атмосферное давление $p_1 = 10^5$ н/м², температура выходящих газов $t = 507^\circ\text{C}$, окружающей среды $t_1 = 27^\circ\text{C}$.

Решение. По условию задачи расширение газа происходит при постоянном давлении, а поэтому работа газа $A = pV$. По закону

сохранения и превращения энергии работа газа равна кинетической энергии снаряда при вылете из ствола:

$$pV = \frac{mv^2}{2}.$$

Подставим значение pV в уравнение состояния газа:

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_1 V_1}{T_1}, \quad \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{mv^2}{2T},$$

где p , V , T — параметры, определяющие состояние газа в стволе, а p_1 , V_1 , T_1 — после вылета из ствола. Отсюда находим

$$V_1 = \frac{mv^2 T_1}{2p_1 T}; \quad V_1 = 7,6 \text{ м}^3.$$

Ответ. Пороховые газы займут объем $7,6 \text{ м}^3$.

§ 74. Двигатели внутреннего сгорания

Двигатели, в которых отсутствуют котлы, а топливо сгорает в цилиндре, называются *двигателями внутреннего сгорания*. В таких двигателях используется жидкое или газообразное топливо. Жидкое топливо перед сжиганием распыляется в воздухе.

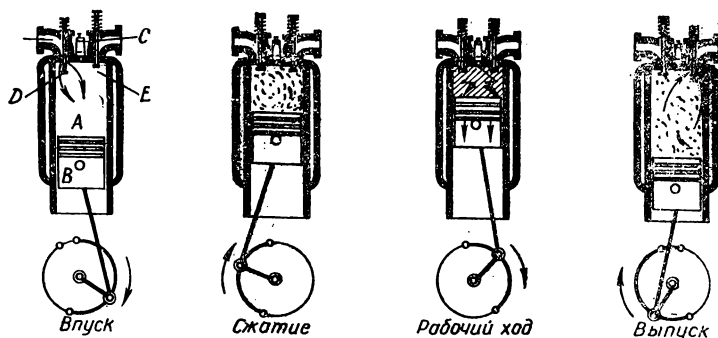


Рис. 50.

Рассмотрим принципиальное устройство четырехтактного двигателя внутреннего сгорания (рис. 50). Внутри цилиндра A может свободно перемещаться поршень B . В верхней части цилиндра нахо-

дятся два клапана: один (левый) для впуска горючей смеси, а другой (правый) — для удаления отработанных газов. Вблизи клапанов есть запальник (свеча С), назначение которого — воспламенять горючую смесь.

Крайние положения поршня в цилиндре называют *мертвыми точками*, из них поршень начинает возвратно-поступательное движение. Расстояние, которое проходит поршень от верхней до нижней мертвой точки, называется *ходом поршня*. В рассматриваемом двигателе полный цикл работы поршня состоит из четырех ходов, называемых *тактами*. В течение первого такта поршень идет вниз при открытом левом клапане (всасывание горючей смеси). Во втором такте при закрытых клапанах поршень движется вверх (сжатие горючей смеси). В третьем такте (клапаны остаются закрытыми) воспламеняется горючая смесь, и газ толкает поршень вниз (рабочий ход). В четвертом такте (правый клапан открыт, а левый закрыт) поршень идет вверх, выталкивая отработанный газ. Рабочим тактом является лишь третий такт.

Посредством кривошипного механизма поршень связан с валом, на котором находится маховое колесо. Благодаря инертности махового колеса осуществляются три нерабочих такта двигателя. Поршень двигателя соединен с шатуном. Шатун служит для передачи движения коленчатому валу.

Четырехтактные двигатели внутреннего сгорания применяются на тракторах, автомобилях, самолетах, пароходах и т. д.

Контрольные вопросы к главе «Тепловые двигатели»

- 1) Чему равна работа газа при изобарическом его расширении?
- 2) Кто изобрел первую паровую машину, пригодную для промышленных целей?
- 3) Какие существуют виды паровых двигателей?
- 4) Опишите действие паровой машины с золотником.
- 5) Каково устройство паровой турбины?
- 6) Каков к. п. д. паровых машин?
- 7) Каковы преимущества двигателя внутреннего сгорания в сравнении с паровой машиной?
- 8) На чем основан принцип устройства двигателей внутреннего сгорания?
- 9) Почему к. п. д. двигателей внутреннего сгорания больше, чем к. п. д. паровой машины?
- 10) Какую величину, найденную теоретически, не может превышать к. п. д. любой тепловой машины?

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Глава XIII. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

§ 75. Электризация тел. Электрический заряд

Еще в глубокой древности было известно, что янтарь, потертый о шерсть, приобретает способность притягивать мелкие предметы. В XVI в. английский врач Джильберт на основании ряда опытов установил, что аналогичным свойством обладают и многие другие вещества. Тела, которые после натирания приобретают способность притягивать легкие предметы, он назвал наэлектризованными (от греческого слова «электрон» — янтарь). В некоторых телах электрические заряды могут свободно перемещаться по всему их объему. Такие тела называются *проводниками*. К ним относятся все металлы в твердом и жидком состоянии, водные растворы солей, кислот, щелочей, расплавленные соли и газы в раскаленном состоянии.

В других телах, называемых *диэлектриками*, или *изоляторами*, электрические заряды, сообщаемые телу, остаются в тех же местах, в которые они были первоначально помещены. К диэлектрикам относятся янтарь, эбонит, каучук, фосфор, воздух и др. Кроме этого, существует еще группа веществ, называемых *полупроводниками*. При комнатной температуре полупроводники обладают хотя и очень малой, но все же заметной электропроводностью, т. е. способностью проводить электрический ток. С повышением температуры их электропроводность увеличивается и при достаточно высоких температурах становится весьма значительной. Полупроводники занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. К полупроводникам относятся селен, кремний, германий, закись меди и др.

Несмотря на обилие различных веществ в природе, существуют только два рода электрических зарядов: заряды, подобные возникающим на стекле, потертом о шелк, и заряды, подобные появляющимся на эбоните, потертом о мех. Первые из них получили название *положительных зарядов*, а вторые — *отрицательных*.

На основании ряда опытов было выяснено, что электрический заряд любого тела состоит из целого числа *элементарных зарядов*, равных $1,6 \cdot 10^{-19}$ к и представляющих собой атомы «электричества».

Наименьшая частица, обладающая отрицательным элементарным зарядом, называется *электроном*. Масса его $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг. Наименьшая устойчивая частица, обладающая положительным элементарным зарядом (равным заряду электрона), называется *протоном*. Масса протона в 1836 раз больше массы электрона: $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг. В настоящее время также известна частица с массой, равной массе электрона, и зарядом протона, называемая *позитроном*.

§ 76. Взаимодействие электрических зарядов. Электрическое поле

В теории электричества часто пользуются понятием *точечного заряда* — так называется заряд, сконцентрированный в точке. Практически за точечный заряд принимают заряженное тело, размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстояниями от него до других тел.

Французский физик Ш. Кулон установил закон взаимодействия электрических зарядов: два точечных заряда q_1 и q_2 , находящиеся в данной среде на расстоянии r один от другого, взаимодействуют с силой F , прямо пропорциональной произведению этих зарядов и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними. Итак,

$$F = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2},$$

где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц; ϵ — диэлектрическая проницаемость среды, показывающая, во сколько раз сила взаимодействия зарядов в данной среде меньше, чем в вакууме.

В системе единиц СГСЭ коэффициент k считается безразмерной величиной, равной 1. Здесь за единицу заряда принят заряд, который на равный себе заряд, находящийся в вакууме на расстоянии 1 см, действует с силой в 1 *дин*.

В системе СИ коэффициент k принимается равным

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0},$$

где ϵ_0 — величина, называемая *электрической постоянной*, которая равна $8,85 \cdot 10^{-12}$ ф/м. В этой системе величина ϵ называется *относительной диэлектрической проницаемостью*. В системе СИ закон Кулона запишется так:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}.$$

Заряд в системе СИ измеряется в кулонах:

$$1 \kappa = 3 \cdot 10^9 \text{ ед. СГСЭ.}$$

Единица количества электричества — *кулон* — устанавливается следующим образом. При прохождении электрического тока по проводнику через его поперечное сечение переносится количество электричества q , определяемое выражением

$$q = It,$$

где t — время прохождения электрического тока, I — сила тока. 1 *кулон* — это количество электричества, протекающее через поперечное сечение проводника в течение 1 *сек* при силе постоянного тока в 1 *а*. (В системе СИ кулон является производной единицей, основная единица — ампер.)

Выясним, каким образом получается в системе СИ значение для $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ ф/м}$. Для этого вычислим силу взаимодействия между двумя точечными зарядами в 1 κ , расположенными в вакууме на расстоянии 1 *м* один от другого (в системе СГСЭ):

$$\begin{aligned} F &= \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} = \frac{1 \kappa \cdot 1 \kappa}{(1 \text{ м})^2} = \frac{(3 \cdot 10^9 \text{ ед. СГСЭ})^2}{(100 \text{ см})^2} = \\ &= \frac{9 \cdot 10^{18}}{10^4} \text{ дин} = 9 \cdot 10^{14} \text{ дин} = 9 \cdot 10^9 \text{ н.} \end{aligned}$$

В системе СИ сила взаимодействия определяется по иной формуле:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}.$$

Отсюда найдем

$$\epsilon_0 = \frac{q_1 q_2}{4\pi F r^2}.$$

Подставляя значения $F = 9 \cdot 10^9 \text{ н}$; $q_1 = q_2 = 1 \kappa$, $r = 1 \text{ м}$, получим

$$\begin{aligned} \epsilon_0 &= \frac{(1 \kappa)^2}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9 \text{ н} (1 \text{ м})^2} = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \cdot \frac{\kappa^2}{\text{н} \cdot \text{м}^2} = \\ &= 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\kappa^2}{\text{дж} \cdot \text{м}} = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ ф/м.} \end{aligned}$$

Отметим, что закон Кулона выражает силу взаимодействия между покоящимися точечными зарядами. Силы взаимодействия между электрическими зарядами, описываемые законом Кулона, называют *кулоновскими силами*.

Задача 1. Два шара, весом $P = 2 \cdot 10^{-2}$ н каждый, подвешены в воздухе на тонких шелковых нитях длиной $l = 2$ м. Шарам сообщают одноименные заряды $q = 5 \cdot 10^{-8}$ к; при этом они расходятся. Определить расстояние между центрами шаров (рис. 51).

Решение. К каждому шару приложено три силы: вес шара P , кулоновская сила отталкивания F и натяжение нити T . В положении равновесия равнодействующая этих сил должна быть равна нулю. Это условие выполняется, если равнодействующая сил T и P , равная F_1 , уравновешивается силой кулоновского взаимодействия F , т. е. $F_1 = F$.

Из подобия $\triangle OAB$ и $\triangle CBD$ следует, что

$$\frac{OB}{AO} = \frac{BD}{CB}.$$

Для малых углов отклонения α можно принять, что $OA = AB$; тогда

$$\text{получим: } \frac{r}{2} : l = \frac{F_1}{P}, \text{ или } r = 2l \frac{F_1}{P}.$$

На основании закона Кулона

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2};$$

принимая во внимание, что $F_1 = F$, для нахождения r получим выражение:

$$r = \frac{2lq_1q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2 P};$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{2lq_1q_2}{4\pi\epsilon_0 P}}.$$

Подставляя численные значения, получим:

$$r = 0,16 \sqrt[3]{\frac{M^2 \cdot K^2 \cdot \epsilon}{K \cdot H}}.$$

Рассмотрим отдельно размерность

$$\sqrt[3]{\frac{M^2 \cdot K^2 \cdot \epsilon}{K \cdot H}} = \sqrt[3]{\frac{M^2 \cdot \partial \mathcal{E} \cdot K}{K \cdot H}} = M.$$

Следовательно, $r = 0,16$ м.

Ответ. Расстояние между центрами шаров равно 0,16 м.

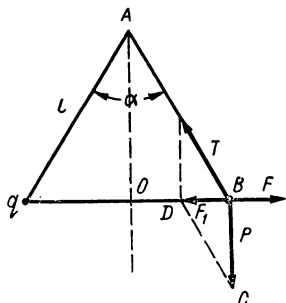


Рис. 51.

Задача 2. Шарик массой $m = 3 \cdot 10^{-3}$ кг, имеющий заряд $q_1 = 2 \cdot 10^{-8}$ Кл, подвешен в воздухе на тонкой непроводящей нити. Определить натяжение нити, если внизу, на расстоянии $r = 0,1$ м расположен второй заряд $q_2 = -1,5 \cdot 10^{-7}$ Кл. Ускорение силы тяжести считать равным $g = 9,8$ м/сек².

Решение. Натяжение нити определится как сила, уравнивающая две силы — вес тела P и электрическую силу притяжения зарядов F , т. е. $T = P + F$. По закону Кулона

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}; \text{ отсюда } T \approx 3,21 \cdot 10^{-2} \text{ н.}$$

Ответ. Натяжение нити составляет $3,21 \cdot 10^{-2}$ н.

Задача 3. Во сколько раз сила взаимного притяжения между двумя протонами, обусловленная силами тяготения, меньше электрической силы их отталкивания, если заряд протона $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, а его масса $m = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг? Гравитационная постоянная $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11}$ м³/кг · сек².

Решение. Сила взаимного притяжения определится выражением

$$F_T = \gamma \frac{m^2}{r^2}.$$

Кулоновская сила отталкивания будет равна

$$F_K = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}.$$

Отсюда находим

$$\frac{F_K}{F_T} = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 \gamma m^2}; \quad \frac{F_K}{F_T} = 1,35 \cdot 10^{36} \text{ раз.}$$

Ответ. Электрическая сила отталкивания зарядов в $1,35 \cdot 10^{36}$ раз больше, чем сила их взаимного притяжения.

§ 77. Электроскоп. Распределение электрических зарядов на поверхности проводника

Явление отталкивания одноименных электрических зарядов было использовано русскими учеными М. В. Ломоносовым и Г. В. Рихманом при изобретении электроскопа — прибора для обнаружения электрического заряда и установления его знака.

Простейший электроскоп представляет собой стеклянный баллон, снабженный пробкой. В пробку вставляется металлический стержень, скрепленный с легкими металлическими или бумажными листочками.

При соприкосновении заряженного тела со стержнем электроскопа часть заряда тела перейдет на электроскоп и легкие листочки разойдутся на некоторый угол под действием силы отталкивания между одноименными зарядами на них.

Если поднести теперь к электроскопу заряд того же знака, что и заряд на его листочках, то они разойдутся еще больше. Если же поднести заряд противоположного знака, то листочки электроскопа сначала опадут, а потом вновь разойдутся (последнее произойдет в том случае, если заряд, вторично наносимый на электроскоп, больше, чем ранее сообщенный).

При сообщении заряда телу, изготовленному из изолятора (или при электризации его трением), заряды остаются в тех местах, на которые их нанесли. Следовательно, распределение зарядов на изоляторе может быть произвольным.

В проводниках картина распределения зарядов иная. Благодаря силам отталкивания одноименные заряды будут перемещаться до тех пор, пока не займут крайние возможные положения на проводнике.

Чтобы судить о характере распределения зарядов на поверхности тела, вводят понятие о так называемой поверхностной плотности зарядов σ . *Поверхностной плотностью зарядов* называется величина, определяемая зарядом, приходящимся на единицу поверхности тела, т. е.

$$\sigma = \frac{q}{S}.$$

При различном распределении зарядов на поверхности тела различна и их поверхностная плотность: в местах скопления зарядов она будет большей, и наоборот.

Часто говорят о средней поверхностной плотности зарядов. Она определяется отношением заряда, который сообщен всему телу, к его поверхности. Если заряды на теле распределены равномерно, то средняя плотность равна поверхностной плотности зарядов в каждой точке поверхности тела.

Пользуясь электроскопом, можно выяснить, как изменяется поверхностная плотность зарядов для различных точек поверхности проводника. Прикасаясь к различным частям заряженного проводника маленьким металлическим шариком, укрепленным на ручке из какого-нибудь непроводящего вещества, и передавая заряд шарика электроскопу, можно установить следующие закономерности распределения зарядов на поверхности проводника.

1. Если тело представляет собой полый металлический шар, то заряды равномерно распределяются на внешней поверхности шара; на внутренней поверхности шара заряд равен нулю.

2. Если поверхность проводника плоская, то заряды распределяются на ней равномерно.

3. Если поверхность проводника не плоская, а имеет выпуклые и вогнутые места, то поверхностная плотность зарядов больше на выпуклых местах и меньше на вогнутых.

4. Максимальной плотность зарядов будет на острие проводника.

Задача. Полому металлическому шару радиусом $R = 5$ см сообщен заряд $q = 10^{-9}$ к. Определить поверхностную плотность зарядов на внутренней и внешней поверхности.

Решение. Поверхностная плотность зарядов на внутренней поверхности шара равна нулю. Для внешней поверхности получим (весь заряд распределяется на ней):

$$\sigma = \frac{q}{S}; S = 4\pi R^2;$$

$$\sigma = \frac{q}{4\pi R^2}; \sigma = 3,2 \cdot 10^{-8} \text{ к/м}^2.$$

Отв. $\sigma_{\text{внутр}} = 0$; $\sigma_{\text{внешн}} = 3,2 \cdot 10^{-8} \text{ (к/м}^2\text{)}.$

§ 78. Явление электростатической индукции

Производя опыты с электроскопом, можно наблюдать следующие явления. Если к шарiku электроскопа поднести какое-либо заряженное тело, то прежде чем оно прикоснется к шарiku, листочки электроскопа разойдутся, т. е. электроскоп зарядится. Однако если к электроскопу не прикасаться, то его заряд обнаруживается лишь тогда, когда заряженное тело находится вблизи электроскопа, и исчезает одновременно с удалением заряженного тела.

Следовательно, близость заряженного тела влияет на электрическое состояние другого тела. Рассмотренное явление называется *электростатической индукцией*, или *электризацией через влияние*.

Через влияние всегда возбуждаются одновременно заряды противоположных знаков, но в одинаковых количествах. Оба наведенных заряда снова взаимно нейтрализуются при удалении влияющего тела А (рис. 52, а). Однако если до удаления заряженного тела А

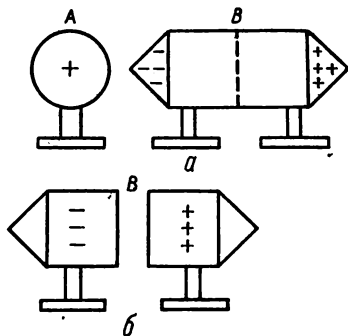


Рис. 52.

разделить проводник B на две части (рис. 52, б), то заряды на них сохранятся и после удаления заряженного тела A .

Явление электростатической индукции объясняется следующим образом. В проводнике B имеются заряды обоих знаков. При поднесении положительно заряженного тела A свободные электроны, которые имеются в проводнике B , притягиваются к телу A и перемещаются к одному концу, на другом же конце оказывается (в результате этого перемещения) недостаток электронов.

Поэтому на концах проводника B возникают заряды разных знаков. При удалении заряженного тела A на заряды в проводнике B перестают действовать внешние силы, заряды «перемешиваются», нейтрализуются, и весь проводник B снова становится нейтральным.

Если же проводник B разделить на две части до того, как тело A будет удалено, то заряды уже не смогут «перемещаться», и обе разделенные части проводника B останутся заряженными, причем заряды на них будут противоположных знаков.

§ 79. Электрическое поле. Напряженность электрического поля

Пусть в некоторой точке пространства находится электрический заряд q . Поместим на некотором расстоянии от него в точке A другой заряд q_0 . При этом полагаем заряд q_0 столь малым, что он не изменяет ни величины, ни положения заряда q . Этот заряд назовем пробным. Тогда пробный заряд испытывает либо силу притяжения, либо силу отталкивания, в зависимости от его знака.

Опыт показывает, что величина силы, действующей на пробный заряд, зависит от положения точки A относительно заряда q . Эта сила будет меняться при перемещении пробного заряда из одной точки пространства в другую. Если в точках пространства около заряда q поместить пробный заряд q_0 и этот заряд будет испытывать действие силы, то говорят, что в этом пространстве существует *электрическое поле*, созданное зарядом q .

Электрическое поле материально. Оно является определенной формой материи, характеризующейся тем, что в каждой точке поля на заряд q_0 , помещенный в эту точку, действует электрическая сила. Различные поля (например, электрическое или поле силы тяжести) и вещества представляют собой две основные формы материи — поле и вещество.

Заряд q , который создает электрическое поле, называется *источником поля*. Силовой характеристикой поля в каждой его точке является величина, называемая *напряженностью электрического поля*.

Рассмотрим точечный электрический заряд q , будем вносить в поле, создаваемое им, пробный заряд q_0 . На этот пробный заряд дей-

ствуется сила F , разная для различных точек поля. Согласно закону Кулона, сила F пропорциональна величине пробного заряда q_0 . Если же взять отношение силы к величине этого заряда, то величина $\frac{F}{q_0}$ уже не зависит от выбора пробного заряда и характеризует электрическое поле в той точке, где находится пробный заряд. Величина $\frac{F}{q_0}$ есть напряженность поля. Итак, *напряженностью электрического поля называется физическая величина, характеризующая силой, действующей на единицу положительного заряда, помещенного в данную точку электрического поля.*

Таким образом, напряженность электрического поля

$$E = \frac{F}{q_0}.$$

Поле, в каждой точке которого напряженность одинакова, называется *однородным полем*, а поле, напряженность которого меняется при переходе от одной точки к другой, — *неоднородным*.

Найдем напряженность поля точечного заряда q . Поместим в точке A пробный заряд q_0 . Тогда сила, действующая на этот заряд, определится по закону Кулона:

$$F = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}.$$

Напряженность поля в точке A определяется отношением этой силы к заряду q_0 , т. е.

$$E = \frac{F}{q_0}; \quad E = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}.$$

Из полученного выражения видно, что для разных значений r величина напряженности электрического поля E неодинакова. Следовательно, поле точечного заряда является неоднородным.

Напряженность электрического поля есть величина векторная, совпадающая по направлению с направлением силы, которая действует на положительный пробный заряд, находящийся в данной точке поля.

Если электрическое поле создается не одним зарядом, а несколькими, то напряженность его определится как геометрическая сумма напряженностей полей, создаваемых отдельными зарядами:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n.$$

Для удобства графического изображения электрического поля введено понятие о силовых линиях. *Силовой линией* электрического

поля называется линия, касательная к которой в каждой точке совпадает с вектором напряженности поля в данной точке. Силовые линии электростатического поля имеют начало и конец. Силовая линия начинается на положительном заряде и оканчивается на отрицательном.

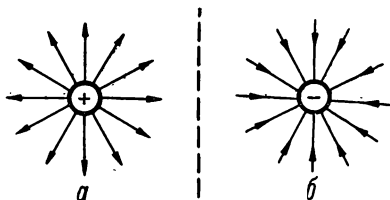


Рис. 53.

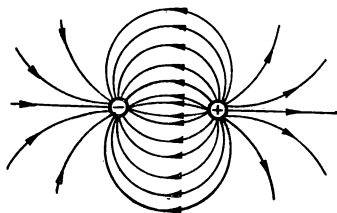


Рис. 54.

Пользуясь понятием силовых линий, можно определить напряженность электрического поля в данной точке следующим образом. Напряженность электрического поля численно равна числу силовых линий, проходящих через единицу поверхности, расположенную в этой точке поля перпендикулярно силовым линиям. Это число силовых линий называют *густотой силовых линий*.

Рассмотрим картины силовых линий полей, создаваемых различными системами зарядов.

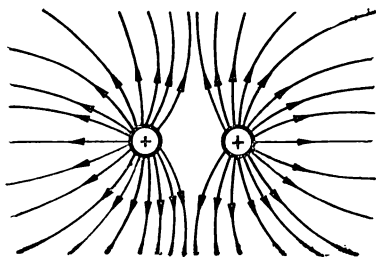


Рис. 55.

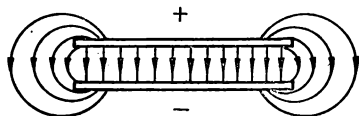


Рис. 56.

1. *Поле уединенного положительного и отрицательного зарядов.* В этом случае принимают, что соответствующий отрицательный или положительный заряд отнесен в бесконечность (рис. 53, а, б).

2. *Поле диполя*, т. е. системы двух зарядов, равных по величине и противоположных по знаку (рис. 54).

3. *Поле двух одноименных зарядов* (рис. 55).

4. Поле между противоположно заряженными пластинами (рис. 56).

Задача 1. Заряды $q_1 = 2q$ и $q_2 = -q$ находятся на расстоянии $r = 0,1$ м один от другого в пустоте (рис. 57). На каком расстоянии от заряда q_2 по линии центров напряженность поля равна нулю?

Решение. Напряженность электрического поля в точке А, находящейся на расстоянии x от заряда q_2 , равна геометрической сумме напряженностей электрических полей, создаваемых каждым зарядом в отдельности:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2;$$

$$E_1 = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 (r+x)^2}; \quad E_2 = \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 x^2}.$$

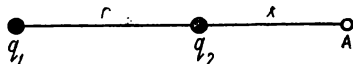


Рис. 57.

Поскольку по условию результирующая напряженность в точке О равна нулю, то $\vec{E} = 0$. Отсюда $E_1 = E_2$, или

$$\frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 (x+r)^2} - \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 x^2} = 0;$$

$$\frac{q_1}{(r+x)^2} - \frac{q_2}{x^2} = 0.$$

Подставляя в последнюю формулу значения величин, заданные в условии задачи, получим:

$$\frac{2q}{(0,1+x)^2} - \frac{q}{x^2} = 0;$$

$$2x^2 - (0,1+x)^2 = 0; \quad x^2 - 0,2x - 0,01 = 0;$$

$$x = 0,1 \pm \sqrt{0,01 + 0,01} = 0,1 \pm 0,141;$$

$$x_1 = 0,24 \text{ м}; \quad x_2 = -0,04 \text{ м}.$$

Корень x_2 физического смысла не имеет, так как на линии между зарядами напряженность электрического поля не может быть равна нулю. Следовательно, решением задачи является значение $x_1 = 0,24$ м.

Ответ. Напряженность поля равна нулю на расстоянии 0,24 м от заряда q_2 .

Задача 2. В вершинах квадрата со стороной $a = 10$ см расположены три одинаковых положительных заряда и один отрицательный величиной по $5 \cdot 10^{-7}$ К (рис. 58). Определить напряженность поля в центре квадрата, если заряды находятся в воздухе ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м).

Решение. Напряженность поля в центре O квадрата равна векторной сумме напряженностей электрических полей, создаваемых каждым зарядом в отдельности, т. е. $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \vec{E}_4$. Поскольку все заряды одинаковы по величине и находятся на равном расстоянии от точки O , то численные значения напряженностей E_1 , E_2 , E_3 и E_4 равны. Величина их определится по формуле

$$E_1 = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r^2},$$

где r — расстояние от вершины до центра квадрата. Выражая r через сторону a квадрата, найдем $r^2 = \frac{a^2}{2}$. Подставляя значение r^2 в выражение для E_1 , получим:

$$E_1 = \frac{2q_1}{4\pi\epsilon_0 a^2}.$$

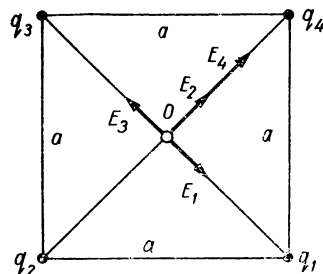


Рис. 58.

Так как напряженности E_1 и E_3 равны, но противоположны по направлению, то напряженность результирующего поля E определится окончательно как сумма напряженностей E_2 и E_4 , т. е. $E = E_2 + E_4$; или, принимая во внимание, что $E_2 = E_4 = E_1$, найдем

$$E = 2 \frac{2q_1}{4\pi\epsilon_0 a^2} = \frac{q_1}{\pi\epsilon_0 a^2}; \quad E = 1,8 \cdot 10^6 \text{ в/м.}$$

Ответ. В центре квадрата напряженность поля $E = 1,8 \times 10^6 \text{ в/м.}$

§ 80. Понятие о потенциале и разности потенциалов

Пусть некоторому телу сообщается заряд q . Этот процесс связан с совершением некоторой работы. Действительно, можно считать, что заряд q сообщается телу постепенно, порциями. Каждая порция (кроме первой) подносится к телу в поле, созданном ранее перенесенными порциями, следовательно, на эти порции электричества будет действовать сила со стороны электрического поля. Поэтому внешние силы, перемещающие заряд, будут выполнять работу. Само же заряженное тело при этом приобретет энергию, подобно тому как тело, поднятое над поверхностью Земли, получает некоторый запас потенциальной энергии.

Таким образом, за счет работы, совершаемой при зарядке тела, последнее приобретает энергию в виде *энергии электрического поля*. Чем больше заряд сообщается телу, тем большей будет работа, идущая на его зарядку, а значит, тем большей будет и энергия электрического поля заряженного тела.

В свою очередь заряд, внесенный в любую точку поля, также обладает энергией. Величина, численно равная энергии, которой обладает единичный точечный заряд, внесенный в некоторую точку поля, является характеристикой поля в данной точке и называется *потенциалом*. Обозначается он буквой φ :

$$\varphi = \frac{w}{q}.$$

Потенциал измеряется работой, которую совершают внешние силы при перемещении единичного положительного заряда из бесконечности (где потенциал условно принимается равным нулю) в данную точку поля. Потенциал представляет собой скалярную величину.

Разностью потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ называется величина, измеряемая работой перемещения единичного положительного заряда из одной точки поля в другую. Разность потенциалов не зависит от выбора точки нулевого потенциала, как это имеет место при определении потенциала точки.

Единицей измерения потенциала и разности потенциалов в системе СИ является *вольт* (определение единицы см. в разделе «Электрический ток»).

Работа, совершаемая при перемещении заряда q из точки поля с потенциалом φ_1 в точку с потенциалом φ_2 , определяется выражением

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Потенциал точки поля, создаваемого точечным зарядом или равномерно заряженным шаром, определяется по формуле

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r},$$

где r — расстояние от точечного заряда до данной точки поля, или расстояние (в случае заряженного шара) от центра шара до данной точки поля.

Таким образом, электрическое поле в каждой точке можно характеризовать или напряженностью, которая является *силовой характеристикой* поля, или потенциалом, являющимся *энергетической характеристикой*.

Связь между разностью потенциалов и напряженностью электрического поля в случае однородного поля устанавливается следующим образом. Пусть расстояние между двумя какими-либо точками этого

поля, взятое в направлении силовой линии поля, равно d . Тогда при перемещении пробного заряда q_0 из одной точки поля в другую совершится работа A , которую можно определить двояко:

$$A = Fd = Eq_0d, \text{ или } A = q_0(\varphi_1 - \varphi_2),$$

где $\varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi$ — разность потенциалов между этими точками. Отсюда

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} = \frac{\Delta\varphi}{d}.$$

Задача. Определить количество электронов, образующих заряд пылинки весом $P = 5 \cdot 10^{-9} \text{ Г}$, если она находится в равновесии в электрическом поле, создаваемом двумя заряженными пластинами. Разность потенциалов между пластинами $\varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi = 3000 \text{ в}$, а расстояние между ними $d = 2 \text{ см}$. Заряд одного электрона равен $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ К}$.

Решение. Пылинка находится в равновесии, если равнодействующая сил, действующих на нее, равна нулю, т. е. $P - F = 0$, или $P = F$. Пусть заряд пылинки q , тогда электрическая сила, действующая на нее, $F = qE$; поскольку

$$E = \frac{\Delta\varphi}{d}, \text{ то } F = q \frac{\Delta\varphi}{d}.$$

Из условия равновесия находим

$$P = q \frac{\Delta\varphi}{d},$$

откуда

$$q = \frac{Pd}{\Delta\varphi}.$$

Подставив в полученное выражение значения величин в системе СИ, получим

$$q = \frac{5 \cdot 10^{-9} \cdot 9,8 \text{ Н} \cdot 0,02 \text{ м}}{3000 \text{ в}} = 3,27 \cdot 10^{-16} \text{ К}.$$

Количество электронов, образующих такой заряд пылинки, определим, разделив ее заряд на заряд одного электрона:

$$n = \frac{q}{e}; \quad n = 2,04 \cdot 10^3.$$

Ответ. На пылинке имеется $2,04 \cdot 10^3$ избыточных электронов, которые образуют ее заряд.

§ 81. Электроемкость. Конденсаторы

Как уже указывалось, заряд, сообщаемый телу, и потенциал связаны между собой. Чем больший заряд сообщен телу, тем большим будет и потенциал тела. Эту взаимосвязь можно выразить соотношением $q = C\varphi$, где C — электроемкость. Электроемкостью называется величина, определяемая зарядом, который нужно сообщить проводнику, чтобы изменить его потенциал на единицу:

$$C = \frac{q}{\varphi}.$$

Электроемкость проводника зависит от тел, окружающих его. Действительно, электроемкость проводника определяется отношением его заряда к потенциалу; потенциал же проводника зависит не только от его заряда, но и от зарядов на всех окружающих телах. Если окружающие тела даже и не были предварительно заряжены, то при зарядке данного проводника на них возникнут индуцированные электрические заряды и, следовательно, изменится потенциал проводника.

Говоря об электроемкости проводника, обычно считают, что все тела удалены от него на достаточно большие расстояния и практически не влияют на его электроемкость; тогда говорят, что проводник является уединенным. Электроемкость такого проводника зависит от его формы и размеров, но не от материала.

В системе СИ электроемкость измеряется в фарадах. Фарада — это электроемкость такого проводника, потенциал которого изменяется на 1 в при сообщении ему заряда в 1 к.

Фарада — очень большая величина. Поэтому на практике пользуются единицами, равными ее долям: микрофарадой (мкф) и пикофарадой (пф), которые определяются следующим образом:

$$1 \text{ мкф} = 10^{-6} \text{ ф}; \quad 1 \text{ пф} = 10^{-12} \text{ ф}.$$

Уединенные проводники обладают малой электроемкостью. Огромный шар таких размеров, как Земля, имеет электроемкость всего лишь 700 мкф .

На практике бывает потребность в устройствах, которые при относительно небольшом потенциале окружающих тел накапливали бы на себе (конденсировали) заметные по величине заряды. Такие устройства называются *конденсаторами*.

Образуют конденсатор два проводника, изолированные один от другого и находящиеся на достаточно близком расстоянии (это расстояние должно быть малым по сравнению с размерами проводников). Проводники, образующие конденсатор, представляют собой такую систему, в которой силовые линии, выходящие из одного проводника, заканчиваются на другом. Эти проводники называют *обкладками конденсатора*.

При зарядке конденсатора проводники, его образующие, получают равные по величине, но противоположные по знаку заряды.

Наиболее распространенным является плоский конденсатор, состоящий из двух параллельных пластин, разделенных изолятором. Поле, создаваемое зарядами на пластинах, сосредоточено лишь между пластинами конденсатора. Во внешнем пространстве оно практически отсутствует, и на внешних телах, окружающих конденсатор, не возникают индуцированные заряды. Поэтому емкость конденсатора практически не зависит от окружающих тел. Это утверждение справедливо не только для плоского, но и для всякого другого конденсатора.

Емкостью конденсатора называется величина, определяемая соотношением

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2},$$

где q — заряд, находящийся на каждой из пластин; $\varphi_1 - \varphi_2$ — разность потенциалов между пластинами.

Емкость плоского конденсатора вычисляется по формуле

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d},$$

где S — площадь пластин конденсатора; d — расстояние между ними; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость вещества, находящегося между пластинами.

Существуют и иные виды конденсаторов — сферический, цилиндрический и др. Сферический конденсатор представляет собой систему двух концентрических сфер. Цилиндрический конденсатор состоит из двух коаксиальных цилиндров. Пространство между сферами и цилиндрами, образующими обкладки конденсатора, заполняется каким-либо диэлектриком.

Емкость сферического конденсатора определяется по формуле

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon \frac{R_1 \cdot R_2}{R_2 - R_1},$$

где R_1 и R_2 — радиусы внутренней и внешней обкладок.

Если $R_2 \rightarrow \infty$, то получаем формулу для емкости уединенного шара (положив $R_1 = R$):

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon R.$$

Емкость цилиндрического конденсатора

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon l}{\ln \frac{R_2}{R_1}},$$

где R_1 и R_2 — радиусы обкладок, l — длина обкладок.

Конденсаторы находят широкое применение в технике связи, радиотехнике, электротехнике (например, в цепях переменного тока). В зависимости от своего назначения они подразделяются на конденсаторы постоянной емкости и конденсаторы переменной емкости. Наиболее распространен переменный воздушный конденсатор, обычно устанавливаемый в контурах настройки радиоприемников. Такой конденсатор состоит из двух систем пластин — неподвижных и подвижных (вращающихся), которые могут вдвигаться в неподвижные пластины, не соприкасаясь с ними. Емкость конденсатора изменяется за счет изменения действительной рабочей площади его пластин.

Задача 1. Плоский конденсатор зарядили до разности потенциалов $\Delta\varphi = 600$ в и отключили от источника тока. После этого пластины конденсатора были сближены таким образом, что расстояние между ними уменьшилось вдвое. Определить разность потенциалов $\Delta\varphi_1$ между пластинами.

Решение. Разность потенциалов между пластинами конденсатора, заряд на пластинах и емкость конденсатора связаны соотношением $\Delta\varphi = \frac{q}{C}$. При изменении расстояния между пластинами заряд на них остается неизменным (конденсатор отключен от источника тока), а изменяется только емкость. Учитывая, что емкость плоского конденсатора

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d},$$

определяем

$$\Delta\varphi = \frac{qd}{\epsilon\epsilon_0 S} \quad \text{и} \quad \Delta\varphi_1 = \frac{qd_1}{\epsilon\epsilon_0 S}.$$

Разделив $\Delta\varphi$ на $\Delta\varphi_1$, получим: $\frac{\Delta\varphi}{\Delta\varphi_1} = \frac{d}{d_1}$; отсюда

$$\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi \frac{d_1}{d} = \frac{\Delta\varphi}{2}; \quad \Delta\varphi_1 = 300 \text{ в.}$$

Ответ. Разность потенциалов между пластинами конденсатора равна 300 в.

Задача 2. Расстояние между пластинами управляющего конденсатора электроннолучевой трубки $d = 16$ мм, длина пластин $l = 3$ см. На какое расстояние s сместится электрон, влетающий в конденсатор со скоростью $v_0 = 1,8 \cdot 10^8$ м/сек параллельно пластин и (рис. 59), к моменту выхода из конденсатора, если на пластины подано напряжение $\Delta\varphi = 4,5$ в? Масса электрона $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг; заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ к.

Решение. Напряженность поля между пластинами заряженного конденсатора определяется по формуле $E = \frac{\Delta\varphi}{d}$. При движении электрона между пластинами конденсатора на него действует сила

$$F = Ee = \frac{\Delta\varphi \cdot e}{d},$$

под действием которой он получает ускорение

$$a = \frac{F}{m} = \frac{\Delta\varphi \cdot e}{d \cdot m}.$$

За время t , в течение которого электрон движется внутри конденсатора, он пройдет в вертикальном направлении путь

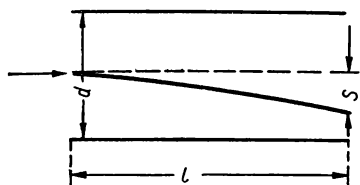


Рис. 59.

$$s = \frac{at^2}{2} = \frac{\Delta\varphi \cdot e}{2d \cdot m} \cdot t^2.$$

Время движения t определяем из соотношения $t = \frac{l}{v_0}$. Следовательно,

$$s = \frac{\Delta\varphi \cdot e \cdot l^2}{2d \cdot m \cdot v_0^2};$$

$$s = \frac{4,0 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} (3 \cdot 10^{-2})^2 2 \cdot \kappa \cdot \text{м}^2 \cdot \text{сек}^2}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-2} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} (1,8 \cdot 10^6)^2 \text{м} \cdot \kappa\text{г} \cdot \text{м}^2} = 6,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Отв е т. Электрон сместится на расстояние $6,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Контрольные вопросы к главе «Электростатика»

- 1) Как взаимодействуют одноименные и разноименные заряды?
- 2) Запишите закон Кулона в системе СИ и назовите все величины, входящие в его формулу.
- 3) Как простейшим способом обнаружить, заряжено тело или нет?
- 4) Можно ли с помощью незаряженного электроскопа различить знак зарядов?
- 5) Как распределяется электричество на поверхности проводника?
- 6) Каким образом можно обнаружить электрическое поле, создаваемое зарядом?
- 7) Какая величина называется напряженностью электрического поля?

8) Что называется силовой линией? Где начинается и где кончается силовая линия электростатического поля?

9) Какая физическая величина называется потенциалом?

10) Что такое емкость и в каких единицах она измеряется?

11) Какой прибор называется конденсатором? Как определяется емкость плоского конденсатора?

Вопросы и задачи к главе «Электростатика»

210. Создаются ли заряды при электризации двух тел трением?

211. Почему ворсинки и пылинки могут прилипать к одежде при чистке ее щеткой?

212. Во сколько раз изменится сила притяжения или отталкивания между двумя заряженными телами, если расстояние между ними или заряд одного из них увеличить вдвое?

213. Что произойдет с металлическим шариком, подвешенным на шелковой нити между разноименно заряженными шариками, если его привести в соприкосновение с одним из последних?

214. Два одинаковых металлических шарика, удаленные друг от друга на определенное расстояние, в первый раз заряжены разноименными зарядами, а во второй раз — такими же по величине одноименными зарядами. Какая сила взаимодействия между зарядами больше по величине — сила притяжения или сила отталкивания? Ответ объяснить.

215. Как объяснить тот факт, что при приближении наэлектризованной стеклянной палочки к маленькой бумажке последняя вначале притягивается, а затем отталкивается.

216. Построить график зависимости напряженности электрического поля, создаваемого точечным зарядом, от расстояния.

217. Два маленьких шарика весом $P = 5 \cdot 10^{-5}$ кг каждый висят на шелковых нитях длиной $l = 6$ см, закрепленных в одной точке. Когда шарикам сообщили одинаковые по величине и знаку электрические заряды q , нити разошлись на угол $\alpha = 60^\circ$. Определить величину заряда q .

218. На каком расстоянии от центра ядра находится электрон в атоме водорода, если скорость его движения по орбите $v = 2,2 \times 10^6$ м/сек?

219. Два точечных заряда, находясь в воздухе на расстоянии 20 см друг от друга, взаимодействуют с некоторой силой. На каком расстоянии нужно поместить эти заряды в масле, чтобы получить ту же силу взаимодействия? Относительная диэлектрическая проницаемость масла $\epsilon = 5$.

220. Какова напряженность электрического поля, созданного двумя зарядами $q_1 = 6 \cdot 10^{-9}$ К и $q_2 = 1,07 \cdot 10^{-8}$ К, в точке А, находящейся на расстояниях $r_1 = 0,03$ м и $r_2 = 0,04$ м от зарядов? Заряды расположены друг от друга на расстоянии $r = 0,05$ м. Заряды и точка А находятся в среде с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2$.

221. Определить напряженность электрического поля на расстоянии $2 \cdot 10^{-10}$ м от одновалентного иона. Заряд иона считать точечным.

222. Два заряда $q_1 = 1,33 \cdot 10^{-7}$ К и $q_2 = -1,33 \cdot 10^{-7}$ К расположены в спирте на расстоянии 20 см друг от друга. Какова напряженность электрического поля в точке, находящейся на расстоянии 8 см от положительного заряда по линии, соединяющей центры зарядов?

223. Заряженная пылинка весом $P = 10^{-11}$ Н висит между пластинами плоского конденсатора. Расстояние между пластинами $d = 0,5$ см. Пылинка освещается ультрафиолетовым светом и, теряя заряд, выходит из равновесия. Какой заряд потеряла пылинка, если вначале было приложено напряжение $U = 306,3$ В, а затем (чтобы снова ее уравновесить) напряжение пришлось увеличить на $\Delta U = 34$ В?

224. Между пластинами плоского конденсатора на расстоянии $a = 0,8$ см от нижней пластины висит заряженная пылинка. Разность потенциалов на пластинах $\Delta U = 300$ В. Через сколько секунд пылинка упадет на нижнюю пластинку, если разность потенциалов уменьшить на $\Delta U = 60$ В?

225. Какова скорость электрона, пролетевшего между точками с разностью потенциалов $U = 1000$ В?

226. Разность потенциалов между пластинами плоского конденсатора $\Delta \varphi = 90$ В. Площадь каждой пластины $S = 60$ см², заряд $q = 10^{-9}$ К. На каком расстоянии друг от друга находятся пластины?

227. Мыльный пузырь с зарядом $q = 2,22 \cdot 10^{-10}$ К находится в равновесии в поле горизонтального плоского конденсатора. Найти разность потенциалов между пластинами конденсатора, если масса пузыря $m = 0,01$ г, а расстояние между пластинами $d = 5$ см.

Глава XIV. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

§ 82. Понятие о токе. Сила тока

Электрическим током называют упорядоченное (или направленное) движение электрических зарядов. Носителями электрического тока могут быть и электроны, и ионы. В металлах свободно перемещаются только электроны. Поэтому электрический ток в металлах — это движение электронов проводимости. В разреженных газах

носителями электрического тока являются электроны и ионы. Электрический ток в жидкостях — это движение положительных и отрицательных ионов.

Электрический ток характеризуется величиной, называемой силой тока. Сила тока I — величина, определяемая количеством электричества q , которое протекает через поперечное сечение проводника в единицу времени:

$$I = \frac{q}{t}.$$

Единицей силы тока в системе СИ является ампер. Эта единица установлена на основании следующих соображений: если два проводника с током расположить рядом, то они подвергаются либо силе притяжения, либо силе отталкивания в зависимости от направления тока в проводниках (подробнее см. § 90). Величина силы взаимодействия между проводниками с током, отнесенная к единице длины проводника, зависит от силы тока в них. Ампер — это сила неизменяющегося тока, который, протекая по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызывает между ними силу 10^{-7} н на каждый метр длины.

Характеристикой тока, идущего по проводнику, является также плотность тока i — величина, определяемая количеством электричества, протекающим через единицу поперечного сечения проводника в единицу времени:

$$i = \frac{q}{S \cdot t} = \frac{I}{S}.$$

За направление тока условно принимается направление движения положительных зарядов. Следовательно, в металле поток электронов перемещается в направлении, противоположном условно выбранному направлению тока.

Задача 1. Какое количество электронов проходит через поперечное сечение проводника площадью 2 мм^2 за 1 мин, если плотность тока в проводнике 150 а/см^2 ? Заряд электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ к}$.

Решение. Количество электронов определяем из условия $n = \frac{q}{e}$, где q — полный заряд, проходящий через поперечное сечение проводника за 1 мин:

$$q = It = iSt;$$

отсюда

$$n = \frac{iSt}{e}; \quad n = 1,15 \cdot 10^{21}.$$

О т в е т. $n = 1,15 \cdot 10^{21}$.

Задача 2. Определить величину заряда, проходящего через поперечное сечение проводника площадью 1 мм^2 в течение 10 сек , если плотность тока равномерно возрастает от 0 до 100 а/см^2 .

Решение. Количество электричества, прошедшее через поперечное сечение проводника за время t , определяем по формуле $q = I_{\text{ср}} \cdot t$, где $I_{\text{ср}}$ — среднее значение силы тока:

$$I_{\text{ср}} = \frac{i_1 + i_2}{2} \cdot S.$$

Тогда

$$q = \frac{i_1 + i_2}{2} \cdot S \cdot t; \quad q = 5 \text{ к.}$$

Отв. $q = 5 \text{ к.}$

§ 83. Разность потенциалов на концах проводника. Закон Ома для участка цепи. Сопротивление проводников

Для того чтобы заряды перемещались по проводнику, необходимо воздействие на них силы. В предыдущей главе мы выяснили, что такая сила существует, если заряд находится в электрическом поле; поэтому можно сказать, что основным условием существования в проводнике электрического тока является наличие внутри этого проводника электрического поля. Поле же в проводнике будет существовать в том случае, если на концах проводника имеется разность потенциалов. Разность потенциалов на концах проводника называется *напряжением* и обозначается буквой U . Напряжение, как и разность потенциалов, в системе СИ измеряется в вольтах.

Сила тока I , идущего по проводнику, пропорциональна напряжению на его концах. Опытным путем установлено, что сила тока и напряжение связаны между собой соотношением

$$I = \frac{U}{R}.$$

Этот закон открыл немецкий ученый Ом; его называют законом Ома для участка цепи.

Сила тока на данном участке цепи прямо пропорциональна напряжению на его концах и обратно пропорциональна величине R , называемой *сопротивлением*. Сопротивление проводника в системе СИ измеряется в омах. Сопротивление участка цепи равно 1 ом , если при разности потенциалов на концах участка 1 в в нем протекает постоянный ток в 1 а ,

$$1 \text{ ом} = \frac{1 \text{ в}}{1 \text{ а}}.$$

Выясним, чем обусловлено сопротивление проводника. Свободные заряды, участвующие в образовании электрического тока, движутся по проводнику не беспрепятственно. Металл представляет собой кристаллическую решетку, в узлах которой расположены положительные ионы. Между ними беспорядочно (подобно молекулам газа) движутся электроны, потерявшие связь с атомами при образовании ионов. Эти электроны как бы «цементируют» положительные ионы, удерживая их вместе, в противном случае решетка распалась бы под действием сил отталкивания между ионами. Электроны же удерживаются ионами в пределах кристаллической решетки и не могут ее покинуть.

В жидкостях и газах ионы движутся в среде, составленной из ионов, атомов и молекул. Поэтому свободные заряды, образующие ток, при своем движении сталкиваются с беспорядочно движущимися частицами, не принимающими участия в образовании тока. Таким образом, электрический ток как бы встречает сопротивление: иначе говоря, проводник обладает сопротивлением электрическому току.

Сопротивление R проводника зависит от размеров проводника, от материала, из которого он изготовлен, а также и от его температуры. С длиной и площадью поперечного сечения проводника сопротивление связано формулой

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где l — длина проводника; S — площадь поперечного сечения; ρ — удельное сопротивление.

Удельным сопротивлением называется величина, численно равная сопротивлению проводника единичной длины и единичного поперечного сечения. В системе СИ размерность ρ будет

$$[\rho] = \text{ом} \frac{\text{м}^2}{\text{м}} = \text{ом} \cdot \text{м}.$$

Величину, обратную сопротивлению, называют *проводимостью* K , а величину, обратную удельному сопротивлению, — *удельной проводимостью* γ .

Рассмотрим влияние температуры на сопротивление проводника. Сопротивление металлических проводников возникает из-за столкновений свободных электронов с атомами и ионами, совершающими тепловые колебания в узлах кристаллической решетки. Интенсивность этих колебаний зависит от температуры: чем выше температура, тем интенсивнее колебания, и наоборот. Отсюда следует, что при более высоких температурах столкновения электронов с частицами в узлах решетки происходят чаще, поэтому сопротивление с повышением температуры возрастает.

Эта зависимость сопротивления от температуры определяется соотношением

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t),$$

где R_0 — сопротивление при 0°C ; R_t — сопротивление при температуре $t^\circ \text{C}$; α — температурный коэффициент сопротивления — величина, определяемая отношением изменения сопротивления проводника при его нагревании на 1°C к величине первоначального сопротивления проводника при 0°C .

При нагревании электролитов и полупроводников их сопротивление уменьшается. Это объясняется тем, что повышение температуры способствует увеличению числа носителей электрического тока (ионов и свободных электронов), а это ведет к увеличению электропроводности, т. е. к уменьшению сопротивления.

Задача 1. Два цилиндрических проводника, один из меди, а другой из алюминия, имеют одинаковую длину l и одинаковое сопротивление R . Во сколько раз медный проводник тяжелее алюминиевого? Удельное сопротивление меди $\rho_1 = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ ом} \cdot \text{м}$, удельное сопротивление алюминия $\rho_2 = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ ом} \cdot \text{м}$, плотность меди $d_1 = 8,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, плотность алюминия $d_2 = 2,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Решение. Из формул

$$R = \rho_1 \frac{l}{S_1} \quad \text{и} \quad R = \rho_2 \frac{l}{S_2}$$

находим

$$\rho_1 \frac{l}{S_1} = \rho_2 \frac{l}{S_2}; \quad \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{S_1}{S_2}.$$

С другой стороны,

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{m_1 g}{m_2 g} = \frac{V_1 d_1}{V_2 d_2} = \frac{S_1 d_1}{S_2 d_2}.$$

Подставив вместо $\frac{S_1}{S_2}$ отношение удельных сопротивлений, получим

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\rho_1 d_1}{\rho_2 d_2}; \quad \frac{P_1}{P_2} = 2,24 \text{ (раза)}.$$

Ответ. Медный проводник в 2,24 раза тяжелее алюминиевого.

Задача 2. Сопротивление вольфрамовой нити электрической лампочки при $t = 20^\circ \text{C}$ равно $35,8 \text{ ом}$. Определить температуру нити лампочки, если при включении ее в сеть напряжением 120 в по нити протекает ток $0,33 \text{ а}$. Температурный коэффициент сопротивления вольфрама $\alpha = 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$.

Решение. Зависимость сопротивления от температуры описывается формулой

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t).$$

Зная сопротивление нити при температуре 20°C , можно найти сопротивление R_0 :

$$R_0 = \frac{R_t}{1 + \alpha t}.$$

Сопротивление нити в нагретом состоянии определим по закону Ома:

$$R_1 = \frac{U}{I}; \quad R_1 = \frac{120}{0,33} \text{ ом} \approx 364 \text{ ом}.$$

С другой стороны,

$$R_1 = R_0 (1 + \alpha t_1) = \frac{R_t}{1 + \alpha t} \cdot (1 + \alpha t_1);$$

$$R_1 (1 + \alpha t) = R_t (1 + \alpha t_1).$$

Отсюда находим

$$t_1 = \frac{R_1 (1 + \alpha t) - R_t}{R_t \alpha}; \quad t_1 = 2200^\circ \text{C}.$$

Ответ. $t_1 = 2200^\circ \text{C}$.

§ 84. Электрическая цепь. Соединение проводников

Для того чтобы по проводнику протекал электрический ток, на концах его должна существовать разность потенциалов. Перемещение электрических зарядов приведет к тому, что эта разность потенциалов начнет уменьшаться. Для поддержания постоянной разности потенциалов нужно от конца проводника с меньшим потенциалом непрерывно отводить приносимые сюда током заряды (носители заряда предполагаются положительными), а к концу с большим потенциалом — непрерывно их подводить. Этот процесс осуществляется за счет источника тока, к которому подключают проводник. Проводник и источник тока, например гальванический элемент, образуют замкнутую *электрическую цепь*.

Кроме проводника и источника тока, в цепь могут быть включены и другие устройства, проводящие электрический ток (измерительные приборы, другие проводники и прочие источники тока). Для регулировки силы тока в цепь включают переменное сопротивление, называемое *реостатом*. Реостаты бывают рычажные, со скользящим контактом, ламповые и штепсельные (магазины сопротивлений).

Последовательное и параллельное соединёний проводников. Электрические цепи чаще всего состоят из нескольких сопротивлений, соединённых различными способами. Рассмотрим так называемое *последовательное соединение* (рис. 60), при котором конец предыдущего сопротивления соединён с началом последующего. Пусть в цепь включены два сопротивления R_1 и R_2 и сила тока в цепи равна I . Тогда напряжения на концах сопротивлений R_1 и R_2 на основании закона Ома будут:

$$U_1 = IR_1; \quad U_2 = IR_2.$$

Отсюда

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2},$$

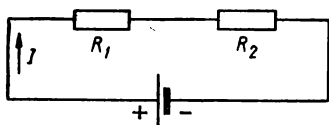


Рис. 60.

т. е. напряжения на концах последовательно включённых проводников пропорциональны их сопротивлениям.

Определим величину общего сопротивления последовательно соединённых проводников. Полное напряжение на концах двух проводников равно сумме напряжений на концах каждого из включённых проводников:

$$U = U_1 + U_2; \quad U = IR_1 + IR_2.$$

Обозначив сопротивление всего соединения через R , получим

$$U = IR; \quad IR = I(R_1 + R_2); \\ R = R_1 + R_2.$$

Таким образом, общее сопротивление цепи, состоящей из нескольких последовательно соединённых проводников, равно сумме сопротивлений отдельных проводников.

Рассмотрим теперь *параллельное соединение проводников* (рис. 61), при котором все начала проводников соединены в один узел, а все концы — в другой. Обозначим силу тока в цепи до разветвления через I . Силу тока в проводнике с сопротивлением R_1 обозначим через I_1 , а в проводнике R_2 — через I_2 . Тогда

$$I = I_1 + I_2.$$

На основании закона Ома можно записать:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2},$$

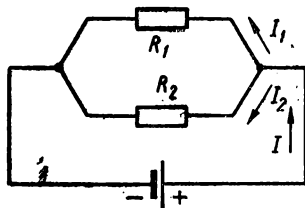


Рис. 61.

где U — напряжение на концах первого и второго проводников. Из этих двух равенств следует, что

$$I_1 R_1 = I_2 R_2, \text{ или } \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

Силы токов, протекающих по проводникам, параллельно включенным в цепь, обратно пропорциональны сопротивлениям этих проводников.

Найдем общее сопротивление параллельно соединенных проводников. Применяя закон Ома ко всему соединению, получим

$$I = \frac{U}{R},$$

где R — общее сопротивление соединения.

На основании равенств

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2}$$

получим

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Сокращая на U , находим

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}, \text{ или } K = K_1 + K_2,$$

где K , K_1 и K_2 — проводимости всего соединения и каждого из проводников в отдельности.

При параллельном соединении проводников проводимость всего соединения равна сумме проводимостей каждого из проводников в отдельности.

Закон Ома для полной цепи. Всякая цепь электрического тока состоит из внутренней и внешней части. Внешней частью являются потребители электрического тока и проводящие провода, внутренней — сам источник тока. При замкнутой цепи ток течет как по внутренней, так и по внешней цепи.

Обозначим сопротивление внешней части цепи через R , а сопротивление внутренней части — через r . Значит, общее сопротивление всей цепи равно $R + r$. Пусть электродвижущая сила источника тока равна E ; тогда сила тока в цепи определяется формулой

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

Это равенство выражает *закон Ома для полной цепи*: сила тока в цепи прямо пропорциональна электродвижущей силе источника и обратно пропорциональна сопротивлению всей цепи.

Электродвижущей силой источника, обуславливающей ток в каком-либо замкнутом контуре, называется величина, определяемая работой, которую совершают сторонние силы при перемещении единичного положительного заряда по этому контуру.

Определим из указанной выше формулы э. д. с. E :

$$E = IR + Ir.$$

Произведение IR определяет падение напряжения во внешней цепи, а произведение Ir — падение напряжения во внутренней цепи.

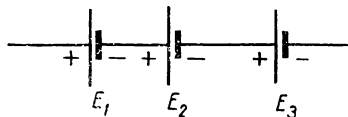


Рис. 62.

Таким образом, э. д. с. источника тока равна сумме падений напряжения во внутренней и внешней частях замкнутой цепи.

Чем больше внешнее сопротивление по сравнению с внутренним, тем больше падение напряжения во внешней цепи приближается к величине э. д. с. источника. Поэтому величина э. д. с. источника

тока численно равна напряжению на зажимах разомкнутого источника (или замкнутого на очень большое сопротивление). При разомкнутом источнике внешнее сопротивление бесконечно велико, поэтому внутреннее сопротивление r по сравнению с ним можно считать равным нулю; тогда $E = IR$.

Последовательное и параллельное соединение источников тока. Элементы можно соединять в батарею последовательно или параллельно. При последовательном соединении два соседних элемента соединяются друг с другом своими разноименными полюсами (рис. 62). Э. д. с. такой батареи равна сумме э. д. с. источников, входящих в батарею:

$$E = E_1 + E_2 + E_3.$$

Если э. д. с. отдельных источников одинаковы и равны E_1 , то э. д. с. батареи при n последовательно соединенных источниках равна $E = nE_1$. Пусть внутреннее сопротивление одного элемента равно r , а сопротивление внешней цепи R ; тогда по закону Ома сила тока в этой цепи определится по формуле:

$$I = \frac{nE_1}{R + nr}.$$

При параллельном соединении все положительные полюсы элементов соединяют в один узел, а все отрицательные полюсы — в другой (рис. 63).

Если э. д. с. всех элементов одинаковы, то э. д. с. батареи равна э. д. с. одного источника. Сила тока в цепи при n параллельно соединенных одинаковых элементах равна

$$I = \frac{E_1}{R + \frac{r}{n}}.$$

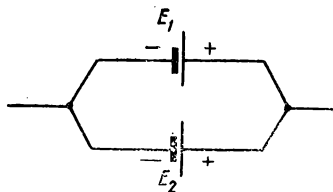


Рис. 63.

Задача 1. Определить общее сопротивление цепи (рис. 64), если сопротивления отдельных проводников известны: $R_1 = 15 \text{ ом}$; $R_2 = 30 \text{ ом}$; $R_3 = 40 \text{ ом}$; $R_4 = 32 \text{ ом}$; $R_5 = 12 \text{ ом}$; $R_6 = 45 \text{ ом}$.

Решение. Сопротивление цепи складывается из последовательно соединенных участков ab , bc и cd . Вычислим вначале сопротивление участка bc ; он состоит из двух параллельно соединенных ветвей; найдем их сопротивления. Для правой ветви находим

$$R_{3, 4, 5} = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} + R_5 = \frac{40 \cdot 32}{40 + 32} \text{ ом} + 12 \text{ ом} = 29,8 \text{ ом}.$$

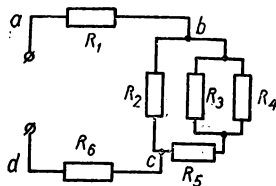


Рис. 64.

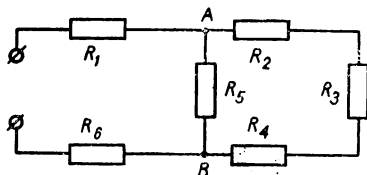


Рис. 65.

Сопротивление участка bc

$$R_{bc} = \frac{R_2 \cdot R_{3, 4, 5}}{R_2 + R_{3, 4, 5}} = \frac{30 \cdot 29,8}{30 + 29,8} = 15 \text{ ом}.$$

Очевидно, сопротивление всей цепи

$$R = R_1 + R_{bc} + R_6; \quad R = 15 \text{ ом} + 15 \text{ ом} + 45 \text{ ом} = 75 \text{ ом}.$$

Ответ. $R = 75 \text{ ом}$.

Задача 2. Определить полное сопротивление цепи, изображенной на рис. 65, если $R_1 = 5 \text{ ом}$; $R_4 = R_2 = 10 \text{ ом}$; $R_3 = 20 \text{ ом}$; $R_5 = 40 \text{ ом}$; $R_6 = 1 \text{ ом}$.

Решение. Находим сопротивление между точками A и B . Сопротивления R_2, R_3, R_4, R_5 , подключенные к точкам A и B , можно заменить одним эквивалентным сопротивлением R_{AB} , которое определяется по формуле

$$\frac{1}{R_{AB}} = \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_2 + R_3 + R_4};$$

$$R_{AB} = \frac{R_5(R_2 + R_3 + R_4)}{R_5 + R_2 + R_3 + R_4}; \quad R_{AB} = 20 \text{ (ом)}.$$

Сопротивление всей цепи

$$R = R_1 + R_{AB} + R_6; \quad R = 5 \text{ ом} + 20 \text{ ом} + 1 \text{ ом} = 26 \text{ ом}.$$

Ответ. $R = 26 \text{ ом}$.

Задача 3. Определить ток короткого замыкания батарей с э. д. с. 12 в, если при подключении к ней сопротивления $R = 2 \text{ ом}$ ток в цепи $I = 5 \text{ а}$.

Решение. Исходя из закона Ома для полной цепи

$$I = \frac{E}{R + r},$$

определяем внутреннее сопротивление батарей:

$$r = \frac{E - IR}{I}.$$

Ток короткого замыкания I_1 определим по формуле

$$I_1 = \frac{E}{r} = \frac{E \cdot I}{E - IR}; \quad I_1 = 30 \text{ а}.$$

Ответ. $I_1 = 30 \text{ а}$.

Задача 4. Какова э. д. с. элемента, если при подключении к его зажимам вольтметра сопротивлением $R = 20 \text{ ом}$ он показывает напряжение 1,37 в, а при замыкании элемента сопротивлением $R = 10 \text{ ом}$ по цепи идет ток $I_2 = 0,132 \text{ а}$?

Решение. По закону Ома для всей цепи

$$I = \frac{E}{R + r}; \tag{1}$$

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + r}. \tag{2}$$

С другой стороны, имеем $IR = U$, откуда

$$I = \frac{U}{R}; \quad I = 0,068 \text{ а.}$$

Из уравнения (1) определим внутреннее сопротивление элемента:

$$r = \frac{E - IR}{I},$$

а из уравнения (2) — его э. д. с.:

$$E = I_1 R_1 + I_1 r = I_1 R_1 + I_1 \frac{E - IR}{I};$$

откуда находим

$$E = \frac{I I_1 (R - R_1)}{I_1 - I}; \quad E = 1,42 \text{ в.}$$

Ответ. Э. д. с. элемента равна 1,42 в.

Задача 5. Два элемента с э. д. с. $E_1 = 1,6 \text{ в}$, $E_2 = 2 \text{ в}$ и внутренними сопротивлениями $r_1 = 0,3 \text{ ом}$ и $r_2 = 0,9 \text{ ом}$ соединены последовательно и замкнуты на внешнее сопротивление $R = 6 \text{ ом}$. Определить падение напряжения на внутреннем сопротивлении каждого из элементов.

Решение. При последовательном соединении элементов ток в цепи определяется по формуле

$$I = \frac{E_1 + E_2}{R + r_1 + r_2}.$$

Падение напряжения на внутренних сопротивлениях элементов

$$U_1 = Ir_1; \quad U_2 = Ir_2.$$

Подставляя в эти формулы выражение для силы тока, получим:

$$U_1 = \frac{E_1 + E_2}{R + r_1 + r_2} \cdot r_1; \quad U_1 = 0,15 \text{ в};$$

$$U_2 = \frac{E_1 + E_2}{R + r_1 + r_2} \cdot r_2; \quad U_2 = 0,45 \text{ в.}$$

Ответ. $U_1 = 0,15 \text{ в}$; $U_2 = 0,45 \text{ в}$.

Задача 6. Два элемента с э. д. с. $E_1 = 2$ в, $E_2 = 1,4$ в и внутренними сопротивлениями $r_1 = 0,6$ ом, $r_2 = 0,4$ ом соединены параллельно (рис. 66). Определить напряжение на зажимах полученной батареи.

Решение. Рассмотрим замкнутый контур $abcd$. Для этого контура элементы E_1 и E_2 включены последовательно навстречу друг другу; поэтому их общая э. д. с. равна разности $E_1 - E_2$.

На основании закона Ома для полной цепи $abcd$ находим

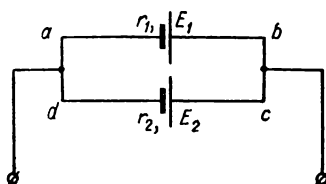


Рис. 66.

$$I = \frac{E_1 - E_2}{r_1 + r_2};$$

$$I = \frac{2 - 1,4}{(0,6 + 0,4)} = 0,6 \text{ а.}$$

Зная силу тока, определим падение напряжения внутри каждого из элементов:

$$U'_{\text{вн}} = Ir_1; \quad U'_{\text{вн}} = 0,36 \text{ в;}$$

$$U''_{\text{вн}} = Ir_2; \quad U''_{\text{вн}} = 0,24 \text{ в.}$$

Напряжения на зажимах каждого из элементов найдем по формуле

$$U_1 = E_1 - U'_{\text{вн}}; \quad U_1 = 1,64 \text{ в;}$$

$$U_2 = E_2 + U''_{\text{вн}}; \quad U_2 = 1,64 \text{ в.}$$

Мы видим, что напряжения на зажимах каждого из элементов одинаковы. Это напряжение и будет искомым.

О т в е т. Напряжение на зажимах батареи равно 1,64 в.

§ 85. Работа и мощность электрического тока

При прохождении электрического тока по проводнику происходит перенос зарядов от точек с большим потенциалом к точкам с меньшим потенциалом. Пусть на концах некоторого проводника имеется напряжение U_1 , равное разности потенциалов на концах этого проводника. За время t через поперечное сечение проводника пройдет заряд $q = It$, если по проводнику течет ток I . В этом случае работа перемещения заряда q от одного конца проводника к другому равна

$$A = q \cdot U.$$

Эта работа и определит работу электрического тока в рассматриваемом проводнике.

Таким образом, работа электрического тока определяется по формуле

$$A = IUt.$$

Эту формулу можно преобразовать на основании закона Ома и получить для работы еще такие выражения:

$$A = I^2 R t; \quad A = \frac{U^2}{R} t.$$

В зависимости от условий конкретной задачи может быть использована та или другая формула.

Формулой $A = I^2 R t$ удобно пользоваться при последовательном соединении, так как в этом случае сила тока во всех проводниках одинакова.

При параллельном соединении сила тока в проводниках различна, напряжение же на их концах одно и то же. Значит, в этом случае расчет работы удобнее вести по формуле

$$A = \frac{U^2}{R} t.$$

Эта формула показывает, что при параллельном соединении в каждом проводнике выделяется количество тепла, обратно пропорциональное его сопротивлению.

Если ток измерять в амперах, напряжение — в вольтах, а время — в секундах, то работа измеряется в джоулях, т. е.

$$1 \text{ дж} = 1 \text{ а} \cdot 1 \text{ в} \cdot 1 \text{ сек.}$$

Наряду с этой единицей работы пользуются и другими, более крупными единицами, являющимися внесистемными:

$$1 \text{ ватт} \cdot \text{час} = 1 \text{ вт} \cdot \text{ч} = 3600 \text{ дж};$$

$$1 \text{ гектоватт} \cdot \text{час} = 1 \text{ гвт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ дж};$$

$$1 \text{ киловатт} \cdot \text{час} = 1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ дж};$$

$$1 \text{ мегаватт} \cdot \text{час} = 1 \text{ Мвт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^9 \text{ дж}.$$

Работа, отнесенная к единице времени, определяет физическую величину, называемую *мощностью* N :

$$N = \frac{A}{t}.$$

Для мощности электрического тока, протекающего по проводнику, можно записать:

$$N = IU; \quad N = I^2 R; \quad IN = \frac{U^2}{R}.$$

Единицей мощности в системе СИ является ватт: $1 \text{ вт} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ сек}}$.

Формула мощности $N = IU$ является определяющей для единицы электрического напряжения, электродвижущей силы и разности потенциалов 1 вольт. Если $N = 1 \text{ вт}$, $I = 1 \text{ а}$, то из формулы $U = \frac{N}{I}$ имеем:

$$1 \text{ в} = \frac{1 \text{ вт}}{1 \text{ а}},$$

т. е. 1 в — это разность потенциалов на концах проводника, по которому протекает постоянный электрический ток в 1 а, если мощность, потребляемая этим участком проводника, равна 1 вт.

Задача 1. Радиоприемник, рассчитанный на напряжение $U = 127 \text{ в}$, потребляет мощность $N = 50 \text{ вт}$. Какое дополнительное сопротивление R нужно подсоединить к радиоприемнику, чтобы включить его в сеть с напряжением $U_1 = 220 \text{ в}$?

Решение. Ток, потребляемый радиоприемником, равен

$$I = \frac{N}{U}.$$

На дополнительном сопротивлении R происходит падение напряжения, равное разности $U_1 - U$. На основании закона Ома можно написать, что ток в дополнительном сопротивлении равен

$$I = \frac{U_1 - U}{R}.$$

Приравнявая правые части уравнений для I , получим

$$\frac{N}{U} = \frac{U_1 - U}{R},$$

откуда

$$R = \frac{U(U_1 - U)}{N}; \quad R = 236 \text{ ом}.$$

Ответ. $R = 236 \text{ ом}$.

Задача 2. Две 120-вольтовые лампы мощностью 90 и 40 вт подключены последовательно к источнику тока с напряжением 220 в. Какая из двух ламп будет гореть ярче?

Решение. Сопротивления ламп можно определить, пользуясь формулой:

$$N = \frac{U^2}{R}.$$

откуда

$$R_1 = \frac{U^2}{N_1} = 160 \text{ ом}; \quad R_2 = \frac{U^2}{N_2} = 360 \text{ ом}.$$

Определим падение напряжения на каждой из ламп. При последовательном соединении проводников напряжения на их концах пропорциональны сопротивлениям:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}; \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{4}{9}; \quad U_1 = \frac{4}{9} U_2.$$

С другой стороны, $U_1 + U_2 = 220 \text{ в}$. Выразая U_1 через U_2 , получим $\frac{4}{9} U_2 + U_2 = 220 \text{ в}$, откуда $U_2 = 152,3 \text{ в}$; $U_1 = 67,7 \text{ в}$.

О т в е т. Вторая лампа (на 40 *вт*) будет гореть ярче.

§ 86. Тепловое действие электрического тока

Проводник, по которому проходит электрический ток, нагревается. Это явление можно объяснить так. Заряды, движущиеся по проводнику и образующие электрический ток, обладают определенным запасом кинетической энергии. При столкновении с частицами, не участвующими в движении, свободные заряды отдают им свою энергию. В результате внутреннего трения энергия тела повышается, т. е. повышается его температура.

Нагревание проводников при прохождении по ним электрического тока впервые открыли независимо друг от друга профессор Петербургского университета Э. Х. Ленц и английский ученый Дж. Джоуль. Ими было установлено, что количество тепла, выделяющееся в проводнике, может быть определено следующим образом:

$$Q = k \cdot A,$$

где A — работа, выполняемая током, k — величина, называемая тепловым эквивалентом работы. Численное значение этой величины зависит от выбора системы единиц. Если количество тепла измерять в калориях, а работу в джоулях, то $k = 0,24 \frac{\text{кал}}{\text{дж}}$. В системе СИ единицей работы, энергии и количества тепла является джоуль. Поэтому в системе СИ $k = 1$. Для работы A ранее было получено выражение $A = I^2 R t$. Следовательно,

$$Q = k I^2 R t.$$

Эта формула выражает закон Джоуля — Ленца: количество тепла, выделяющееся в проводнике при прохождении по нему электрического тока, пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению проводника и времени прохождения тока.

В системе СИ закон Джоуля — Ленца следует записывать так:

$$Q = I^2 R t.$$

Учитывая, что работу электрического тока можно выразить различными формулами (см. предыдущий параграф), закон Джоуля — Ленца может быть записан еще и так:

$$Q = U I t;$$

$$Q = \frac{U^2}{R} t.$$

Задача 1. Кипятильник имеет две одинаковые секции. Если обе секции включить в сеть параллельно, он нагреет воду за время $t_1 = 10$ мин. За какое время он нагреет до той же температуры такое же количество воды, если обе секции включить последовательно?

Решение. Количество тепла, необходимое для нагревания воды, определяется формулой

$$Q = mc\Delta t^\circ;$$

с другой стороны,

$$Q = \frac{U^2}{R_1} t_1,$$

где R_1 — сопротивление кипятильника при параллельно включенных секциях.

Если обозначить сопротивление одной секции через R , то $R_1 = \frac{R}{2}$; поэтому

$$mc\Delta t^\circ = \frac{2U^2}{R} t_1;$$

отсюда находим R :

$$R = \frac{2U^2 t_1}{mc\Delta t^\circ}. \quad (1)$$

При последовательно включенных секциях

$$mc\Delta t^\circ = \frac{U^2}{R_2} t_2, \text{ где } R_2 = 2R;$$

поэтому

$$mc\Delta t^\circ = \frac{U^2}{2R} t_2. \quad (2)$$

Подставляя в формулу (2) значение R из формулы (1), получим равенство

$$1 = \frac{t_2}{4t_1},$$

откуда

$$t_2 = 4t_1; \quad t_2 = 40 \text{ мин.}$$

Ответ. При последовательном включении секций время нагревания воды равно 40 мин.

Задача 2. Электрический чайник с 600 см³ воды при 9° С, сопротивление обмотки которого $R = 16 \text{ ом}$, забыли выключить. Через сколько времени после включения чайника вся вода в нем выкипит? Удельная теплота парообразования воды $r = 22,6 \cdot 10^6 \text{ дж/кг}$, напряжение сети 120 в, к. п. д. чайника $\eta = 60\%$. Удельная теплоемкость воды $c = 4190 \text{ дж/кг} \cdot \text{град}$.

Решение. Количество тепла, идущее на нагревание и испарение воды,

$$Q = \eta \frac{U^2}{R} t.$$

С другой стороны,

$$Q = mc(t_k^\circ - t_1^\circ) + mr.$$

Из этих равенств получаем соотношение

$$\eta \frac{U^2}{R} t = mc(t_k^\circ - t_1^\circ) + mr,$$

откуда

$$t = \frac{mc(t_k^\circ - t_1^\circ) + mr}{\eta U^2} \cdot R; \quad t = 2944 \text{ сек} \approx 49 \text{ мин.}$$

Ответ. Вся вода выкипит через 49 мин.

§ 87. Электролиз. Законы Фарадея

При пропускании электрического тока через водные растворы кислот, щелочей и солей идет процесс выделения их составных частей. Впервые химическое действие электрического тока наблюдал русский ученый В. В. Петров; он обнаружил, что электрический ток выделяет из подкисленной воды кислород и водород.

Химическое действие тока можно проследить в таком опыте. Опустим в водный раствор медного купороса CuSO_4 две угольные

пластины (*К* и *А*) и соединим их с полюсами батареи *Б* гальванических элементов (рис. 67). В растворе появляется электрический ток. Вынув через некоторое время пластины из раствора, можно установить, что на пластине *К*, соединенной с отрицательным полюсом батареи (она называется катодом), выделилась медь. На второй пластине, соединенной с положительным полюсом батареи (анод), происходит следующее. К ней подходит кислотный остаток SO_4 ; соприкасаясь с водой, SO_4 вступает во вторичную реакцию, не связанную с наличием тока, по формуле

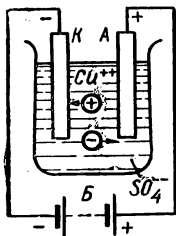
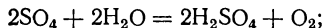
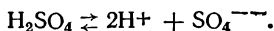


Рис. 67.

в растворе появляется серная кислота, а на аноде выделяется кислород.

Рассмотрим данное явление более подробно.

При растворении в воде кислот, щелочей и солей их молекулы распадаются на ионы. Этот процесс распада на ионы называется *диссоциацией*. Например, диссоциация молекулы серной кислоты происходит по схеме



Раствор, содержащий диссоциированные на ионы молекулы, называется *электролитом*. Следовательно, электролитами являются водные растворы кислот, щелочей и солей, а также расплавленные ионные кристаллы.

Если в электролит опустить электроды, соединенные с полюсами батареи, то между электродами в растворе возникает электрическое поле, под влиянием которого ионы движутся направленно. Дойдя до электродов, ионы нейтрализуются и в виде нейтральных атомов выделяются на них.

Явление выделения вещества на электродах при прохождении тока через электролит называется *электролизом*. Оно было тщательно исследовано английским физиком М. Фарадеем, установившим, что масса *m* вещества, выделившегося на электроде, пропорциональна полному заряду *q*, который прошел через электролит:

$$m = k \cdot q. \quad (1)$$

Этот закон носит название *первого закона Фарадея*.

Коэффициент *k* называется *электрохимическим эквивалентом*. Он определяет массу вещества, выделяемую на электроде при прохождении через электролит единицы количества электричества. Например, для меди $k = 3,294 \cdot 10^{-7} \text{ кг/к}$, для серебра $k = 1,118 \cdot 10^{-6} \text{ кг/к}$, для водорода $k = 1,045 \cdot 10^{-8} \text{ кг/к}$.

Второй закон Фарадея определяет величину электрохимического эквивалента. Прежде чем сформулировать этот закон, введем некоторые понятия. Химическим эквивалентом элемента называется безразмерная величина, численно равная отношению атомного веса элемента A к его валентности n , т. е. химический эквивалент равен $\frac{A}{n}$. Килограмм-эквивалентом простого вещества называют (в системе СИ) количество этого вещества в килограммах, численно равное его химическому эквиваленту.

Второй закон Фарадея выражают формулой

$$k = C \frac{A}{n}, \quad (2)$$

т. е. электрохимические эквиваленты веществ пропорциональны их химическим эквивалентам.

Коэффициент пропорциональности C , связывающий электрохимический эквивалент с химическим, имеет одинаковое значение для всех веществ. Опыты, проведенные с различными веществами, дают для C следующую величину:

$$C = 1,036 \cdot 10^{-8} \frac{\text{кг-экв}}{\text{к}}.$$

Подставляя значение k в формулу (1) и учитывая, что

$$q = It,$$

получим:

$$m = C \frac{A}{n} It.$$

Эта формула выражает так называемый объединенный закон Фарадея.

Величина, обратная постоянной C , называется числом Фарадея F :

$$F = \frac{1}{C}.$$

Число Фарадея показывает, какой заряд должен пройти через электролит, чтобы на электроде выделился 1 килограмм-эквивалент вещества:

$$F = \frac{1}{1,036 \cdot 10^{-8}} \frac{\text{к}}{\text{кг-экв}} = 9,65 \cdot 10^7 \frac{\text{к}}{\text{кг-экв}}.$$

Технические применения электролиза.

а) Р а ф и н и р о в а н и е м е д и. В современной электротехнике чистая медь находит очень широкое применение. Она является лучшим

материалом для изготовления проводов. Присутствие даже незначительных примесей значительно ухудшает свойства меди как проводника тока. Очистка меди от всех примесей называется рафинированием.

Для получения чистой меди баки наполняют раствором медного купороса. В них опускают несколько параллельно соединенных медных катодов, сделанных из тонких пластин химически чистой меди, а между ними — несколько анодов (толстых пластин из неочищенной меди, тоже соединенных параллельно). При прохождении тока на катоде отлагается чистая медь, выделяемая из раствора медного купороса, анод же растворяется и становится все тоньше. Посторонние примеси, находящиеся в анодной пластинке, падают на дно в виде осадка.

Когда катод нарастает до необходимых размеров, его вынимают из раствора и заменяют новым. Чтобы медный слой на катоде был достаточно прочным, плотность тока в электролите должна быть порядка $0,3 \text{ а на } 1 \text{ дм}^2$ поверхности электрода.

б) Гальваностегия — это покрытие одного металла слоем другого. Электролитическое осаждение металлов широко применяется как с декоративной целью, так и для защиты от коррозии. Электролитическое золочение, серебрение, никелирование и омеднение получили широкое распространение.

в) Гальванопластика. В 1837 г. Б. С. Якоби предложил использовать электролиз для получения металлических отпечатков рельефных предметов (медалей, монет и т. п.). Для этого сначала с предмета снимают слепок из воска, стеарина и т. п., покрывают поверхность слепка порошкообразным графитом для придания электропроводности и затем используют его в качестве катода в электролитической ванне, содержащей растворенную соль подходящего металла. При электролизе металл электролита выделяется на поверхности слепка и образует металлическую копию предмета. Этим способом изготовляют, например, типографские клише, бесшовные трубы, а также другие металлические детали сложной формы. Электролитическое осаждение металла на поверхности предмета для воспроизведения его формы и называется гальванопластикой.

г) Электролитическая полировка. Растворение металла, служащего анодом при электролизе, происходит быстрее всего в местах наибольшей плотности тока, которая имеется в областях наибольшей напряженности электрического поля. Наибольшая напряженность поля будет у выступающих, а наименьшая — у вогнутых участков поверхности проводника. Поэтому металл быстро удаляется с поверхности в наиболее выступающих участках, что приводит к ее сглаживанию.

Задача 1. Какое количество никеля выделяет ток $I = 10 \text{ а}$ в течение $t = 0,5 \text{ ч}$ при прохождении через раствор никелевой соли? Электрохимический эквивалент никеля $k = 0,30 \cdot 10^{-6} \text{ кг/к.}$

Решение. На основании первого закона Фарадея для электролиза имеем $m = kIt = 5,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$.

Ответ. $m = 5,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$.

Задача 2. При серебрении ложек ток $I = 1,5 \text{ а}$ в течение $t = 6 \text{ ч}$ пропускают через раствор соли серебра. Катодом служат девять ложек, из которых каждая имеет поверхность $S_1 = 50 \text{ см}^2$. Найти толщину слоя серебра. (Атомный вес серебра 107,88. Плотность серебра $d = 10,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.)

Решение. Толщину слоя серебра определим по формуле

$$h = \frac{V}{S} = \frac{V}{S_1 \cdot z},$$

где V — объем выделившегося серебра; z — число ложек.

Объем определим по формуле

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

где m — масса выделившегося серебра.

По закону Фарадея найдем массу серебра:

$$m = C \frac{A}{n} It.$$

Тогда

$$V = \frac{CAIt}{dn}.$$

Окончательно для искомой толщины слоя находим:

$$h = \frac{CAIt}{dS_1nz}; \quad h = 7,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}.$$

Ответ. $h = 7,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}$.

Задача 3. В двух отдельных сосудах электролитически наносятся медь и серебро при одинаковой силе тока. Какова масса m_1 медного покрытия, если масса серебряного $m = 40,24 \text{ г}$? Атомный вес серебра $A = 107,88$, его валентность $n = 1$; атомный вес меди $A_1 = 63,57$, ее валентность $n_1 = 2$.

Решение. На основании объединенного закона Фарадея имеем:

$$m = C \frac{A}{n} It;$$

$$m_1 = C \frac{A_1}{n_1} It.$$

Разделив первое выражение на второе, получим

$$\frac{m}{m_1} = \frac{An_1}{A_1n},$$

откуда

$$m_1 = \frac{mA_1n}{An_1}; \quad m_1 = 1,19 \cdot 10^{-2} \text{ кг.}$$

О т в е т. Масса медного покрытия равна $1,19 \cdot 10^{-2} \text{ кг.}$

§ 88. Электрический ток в газах

В естественном состоянии газы не являются проводниками электричества.

Хорошо изолированное заряженное тело, например электроскоп, в сухом атмосферном воздухе долгое время сохраняет свой заряд неизменным. Но если вблизи

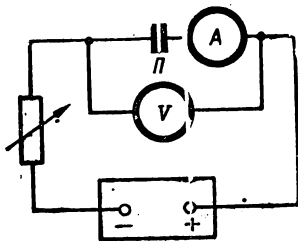


Рис. 68.

заряженного электроскопа поместить пламя горелки, то можно увидеть, что его заряд быстро уменьшится и листочки спадут. Утечка заряда с электроскопа наблюдается и в том случае, если вблизи него поместить какой-либо источник света, дающий много ультрафиолетовых лучей, и при воздействии на воздух, окружающий электроскоп, рентгеновских лучей или излучения радиоактивных элементов. Эти опыты доказывают, что под действием высокой температуры и различных излучений в воздухе появляются заряженные частицы и он становится электропроводящим. Такими заряженными частицами являются ионы и электроны.

Процесс образования ионов и электронов из нейтральных атомов или молекул называется *ионизацией* газа, а возбудитель ионов — *ионизатором*. Следовательно, ионизаторами воздуха и других газов являются рентгеновские и ультрафиолетовые лучи, радиоактивное излучение и высокая температура.

Под воздействием ионизаторов от атомов отщепляется один или несколько электронов. В результате вместо нейтрального атома появляются положительно заряженный ион и электроны. Часть образовавшихся электронов может быть захвачена другими нейтральными атомами, и тогда образуются отрицательно заряженные ионы.

Составим электрическую цепь, в которую введем воздушный промежуток *П* (рис. 68). Замкнем ключ в этой цепи — тока в ней не будет;

если же в пространство между двумя пластинами ввести пламя горелки, ток появится. Этот ток поддерживается в воздушном промежутке образовавшимися ионами. Под влиянием электрического поля ионы будут двигаться: положительные — к отрицательно заряженной пластине, а отрицательные — к положительной.

Сила тока в цепи зависит от характера ионизатора и от разности потенциалов между пластинами. Изменяя сопротивление цепи, а следовательно, и напряжение на пластинах, можно установить следующую зависимость между силой тока I в цепи и напряжением U . При увеличении напряжения ток возрастает вначале пропорционально напряжению. Затем, при дальнейшем увеличении напряжения, возрастание тока идет медленнее и наконец совсем прекращается: при возрастании U сила тока I остается постоянной (рис. 69).

Максимальный ток, который не зависит уже от напряжения между пластинами, называется *током насыщения*. Возрастание тока прекращается, как только все ионы, образующиеся в газовом промежутке при данном ионизаторе, достигают электродов.

Прохождение электрического тока через газы называют *электрическим разрядом в газах*. Разряд, существующий только при действии внешнего ионизатора, называют *несамостоятельным газовым разрядом*. Он прекращается, как только прекращается действие ионизатора.

Если увеличивать напряжение на электродах, то, начиная с определенного его значения, после того как наступило насыщение, ток опять начинает возрастать, причем, если теперь убрать внешний ионизатор, газовый разряд не прекращается. Такой газовый разряд называют *самостоятельным*. Ионы, необходимые для поддержания электропроводности газа, создаются самим электрическим полем, обуславливающим электрический ток в газе.

При достаточно высоком напряжении на электродах ионы и электроны разгоняются до таких скоростей, что начинают своими ударами ионизировать молекулы газа. Образующиеся при этом новые ионы и электроны приходят в движение и благодаря высокому напряжению сами приобретают такую скорость, что могут ионизировать молекулы газа. При этом число электронов и ионов начинает быстро возрастать. Образуется «лавины» ионов и электронов. Она-то и поддерживает самостоятельный газовый разряд и обуславливает переход несамостоятельного разряда в самостоятельный.

Образование электронной лавины схематически показано на

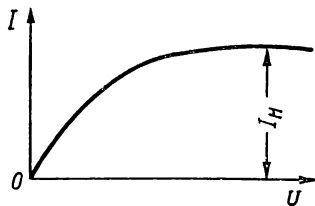


Рис. 69.

рис. 70, где значком \bullet обозначены электроны, а \circ — нейтральные атомы (положительные ионы не изображены).

Название «лавины» дано по аналогии образования большого числа электронов и ионов из одного первоначального иона с процессом образования снежной лавины в горах.

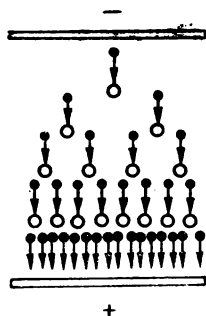


Рис. 70.

Самостоятельный газовый разряд. В зависимости от того, какие процессы образования ионов в разряде играют главную роль, различают разные формы, или виды самостоятельных разрядов: коронный, искровой, дуговой, тлеющий и др.

Рассмотрим так называемый *тлеющий разряд*. Электрический ток, проходя через разреженный газ, вызывает его свечение. Газ при этом не накаляется, но светится, оставаясь холодным.

Явления, возникающие в газе при прохождении через него электрического тока, наблюдают при помощи следующей установки. В длинную стеклянную трубку впивают два электрода — анод и катод. Электроды подключают к источнику высокого напряжения (в несколько сот вольт). Воздух из трубки постепенно откачивают насосом.

Пока давление воздуха в трубке равно атмосферному, тока в трубке нет, так как приложенное напряжение является недостаточным для пробоя газа. Но при уменьшении давления ток появляется, о чем можно судить по свечению воздуха.

При разрежении порядка 100 мм рт. ст. между электродами появляется разряд в виде светящегося шнура. По мере дальнейшего откачивания воздуха светящийся шнур утолщается и заполняет все поперечное сечение трубки.

При давлениях порядка 0,1—0,01 мм рт. ст. разряд имеет вид, изображенный на рис. 71. Непосредственно к катоду прилегает тонкий светящийся слой 1 — первое катодное свечение, или катодная пленка, за ним идет темный слой 2 — катодное темное пространство. Оно переходит в светящийся слой 3 — тлеющее свечение, которое имеет резкую границу со стороны катода и постепенно исчезает со стороны анода. За тлеющим свечением снова наблюдается темный промежуток 4 — второе, или фарадеево, темное пространство. Пере-



Рис. 71.

численные области 1—4 называют катодными частями разряда. За вторым темным пространством лежит светящаяся область 5, простирающаяся до анода, — положительный светящийся столб.

В настоящее время тлеющий разряд широко используется в качестве источника света в различных газосветных трубках. В лампах дневного света разряд происходит в парах ртути. Излучение ртутного пара поглощается слоем специальных веществ (люминофоров), нанесенных на внутреннюю поверхность трубки. Под действием поглощенного излучения люминофоры начинают светиться, и при определенном подборе вещества испускаемое излучение можно сделать близким к дневному свету.

Газосветные трубки применяются также для рекламных и декоративных целей.

Катодные лучи и их свойства. При тлеющем разряде с катода вылетает большое число электронов. В катодном темном пространстве они почти не испытывают соударений (этим и объясняется отсутствие свечения). Следовательно, в катодном темном пространстве свободно движется поток электронов.

Испускаемые катодом газоразрядной трубки электронные потоки в вакууме, впервые открытые Круксом в конце прошлого века, получили название *катодных лучей*. Если давление газа в трубке относительно велико (выше 0,1 мм рт. ст.), то катодное темное пространство очень узко и катодные лучи существуют только в этой малой части трубки. При уменьшении давления электроны проходят уже больший путь без соударений с атомами и катодное темное пространство расширяется. При давлениях 0,01—0,001 мм рт. ст. оно заполняет почти всю трубку и катодные лучи достигают стенок трубки. Удары электронов катодных лучей вызывают свечение стенок.

Перечислим основные свойства катодных лучей.

а) Электроны в катодных лучах распространяются по прямым линиям, направленным перпендикулярно поверхности катода. Направление их распространения практически не зависит от положения анода.

б) Под действием катодных лучей светятся многие вещества, причем характерным, специфическим светом (например, сернистый цинк в электронном луче дает светло-зеленое свечение). Свечение под действием быстрых электронов — так называемую катодOLUMИнесценцию — используют для изготовления люминесцирующих экранов. С их помощью можно обнаружить место, на которое падает электронный пучок.

в) Катодные лучи отклоняются от своего первоначального направления движения под действием электрического и магнитного поля.

г) Встречая на своем пути какое-либо препятствие, катодные лучи тормозятся. При этом они передают препятствию запас своей кинетической энергии, вследствие чего мишень разогревается.

д) Катодные лучи действуют на фотографическую пластинку.

е) Катодные лучи обладают ионизирующей способностью.

Дуговой газовый разряд. Профессор физики Петербургской медико-хирургической академии В. В. Петров открыл в 1802 г. электрическую дугу, раздвигая два кусочка древесного угля, предварительно приведенные в соприкосновение и присоединенные к мощной батарее гальванических элементов. Он обнаружил, что между концами углей возникает ярко светящийся столб газа, а сами угли раскаляются до ослепительного свечения.

В настоящее время дуговой газовый разряд при атмосферном давлении чаще всего получают между специальными угольными электродами, изготовленными из прессованного порошкообразного графита. Наиболее горячим местом дуги является углубление, образующееся на положительном угле, — так называемый кратер дуги. Его температура при атмосферном давлении равна 4000°C , а при давлении 20 атм превышает 7000°C , т. е. выше температуры поверхности Солнца (6000°C).

Хорошая электропроводность дуги поддерживается за счет высокой температуры катода.

Существуют различные виды практического применения электрической дуги.

а) Электрическая дуга используется в качестве весьма яркого источника света в проекционных и прожекторных установках.

б) В условиях дугового разряда получается высокая температура. Это свойство обусловило создание специальных дуговых электрических печей.

в) В 1876 г. русский изобретатель П. Н. Яблочков использовал электрическую дугу для освещения, сконструировав «электрическую свечу», получившую название «русский свет». Свеча Яблочкова состояла из двух угольных стержней, расположенных параллельно и разделенных слоем фарфоровой глины. Верхние концы углей соединялись тонкой угольной или металлической полоской. При замыкании цепи полоска стгорала и на вершине углей возникала светящаяся электрическая дуга. Вследствие высокой температуры изоляционный слой испарялся и угли постепенно и равномерно стгорали (равномерность стгорания обусловлена тем, что свеча включалась в цепь переменного тока).

г) Одним из продолжателей работ Петрова в области применения электрической дуги как источника тепла был русский изобретатель Н. Н. Бенардос. Заинтересовавшись способностью дуги давать много тепла, он изобрел метод электросварки железных листов (1882). Чтобы сплавить последние, Бенардос присоединял их к одному полюсу динамомашины, а провод от другого полюса отводил к угольному электроду. Когда электрод прикасался к стыку листов, между металлом и углем загоралась электрическая дуга. В пламя Бенардос вводил

металлический стержень. Под влиянием высокой температуры кромки листов сплавлялись, а стержень таял и сваривал шов.

В 1887—1890 гг. горный инженер Н. Г. Славянов внес существенные усовершенствования в электросварку. Он применил для сварки не угольный, а металлический электрод, который, расплавляясь, давал жидкий металл для заполнения шва. Это улучшило качество сварных швов и облегчило работу электросварщика.

Крупной вехой в развитии электросварки явилось создание группой советских инженеров и ученых, возглавляемых академиком АН УССР Е. О. Патоном, специальных электросварочных автоматов. Сварка производится под слоем флюса. (Флюсом называются особые порошкообразные вещества, издавна применявшиеся в металлургии для защиты расплавленного металла от действия воздуха.) «Сварочные тракторы», как называли новые аппараты, являются удобными и производительными машинами. Двигаясь вдоль свариваемого шва, они сами насыпают нужный слой флюса, подают под него электрод и обеспечивают нормальную работу дуги. Внедрение этого вида сварки в народное хозяйство началось в 1940—1941 гг.

Академик АН УССР К. К. Хренов является изобретателем подводной сварки. Дуга горит под водой, будучи защищена газовым пузырьком. Устойчивость пузырька обеспечена покрытием электрода специальной обмазкой.

В результате углубленных исследований сварочной дуги в Научно-исследовательском институте электросварки АН УССР, которым с 1953 г. руководит академик Б. Е. Патон — сын Е. О. Патона, были разработаны и внедрены в промышленность новые методы электросварки: электрошлаковая сварка, автоматическая наплавка, газозащитная сварка, автоматическая сварка цветных металлов и контактная сварка.

д) Большое практическое значение имеют вакуумные дуги. Ртутная дуга, являющаяся источником ультрафиолетовых лучей, получила широкое распространение в физиотерапии.

В заключение остановимся на понятии *плазмы*. Плазмой называют состояние газа, отличающееся столь высокой степенью ионизации, что концентрация электронов и ионов в нем очень велика. Так, например, состояние газа в положительном столбе тлеющего разряда, в дуговом разряде, в канале искрового разряда. В нейтральной плазме концентрация электронов и положительных ионов одинакова, поэтому суммарный пространственный заряд равен нулю. Под действием электрического поля электроны перемещаются к аноду. Однако упругие соударения, непрерывно испытываемые электронами в плазме, хаотически изменяют направления их скорости. Поэтому энергия, сообщаемая электронам электрическим полем, идет на усиление их теплового движения. Благодаря этому средняя кинетическая энергия электронов в плазме газового разряда очень велика. Соответ-

ствующая этой энергии температура электронного газа в плазме достигает десятков тысяч градусов и значительно превосходит действительную температуру газа.

В плазме непрерывно происходят два взаимно компенсирующих один другой процесса — ионизация и рекомбинация. Газоразрядная плазма устойчива только при наличии электрического поля. Прекращение действия поля приводит к почти мгновенному исчезновению газоразрядной плазмы в результате рекомбинации электронов и положительных ионов. При сверхвысоких температурах (порядка миллионов градусов) атомы газа полностью ионизируются, т. е. распадаются на электроны и ядра. Свойства такой высокотемпературной плазмы и способы ее получения приобрели в последнее время большое значение в связи с проблемой осуществления управляемых термоядерных реакций.

Контрольные вопросы к главе «Постоянный электрический ток»

1) Что называется электрическим током и каковы условия его возникновения?

2) Какая величина называется силой тока? В каких единицах она измеряется?

3) Как связаны между собой сила тока и плотность тока?

4) Что такое сопротивление и чем оно обуславливается?

5) От каких величин зависит сопротивление проводника?

6) Какая величина называется температурным коэффициентом сопротивления?

7) Какое соединение проводников называется последовательным и чему равно общее сопротивление при таком соединении?

8) Какое соединение проводников называется параллельным и чему равно общее сопротивление проводников при таком соединении?

9) Как распределяются токи в проводниках при их параллельном соединении?

10) Запишите формулу закона Ома для полной цепи.

11) Чему равна э. д. с. батареи, составленной из последовательно соединенных элементов? из параллельно соединенных элементов?

12) По каким формулам можно определить работу электрического тока, текущего по проводнику?

13) Какая величина называется мощностью и как определяется мощность электрического тока?

14) Почему при прохождении электрического тока проводник нагревается?

15) Как формулируется закон Джоуля—Ленца и с помощью каких формул может быть определено количество тепла, выделяющегося в проводнике при прохождении по нему электрического тока?

- 16) Что такое электролит?
- 17) Какое явление называется электролизом?
- 18) Как формулируются первый и второй законы Фарадея?
- 19) Каков физический смысл числа Фарадея?
- 20) Где в технике применяется электролиз?
- 21) Что такое газовый разряд?
- 22) В чем заключается разница между несамостоятельным и самостоятельным газовыми разрядами?
- 23) Что представляют собой тлеющий и дуговой разряды?
- 24) Какие лучи называются катодными и каковы их свойства?

Вопросы и задачи к главе «Постоянный электрический ток»

228. Каково сопротивление R медного провода диаметром 2 мм, если масса провода $m = 0,893$ кг? Удельное сопротивление меди $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$ ом \cdot м, плотность $d = 8,93$ г/см³.

229. В созданных А. Н. Лодыгиным первых электрических лампочках накаливался угольный стерженек. Определить сопротивление этого стерженька в нагретом состоянии, если он имел длину $l = 6$ см, диаметр $d = 2$ мм. Удельное сопротивление угля при 0°C $\rho = 7 \times 10^{-6}$ ом \cdot м, температурный коэффициент сопротивления $\alpha = -2 \times 10^{-4}$ 1/град. Нормальная температура накала стерженька 1600°C .

230. Электрическая цепь составлена из трех кусков провода одинаковой длины, сделанных из одинакового материала и соединенных последовательно. Сечение кусков различно: 1 мм², 2 мм², 3 мм². Разность потенциалов на концах цепи равна 12 в. Определить падение напряжения на каждом проводнике.

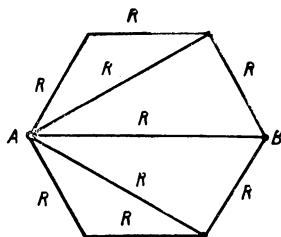


Рис. 72.

231. Цепь составлена из девяти проводников, образующих шестиугольник с диагоналями, исходящими из одной и той же вершины (рис. 72).

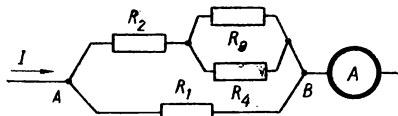


Рис. 73.

Сопротивление каждого из проводников равно R . Определить сопротивление всего участка между точками A и B .

232. В электрическую цепь (рис. 73) включены четыре сопротивления: $R_1 = 30$ ом, $R_2 = 12$ ом, $R_3 = 40$ ом, $R_4 = 10$ ом. Амперметр

показывает ток $I = 2$ а. Определить напряжение между точками A и B и силу тока в проводниках с сопротивлениями R_1 и R_2 .

233. В участке цепи (рис. 74) точки a и c , а также b и d соединены проводом, сопротивлением которого пренебрегаем. Найти сопротивление между точками 1 и 2, если величина каждого из включенных сопротивлений $R = 3$ ом.

234. В электрическую цепь (рис. 75) включены два одинаковых гальванических элемента с э. д. с. $E = 1,5$ в и внутренним

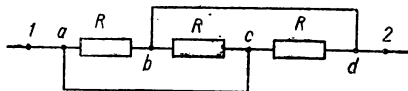


Рис. 74.

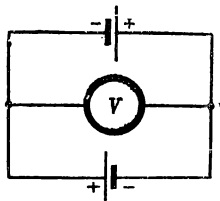


Рис. 75.

сопротивлением $r = 2$ ом. Какой ток проходит через элементы? Что показывает вольтметр? Сопротивлением соединительных проводов пренебречь.

235. Определить показания каждого из вольтметров, включенных в электрическую цепь (рис. 76), если $E_1 = 15,5$ в, $E_2 = 0,5$ в, $E_3 = 2,0$ в, $r_1 = 3,5$ ом, $r_2 = r_3 = 0,5$ ом, $R = 1,5$ ом.

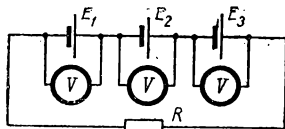


Рис. 76.

236. Батарея элементов подключена к внешнему сопротивлению, состоящему из двух параллельно соединенных сопротивлений, каждое по 4 ом. При этом вольтметр, включенный в цепь, показывает $U = 6$ в. Если одно сопротивление отключить, то вольтметр показывает $U_1 = 8$ в. Определить э. д. с. и внутреннее сопротивление батареи. Ток, текущий через вольтметр, не учитывать.

237. В цепь, состоящую из аккумулятора и сопротивления $R = 10$ ом, включали вольтметр — сначала последовательно, а затем параллельно сопротивлению R . Оба показания вольтметра одинаковы. Сопротивление вольтметра $R_1 = 1000$ ом. Каково внутреннее сопротивление аккумулятора?

238. Имеется 120-вольтная лампочка мощностью 40 вт. Какое добавочное сопротивление нужно включить последовательно с лампочкой, чтобы она давала нормальный накал при напряжении в сети 220 в? Сколько метров нихромовой проволоки диаметром 0,3 мм нужно взять, чтобы получить такое сопротивление?

239. В цепь включены последовательно медная и стальная проволоки одинаковой длины и диаметра. Найти: а) отношение количеств тепла, выделяющегося в этих проволоках; б) отношение падений напряжения на этих проволоках.

240. На плитке мощностью $0,5 \text{ кВт}$ нагревается чайник, в который налит 1 л воды при температуре 16°C . Вода в чайнике закипела через 20 мин после включения плитки. Какое количество тепла потеряно при этом на нагревание самого чайника, на излучение и т. д.?

241. Электрический чайник имеет две обмотки. При включении одной из них вода в чайнике закипает через 15 мин , при включении другой — через 30 мин . Через сколько времени закипит вода в чайнике, если включить обе обмотки: а) последовательно, б) параллельно?

242. Для нагревания $4,5 \text{ л}$ воды от 23°C до кипения нагреватель потребляет $0,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ электрической энергии. Чему равен к. п. д. нагревателя?

243. В цепь последовательно включены батарея с э. д. с. 120 в , сопротивление $R = 10 \text{ ом}$, электрический чайник и амперметр. Амперметр показывает 2 а . Через сколько времени закипит $0,5 \text{ л}$ воды, находящейся в чайнике при температуре 4°C ? Сопротивлением батареи и амперметра пренебречь. К. п. д. чайника $\eta = 76\%$.

244. Чему равна масса меди, выделенной из раствора медного купороса током 2 а в течение 6 ч ?

245. Какое требуется время, чтобы выделить $29,8 \text{ г}$ кислорода при электролизе воды током 2 а ?

246. Медная пластинка общей площадью 25 см^2 служит катодом при электролизе медного купороса. После пропускания в течение некоторого времени тока $0,5 \text{ а}$ масса пластинки увеличилась на 99 мг . Определить: а) как долго проходил ток; б) какой толщины слой меди образовался при этом на пластинке.

247. Амперметр, включенный последовательно с электролитической ванной с раствором AgNO_3 , показывает силу тока $0,9 \text{ а}$. Исправен ли этот амперметр, если за 5 мин прохождения тока выделилось 316 мг серебра?

248. Для получения алюминия электролизом раствора Al_2O_3 через расплавленный криолит пропускали ток $2 \cdot 10^4 \text{ а}$ при разности потенциалов на электродах 5 в . Найти время, в течение которого выделится 10^3 кг алюминия. Сколько электрической энергии при этом затрачено?

Глава XV. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

§ 89. Понятие о магнитном поле.

Магнитное поле прямого и кругового тока

В главе «Электростатика» было указано, что электрическое поле возникает вокруг покоящегося электрического заряда и обнаруживается по действию на пробный покоящийся заряд, вносимый в это поле.

Заряд, находящийся в движении, является источником магнитного поля. Это магнитное поле обнаруживается по действию на любой дви-

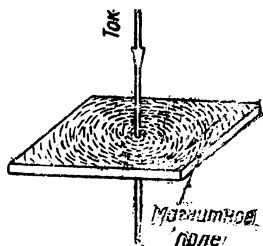


Рис. 77.

жущийся заряд и, в частности, на проводник с током. Силу действия на движущийся заряд называют магнитной силой. Если в некотором пространстве на движущийся заряд действует магнитная сила, то говорят, что в пространстве существует *магнитное поле*.

Таким образом, источником магнитного поля является любой движущийся заряд и, в частности, проводник с током.

Существование магнитного поля вокруг проводника с током можно обнаружить при помощи железных опилок. В магнитном поле кусочки железа, из которых состоят опилки, становятся маленькими магнитными стрелками. Магнитная стрелка, помещенная в магнитное поле, устанавливается так, что ее ось совпадает с направлением магнитного поля в данной точке. Поэтому расположение опилок, внесенных в магнитное поле, указывает на его характер.

Пользуясь этим методом, определим вид магнитного поля прямолинейного тока. Если железные опилки насыпать на лист картона, а сквозь него пропустить проводник с током, то опилки расположатся вокруг проводника с током по концентрическим окружностям (рис. 77). Линии, вдоль которых в магнитном поле располагаются оси маленьких магнитных стрелок, называются *магнитными силовыми линиями*.

Направление силовых линий магнитного поля можно определить с помощью так называемого *правила буравчика*, предложенного английским ученым Дж. Максвеллом. Если поступательное движение буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращательного движения рукоятки буравчика показывает направление магнитных силовых линий вокруг проводника с током.

Магнитные силовые линии прямого проводника с током лежат

в плоскостях, перпендикулярных проводнику, и имеют форму концентрических окружностей с центрами на проводнике с током.

Рассмотрим магнитное поле проводника, имеющего форму окружности. Пропустим по нему ток и при помощи опилок, насыпанных на лист картона, установим форму магнитных силовых линий такого кругового тока. Опыт показывает, что магнитные силовые линии и в этом случае имеют замкнутый характер и охватывают проводник с током (рис. 78).

Для определения направления магнитных силовых линий кругового тока можно воспользоваться или правилом буравчика, или следующим приемом: если буравчик вращать по направлению тока в проводнике, то движение его острия покажет направление магнитных силовых линий в центре кругового тока.

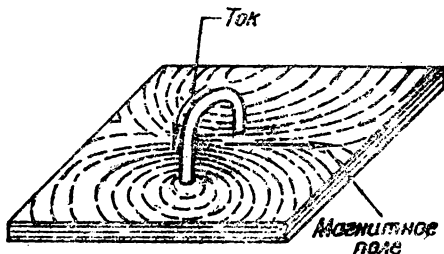


Рис. 78.

Из этих опытов видно, что направление тока перпендикулярно плоскости, в которой лежат магнитные силовые линии создаваемого им поля.

§ 90. Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле. Понятие о магнитной индукции

Мы уже знаем, что на проводник с током в магнитном поле действует некоторая сила. Рассмотрим подробнее, от каких величин она зависит. Наблюдая отклонение прямолинейного проводника с током в магнитном поле, можно установить, что сила F , действующая на проводник, зависит от силы тока I в проводнике, от длины l проводника и от того, как проводник расположен в магнитном поле:

$$F = BIl \sin \alpha,$$

где B — величина, являющаяся характеристикой магнитного поля, так называемая магнитная индукция; α — угол между направлением магнитных силовых линий и электрического тока в проводнике.

Приведенная формула для определения величины силы, действующей на проводник с током в магнитном поле, называется *формулой Ампера*.

Направление силы, действующей на проводник с током, можно определить по *правилу левой руки*: если ладонь левой руки расположить в магнитном поле так, чтобы магнитные силовые линии входили

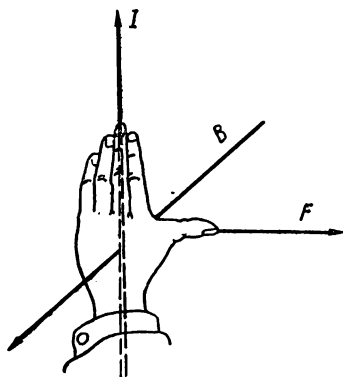


Рис. 79.

в ладонь, а четыре вытянутых пальца были направлены вдоль тока, то отогнутый большой палец укажет направление силы, действующей на проводник (рис. 79).

Выясним теперь, что представляет собой магнитная индукция B . Из закона Ампера получим

$$B = \frac{F}{Il \sin \alpha}.$$

Если проводник с током перпендикулярен магнитным силовым линиям, то $\sin \alpha = 1$, и тогда

$$B = \frac{F}{Il}.$$

Отсюда видно, что магнитная индукция — это величина, определяемая силой, которая действует на проводник единичной длины, расположенный перпендикулярно магнитным силовым линиям, если в проводнике протекает ток, равный единице силы тока.

Магнитная индукция B является величиной векторной. Направление вектора \vec{B} в данной точке магнитного поля совпадает с направлением касательной к силовой линии, проходящей через эту точку. Поэтому магнитные силовые линии называют также *линиями магнитной индукции*. Направления вектора магнитной индукции B , тока I в проводнике и силы \vec{F} , действующей на проводник с током в магнитном поле, взаимно перпендикулярны.

Магнитное поле, индукция которого во всех точках одинакова, называется *однородным*.

В системе СИ единицей магнитной индукции является тесла ($тл$).

Кроме индукции B , магнитное поле характеризуется напряжен-

ностью поля H . Эти две величины связаны между собой соотношением

$$B = \mu_0 H,$$

где μ , так называемая *относительная магнитная проницаемость* среды, — величина, показывающая, во сколько раз сила, действующая на проводник с током в данной среде, больше, чем в вакууме (при прочих равных условиях); μ_0 — магнитная постоянная, зависящая от выбора системы единиц. В системе СИ

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ гн/м} = 12,56 \cdot 10^{-7} \text{ в} \cdot \text{сек/а} \cdot \text{м}.$$

Для вакуума $\mu = 1$, поэтому

$$B_0 = \mu_0 H,$$

где B_0 — величина магнитной индукции в вакууме.

В системе СИ напряженность магнитного поля H измеряется в амперах на метр (а/м). Эта единица в системе СИ принимается равной напряженности такого магнитного поля, индукция которого в вакууме равна $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ тл}$, или

$$[H] = \frac{[B]}{[\mu_0]} = \frac{\text{в} \cdot \text{сек} \cdot \text{а} \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \cdot \text{в} \cdot \text{сек}} = \text{а/м}.$$

Магнитным потоком Φ через площадку S называют число силовых линий, проходящих через эту площадку. Магнитный поток связан с индукцией поля соотношением

$$\Phi = BS \cos \alpha,$$

где α — угол между направлением силовых линий и нормалью n к площадке S (направление нормали устанавливается из дополнительных соображений).

В системе СИ магнитный поток измеряется в веберах (вб). Определение единицы дано в § 93:

$$1 \text{ вб} = 1 \text{ тл} \cdot 1 \text{ м}^2 = 1 \text{ в} \cdot \text{сек}.$$

Откуда

$$1 \text{ тл} = \frac{1 \text{ вб}}{1 \text{ м}^2},$$

т. е. за единицу магнитной индукции принимается индукция магнитного поля, когда через поверхность в 1 м^2 , расположенную перпендикулярно магнитным силовым линиям, проходит магнитный поток в 1 вб .

Задача 1. На линейный проводник с током длиной $l = 0,4 \text{ м}$, помещенный в однородное магнитное поле, действует сила $F = 9 \times$

$\times 10^{-4}$ кГ. Определить угол между направлением тока и поля, если ток в проводнике $I = 10$ а, а напряженность поля $H = 6000$ а/м.

Решение. Сила, действующая на проводник с током,

$$F = BIl \sin \alpha;$$

но $B = \mu\mu_0 H$, тогда $F = \mu\mu_0 HIl \sin \alpha$, откуда

$$\sin \alpha = \frac{F}{\mu\mu_0 HIl}; \quad \sin \alpha = 0,292; \quad \alpha = 17^\circ.$$

Ответ. $\alpha = 17^\circ$.

Задача 2. Проводник длиной $l = 10$ см с током $I = 5$ а перемещается на расстояние $s = 20$ см в однородном магнитном поле с напряженностью $H = 2000$ а/м. Какая работа выполняется при этом, если перемещение проводника совершается перпендикулярно направлению силовых линий и направлению тока?

Решение. Воспользуемся формулами

$$A = F \cdot s; \quad F = BIl = \mu\mu_0 HIl.$$

Следовательно,

$$A = \mu\mu_0 HIl s; \quad A = 25 \cdot 10^{-5} \text{ дж.}$$

Ответ. $A = 25 \cdot 10^{-5}$ дж.

Задача 3. В однородное магнитное поле с напряженностью $H = 16\,000$ а/м внесен кусок стали поперечным сечением $S = 10$ см², с относительной магнитной проницаемостью $\mu = 5000$. Определить величину магнитного потока в стали.

Решение. Магнитный поток

$$\Phi = BS; \quad \Phi = \mu\mu_0 HS; \quad \Phi = 0,1 \text{ вб.}$$

Ответ. $\Phi = 0,1$ вб.

§ 91. Железо в магнитном поле

До сих пор мы рассматривали случаи, когда магнитное поле создается движущимися зарядами и, в частности, проводником с током. Однако нужно отметить, что магнитное поле создается также постоянными магнитами. Магниты обладают способностью притягивать железные предметы, взаимодействуют друг с другом и действуют на проводник с током.

На ранней стадии исследования магнетизма предполагали, что действие магнитов обусловлено существованием в них так называемых магнитных зарядов. Но сразу же после открытия магнитного взаимодействия токов французский ученый Ампер высказал такое пред-

положение: действие магнитов определяется тем, что в них имеются мельчайшие замкнутые электрические токи, циркулирующие внутри каждой молекулы. Эти молекулярные токи и являются источником магнитного поля, создаваемого магнитом.

Дальнейшие исследования магнетизма подтвердили правильность гипотезы Ампера и показали, что в природе нет магнитных зарядов, а молекулярные токи Ампера — это движение электронов по замкнутым орбитам внутри атома в поле положительно заряженного ядра. Совокупность полей, создаваемых всеми движущимися в атоме электронами, создает некоторое результирующее поле вокруг атома. Если атомы объединены в молекулы, то магнитные поля атомов образуют в совокупности магнитное поле молекулы. Наконец, существуют и значительно более крупные, чем молекулы, образования, которые играют в веществе роль самостоятельных маленьких магнитов (их называют доменами). Возникновение доменов определяется той или иной кристаллической структурой вещества. Определенным образом ориентированные домены и создают вокруг магнита сильное магнитное поле.

Посмотрим, что будет, если железный стержень, не создающий вне себя магнитное поле, т. е. не являющийся магнитом, ввести в магнитное поле катушки с током. Опыт показывает, что при этом железный стержень намагничивается. Это намагничивание объясняется следующим: в ненамагниченном железе молекулярные токи циркулируют в различных, беспорядочно ориентированных в пространстве плоскостях. Поэтому суммарное магнитное поле, создаваемое ими, равно нулю.

Под действием же магнитного поля катушки молекулярные токи поворачиваются так, что их плоскости устанавливаются параллельно виткам катушки (рис. 80). Суммарное поле, создаваемое этими токами, теперь становится отличным от нуля. Тепловое движение молекул железа частично расстраивает ориентировку плоскостей молекулярных токов, но чем сильнее магнитное поле катушки, тем большее число молекулярных токов устанавливается параллельно виткам. Этот процесс упорядочивания молекулярных токов идет до тех пор, пока все молекулярные токи не установятся параллельно виткам катушки. Такое состояние называется *магнитным насыщением железа*.

С прекращением тока в катушке тепловое движение молекул железа расстраивает ориентировку плоскостей молекулярных токов и железный сердечник размагничивается.

Магнитное поле внутри катушки при отсутствии железного сердечника определяется величиной магнитной индукции B_0 , которая с напряженностью поля H связана соотношением

$$B_0 = \mu_0 H.$$

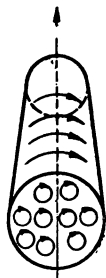


Рис. 80.

А магнитное поле внутри железного сердечника, вставленного в катушку с током, определяется так:

$$B = \mu \mu_0 H,$$

где μ — относительная магнитная проницаемость железа.

В чистом «мягком» железе (отожженном, а затем медленно охлажденном) намагничивание носит временный характер. Оно почти полностью исчезает с прекращением тока в катушке. В некоторых же сортах стали и специальных сплавах намагничивание сохраняется. Из этих материалов изготовляют постоянные магниты.

Железо, а также ряд веществ, которые ведут себя в магнитном поле аналогично железу (к ним относятся никель, кобальт и некоторые сплавы), называют *ферромагнетиками*. Для ферромагнетиков характерно то, что относительная магнитная проницаемость $\mu \gg 1$ и что она является величиной не постоянной, а зависящей от напряженности внешнего магнитного поля H .

§ 92. Электромагниты и практическое использование магнитных взаимодействий

Электромагнитом называют катушку с введенным внутрь нее железным сердечником. В зависимости от назначения электромагниты бывают самые разнообразные как по форме, так и по размерам. Для

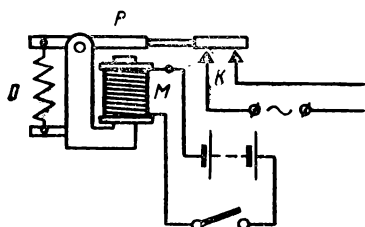


Рис. 81.

того чтобы поле, возникающее внутри электромагнита, было достаточно сильным (это требуется, например, в тех случаях, когда он используется в подъемном кране и должен обладать большой подъемной силой), электромагнит изготовляется с большим числом витков. Это позволяет при сравнительно малом токе иметь сильное поле внутри железного сердечника.

Электромагнитное реле представляет собой электромагнитный прибор, работающий на слабых токах. Принцип работы реле очень прост. При прохождении тока по обмотке электромагнита M (рис. 81) его железный сердечник притягивает железную пластинку P , которая замыкает контакты K рабочей цепи. В эту цепь могут быть включены электродвигатели, различные аппараты, электрические лампы и т. п. При размыкании управляющей цепи пружина Π оттягивает пластинку P вверх; этим размыкается рабочая цепь.

Реле широко применяется в различных областях техники. Это обусловлено тем, что реле управляет мощными процессами в рабочих электрических цепях с помощью слабых токов. От чувствительности пружины *П* зависит, при каком наименьшем управляющем токе реле сможет сработать.

Микрофон и телефон. Телефонная трубка устроена следующим образом: на одном ее конце укреплен телефон, при помощи которого мы слышим передаваемый разговор, а на другом — микрофон, воспринимающий звуки человеческого голоса и вызывающий соответствующие изменения тока в цепи.

Основными деталями микрофона (рис. 82) являются мембрана *М* и угольный порошок *П*, заключенный в металлическом корпусе *К*. Мембрана *М* представляет собой тонкую металлическую пластинку (иногда она изготавливается из прессованного угля). На дне металлического корпуса (изолированно от него) укреплен неподвижный электрод *А*. Подвижный электрод *В*, связанный с мембраной, вставлен в угольный порошок. Прокладка *С* отделяет порошок от мембраны. В электрическую цепь включается с одной стороны электрод *В* через мембрану *М*, а с другой — неподвижный электрод *А*.

Микрофон работает следующим образом. Когда на мембрану не попадают звуковые колебания, сопротивление порошка в микрофоне неизменно и ток в цепи постоянен. Звуковые волны, падающие на мембрану микрофона, приводят ее в колебания, что вызывает изменение давления электрода *В* на угольный порошок. При этом изменяется сопротивление между отдельными частицами порошка, что вызывает изменение тока в цепи. Эти изменения соответствуют колебаниям мембраны. Ток в цепи становится модулированным, т. е. изменяющимся по определенному закону (изменения силы тока соответствуют частоте звуковых волн). Таким образом, звуковые колебания в микрофоне вызывают изменения электрического тока, который по проводам попадает в телефон.

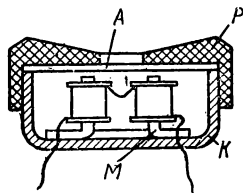


Рис. 83.

В корпусе *К* телефона (рис. 83) находится постоянный магнит *М* со стальными полюсными наконечниками, на которые надеты катушки из очень тонкого провода. Обмотки катушек соединены последовательно друг с другом. На корпусе *К* лежит мембрана *А*, представляю-

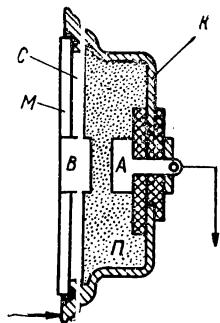


Рис. 82.

шая собой тонкую стальную пластинку круглой формы. Между мембраной и полюсными наконечниками имеется небольшой воздушный зазор. Крышка *Р* прижимает мембрану *А* к корпусу *К*.

Если в катушках телефона нет тока, то мембрана притягивается к полюсам магнита с некоторой постоянной силой. Когда же по катушкам телефона идет изменяющийся по величине ток, то он вызывает изменение магнитного поля катушек. Если частота изменения тока равна частоте звуковых колебаний, то и дополнительное магнитное поле, создаваемое им, будет изменяться в соответствии с этими колебаниями. Под действием изменяющегося магнитного поля мембрана телефона будет колебаться, приводя в колебание прилегающие к ней слои воздуха. В результате слушатель услышит в трубке телефона те слова и фразы, которые в это время произносит в микрофон его собеседник.

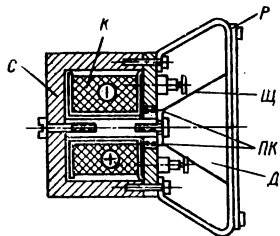


Рис. 84.

Громкоговоритель, так же как и телефон, служит для возбуждения звуковых волн под действием переменного тока, изменяющегося с частотой, соответствующей частоте звука. Рассмотрим наиболее распространенный вид громкоговорителя (рис. 84) — электродинамический («динамик»). На оси магнитного железного стержня *С* намотана подмагничивающая катушка *К*, питаемая постоянным током.

В крышке стакана сделана кольцевая щель *Щ*, пронизываемая постоянным магнитным потоком. В эту щель помещена подвижная катушка *ПК*, намотанная на легкий каркас, жестко связанный с бумажным конусом диффузором *Д*, который прикрепляется к раме *Р* при помощи какого-либо мягкого материала.

По подвижной катушке протекает переменный ток звуковой частоты. Взаимодействие этого тока с постоянным магнитным потоком, в котором находится катушка, вызывает колебания катушки, которые передаются связанному с ней диффузору. Колеблющийся диффузор создает в окружающем воздухе звуковые волны.

Электроизмерительные приборы. Стрелочные приборы, применяемые в измерительной технике, разделяются на системы в зависимости от того или иного действия тока и магнитного поля, используемых для создания вращающего момента. Большое число измерительных приборов можно разделить на три класса: а) приборы, в которых взаимодействуют постоянные магниты и провода с током (магнитоэлектрические); б) приборы, в которых части из мягкого железа втягиваются в катушки с током (электромагнитные); в) приборы, в которых взаимодействуют две катушки с током (электродинамические).

а) Магнитоэлектрические приборы. Легкая алюминиевая рамка ab (рис. 85) с обмоткой из нескольких сот витков очень тонкой изолированной проволоки свободно вращается на остриях из закаленной стали, упирающихся в агатовые подшипники. Концы обмотки рамки припаяны к двум плоским спиральным пружинам C , имеющим противоположную навивку. Измеряемый ток или непосредственно (если он достаточно слаб: $10^{-3} - 10^{-4}$ а), или посредством шунта (ответвляющего лишь определенную его часть) подводится к прибору через провода и спиральные пружинки. Проходя по обмотке, ток взаимодействует с полем магнита, которое вызывает появление

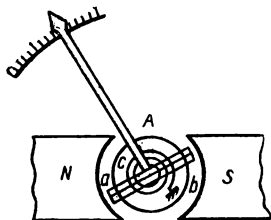


Рис. 85.

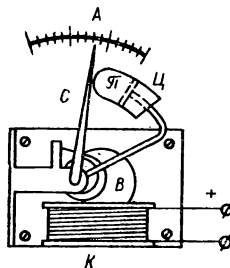


Рис. 86.

пары сил (в этом можно убедиться, применяя правило левой руки). Эта пара сил стремится повернуть рамку так, чтобы ее магнитное поле совпало по направлению с полем магнита.

Для увеличения магнитного потока, пронизывающего рамку, внутри нее помещают железный цилиндр A , скрепленный с арматурой прибора так, что он не препятствует свободному повороту рамки в необходимых пределах. При изменении направления тока в катушке изменяется направление ее вращения, поэтому магнитоэлектрические приборы непригодны для измерения переменных токов. Шкала магнитоэлектрических приборов имеет равномерные деления.

б) Электромагнитные приборы. Железная пластинка B (рис. 86) помещена вблизи катушки K . При пропускании тока по катушке пластинка втягивается в катушку, поворачивая стрелку C вдоль шкалы A . Цилиндр C , в котором движется поршень P , служит для успокоения колебаний стрелки. Связанная с осью пластины B пружина, закручиваясь, создает противодействующий момент. Приборы электромагнитной системы применяются для измерений в цепях постоянного и переменного тока. Шкала у них неравномерная.

в) Электродинамические приборы не содержат постоянных магнитов. В них имеются две катушки: подвижная и неподвижная, вставленные одна в другую. При пропускании тока последовательно через обе катушки на подвижную катушку будет действовать механический момент, пропорциональный силе тока I в этой катушке и величине индукции B , создаваемой током, который идет в неподвижной катушке, т. е. опять силе тока I . Таким образом, вращающий момент пропорционален квадрату силы тока. Электродинамические приборы пригодны как для постоянных, так и для переменных токов.

§ 93. Явление электромагнитной индукции

Уже говорилось о том, что вокруг проводника с током возникает магнитное поле. Существует и обратное явление: магнитное поле вызывает появление электрического тока. Это явление, открытое М. Фарадеем в 1831 г., называется *электромагнитной индукцией*.

Явление электромагнитной индукции заключается в следующем: во всяком замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока через площадь, ограниченную этим контуром, возникает электрический ток.

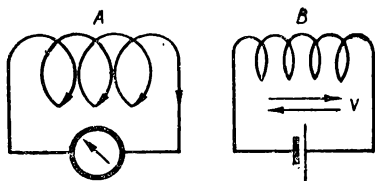


Рис. 87.

Явление электромагнитной индукции можно наблюдать на следующих опытах. Возьмем соленоид A (рис. 87), замкнутый через гальванометр, и возле него поместим второй соленоид B , по которому пропустим электрический ток. Тогда, если второй соленоид приближать

к первому или удалять от него, в соленоиде A возникает электрический ток. О наличии его свидетельствует отклонение стрелки гальванометра. Возникает ток в соленоиде A и в том случае, когда он перемещается относительно неподвижного соленоида B или когда замыкают либо размыкают ток в соленоиде B . Направление возникающего в соленоиде A тока будет различным при замыкании и размыкании тока, а также при сближении и удалении катушек.

Такие же опыты можно осуществить, взяв вместо соленоидов контуры из одного витка провода, но возникающие токи в этом случае будут слабее.

Из приведенных опытов вытекает следующее: в соленоиде A возникает ток тогда, когда изменяется магнитный поток через площадь, охватываемую этим соленоидом. Именно изменение магнитного потока

и является причиной появления в катушке *A* так называемого *индукционного тока*.

Индукционный ток возникает также, если проводящий замкнутый контур поворачивать в однородном магнитном поле, так как при этом изменяется поток магнитной индукции через площадь контура. Если же замкнутый контур двигать поступательно в однородном магнитном поле, то магнитный поток через площадь контура остается постоянным и индукционный ток не возникает.

Таким образом, формулировка, приведенная в начале параграфа, подтверждается на опытах: индукционный ток в замкнутом проводящем контуре возникает при изменении магнитного потока через площадь контура.

Явление электромагнитной индукции можно определить еще и так: при изменении количества магнитных силовых линий, проходящих через площадь контура, в контуре возникает индукционный ток. Поэтому индукционный ток возникает в проводнике в том случае, если проводник или какая-либо его часть пересекает магнитные силовые линии. Последнее заключение было сделано Фарадеем при изучении явления электромагнитной индукции.

Направление индукционного тока определяется по правилу, установленному профессором Петербургского университета Э. Х. Ленцем: *индукционный ток, возникающий в замкнутом контуре, имеет такое направление, при котором его магнитное поле противодействует изменению магнитного потока, вызывающему этот ток.*

Рассмотрим пример: пусть замкнутый контур из положения *I* (рис. 88) перемещается в положение *II* в магнитном поле, создаваемом соленоидом *A*. Определить направление тока в контуре, возникающего при этом перемещении. Контур перемещается из более сильного поля в более слабое. Поэтому ток, возникающий в контуре, будет такого направления, что создаваемое им магнитное поле имеет то же направление силовых линий, что и внешнее поле, в котором движется контур. Пользуясь правилом буравчика, определим направление индукционного тока, создающего такое магнитное поле. Ток в контуре проходит в направлении, указанном стрелкой.

Направление индукционного тока, возникающего в проводнике при его перемещении в магнитном поле, можно определить с помощью *правила правой руки*: если ладонь правой руки поместить в магнитном поле так, что магнитные силовые линии входят в ладонь, а отогнутый большой палец указывает направление движения проводника,

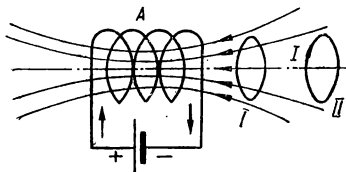


Рис. 88.

то положение четырех вытянутых пальцев определяет направление возникающего индукционного тока.

Возникновение тока в контуре обуславливается появлением в последнем некоторой электродвижущей силы — *э. д. с. индукции*. Величина ее определяется по формуле

$$E = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t},$$

где $\Delta \Phi$ — изменение потока магнитной индукции за время Δt . Отношение $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ определяет скорость изменения магнитного потока. Знак

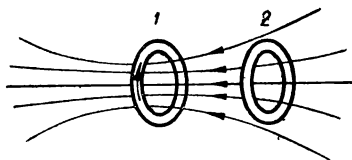


Рис. 89.

«минус» поставлен потому, что индукционный ток создает магнитное поле, *противодействующее* изменению магнитного потока, вызывающему этот ток.

Формула является основной для определения единицы измерения магнитного потока в системе СИ. 1 *вебер* — это магнитный поток, при убывании которого до нуля в течение 1 сек в цепи индуцируется э. д. с. в 1 в.

При движении проводника в магнитном поле на концах этого проводника возникает разность потенциалов. Это обусловлено тем, что проводник пересекает магнитные силовые линии. Величина этой разности потенциалов определяется по формуле

$$\Delta \varphi = - Blv \sin(\widehat{B, v}),$$

где B — магнитная индукция; l — длина проводника; v — скорость его перемещения; $(\widehat{B, v})$ — угол между направлением магнитных силовых линий и направлением скорости движения.

Взаимная индукция. Рассмотрим два контура (рис. 89), например два круговых витка 1 и 2, расположенных произвольно один относительно другого. Пусть по витку 1 проходит переменный электрический ток. Тогда в окружающем пространстве он создает переменное магнитное поле. При этом будет изменяться магнитный поток через площадь витка 2, что приведет к появлению индукционного тока в этом витке.

Таким образом, изменение силы тока, текущего в одном из контуров, приводит к появлению индукционного тока во втором контуре. Это явление называется взаимной индукцией. При этом говорят, что контуры 1 и 2 индуктивно связаны между собой.

Задача 1. Соленоид, имеющий $n = 50$ витков и диаметр $d = 8$ см, находится в магнитном поле напряженностью $H = 40\,000$ а/м, причем ось соленоида параллельна вектору \vec{H} . Соленоид поворачивается на 180° за время $\Delta t = 0,1$ сек. Ось вращения перпендикулярна оси соленоида. Найти среднее значение э. д. с., возникающей при этом в соленоиде. Магнитная постоянная $\mu_0 = 12,56 \cdot 10^{-7}$ гн/м.

Решение. Величина э. д. с. индукции определяется по формуле

$$E = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

Величину $\Delta \Phi$ найдем так: магнитный поток через площадь всех витков равен $\Phi = n\Phi_1 = nBS = n\mu_0 HS$. При повороте соленоида на 180° поток сначала уменьшится до нуля, а затем опять примет первоначальное значение; следовательно, изменение потока

$$\Delta \Phi = 2n\mu_0 HS.$$

Поэтому для э. д. с., возникающей в контуре, получим:

$$|E| = \frac{2n\mu_0 HS}{\Delta t} = \frac{2n\mu_0 H \frac{\pi d^2}{4}}{\Delta t} = \frac{n\mu_0 H \pi d^2}{2\Delta t}; \quad E = 0,25 \text{ в.}$$

Ответ. $E = 0,25$ в.

Задача 2. В однородном магнитном поле, индукция которого $B = 0,1$ тл, равномерно вращается катушка, состоящая из $n = 100$ витков проволоки, со скоростью $\nu = 5$ об/сек. Площадь поперечного сечения катушки $S = 100$ см². Ось вращения перпендикулярна оси катушки и направлению магнитного поля. Найти максимальную э. д. с. индукции во вращающейся катушке.

Решение. Максимальная э. д. с. индукции

$$E_{\max} = \Phi_1 n \omega = B S n 2\pi \nu,$$

где ω — угловая скорость вращения катушки; Φ_1 — поток через один виток катушки; n — число витков катушки; ν — число оборотов катушки за одну секунду.

Подставляя численные значения, получим

$$E_{\max} = 0,1 \text{ тл} \cdot 10^{-2} \text{ м}^2 \cdot 100 \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot 5 \frac{1}{\text{сек}} = 3,14 \text{ в.}$$

Ответ. $E_{\max} = 3,14$ в.

Задача 3. В магнитном поле, индукция которого $B = 5 \times 10^{-2}$ тл, вращается стержень длиной $l = 1$ м с постоянной угло-

вой скоростью $\omega = 20 \text{ рад/сек}$. Ось вращения проходит через конец стержня и параллельна силовым линиям магнитного поля. Найти э. д. с. индукции, возникающую на концах стержня.

Решение. Стержень, вращаясь, пересекает магнитные силовые линии. При каждом обороте он пересекает магнитный поток:

$$\Phi_1 = BS = B\pi l^2.$$

Делая за секунду ν оборотов, стержень пересекает поток, в ν раз больший. Так как это изменение потока происходит за 1 сек, то величина изменения и определяет э. д. с. индукции:

$$E = -B\pi l^2 \nu.$$

Частота ν и угловая скорость ω связаны между собой следующим образом: $\omega = 2\pi\nu$, откуда $\nu = \frac{\omega}{2\pi}$. Тогда находим

$$E = -B\pi l^2 \frac{\omega}{2\pi} = -\frac{Bl^2\omega}{2}; \quad |E| = 0,5 \text{ в.}$$

Ответ. $E = 0,5 \text{ в.}$

Задача 4. Определить индукцию B однородного магнитного поля, если в проводнике длиной 15 м, который перемещается со скоростью 10 м/сек, перпендикулярно полю и самому себе, индуцируется э. д. с. $E = 0,9 \text{ в.}$

Решение. Величина индуцируемой э. д. с. определится по формуле

$$|E| = Blv \sin \alpha.$$

В нашем случае $\sin \alpha = 1$, поэтому для B находим

$$B = \frac{E}{lv}; \quad B = 6 \cdot 10^{-3} \text{ тл.}$$

Ответ. $B = 6 \cdot 10^{-3} \text{ тл.}$

Задача 5. В однородном магнитном поле с напряженностью $H = 8 \cdot 10^4 \text{ а/м}$ помещен проводник длиной $l = 20 \text{ см}$ и сопротивлением $R = 10 \text{ ом}$. Проводник соединен с источником тока, э. д. с. которого $E = 10 \text{ в}$ и внутреннее сопротивление $r = 0,001 \text{ ом}$. Под действием магнитного поля проводник начинает перемещаться перпендикулярно силовым линиям поля со скоростью $v = 10 \text{ м/сек}$. Определить силу тока I в проводнике.

Решение. При движении проводника в магнитном поле в нем индуцируется э. д. с. индукции

$$E_i = -Blv = -\mu_0 Hlv.$$

Э. д. с., которая будет возбуждать ток, определится как алгебраическая сумма E и E_i ; поэтому

$$I = \frac{E + E_i}{R + r} = \frac{E - \mu_0 H l v}{R + r}; \quad I \approx 0,98 \text{ а.}$$

Отв. $I \approx 0,98 \text{ а.}$

§ 94. Явление самоиндукции

Явление электромагнитной индукции наблюдается во всех случаях, когда изменяется поток магнитной индукции B через площадь, ограниченную проводником. При этом совершенно безразлично, чем создается изменение потока. Если в некотором замкнутом контуре течет непостоянный ток, то магнитное поле, создаваемое этим током, тоже непостоянно. Вследствие этого изменяется поток магнитной индукции через площадь, ограниченную контуром самого тока. Изменение потока магнитной индукции приведет к возникновению в контуре э. д. с. Такую э. д. с. индукции, которая возникает в каком-либо контуре вследствие изменения потока индукции, создаваемого электрическим током этого самого контура, называют *э. д. с. самоиндукции*.

Посмотрим, от чего зависит э. д. с. самоиндукции. По общему определению э. д. с. индукции мы можем записать:

$$E_c = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

С другой стороны, поток индукции Φ пропорционален силе тока I , текущего в проводнике:

$$\Phi = LI.$$

Коэффициент пропорциональности L называют *индуктивностью* контура, или *коэффициентом самоиндукции*.

Подставляя величину Φ в формулу для E_c , получим

$$E_c = - L \frac{\Delta I}{\Delta t},$$

где $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ — скорость изменения тока в проводнике.

Из формулы видно, что э. д. с. самоиндукции пропорциональна скорости изменения тока, текущего по проводнику.

Решая эту формулу относительно L , мы получим выражение, с помощью которого можно установить физический смысл коэффициента самоиндукции:

$$|L| = \frac{E_c}{\frac{\Delta I}{\Delta t}},$$

т. е. индуктивность контура есть величина, определяемая э. д. с. самоиндукции, возникающей в контуре, когда за единицу времени ток в нем изменяется на единицу. В системе СИ индуктивность L измеряется в генри. 1 *генри* — это индуктивность такого контура, в котором индуцируется э. д. с. в 1 в при изменении тока в контуре на 1 а за каждую секунду.

Индуктивность контура зависит от его размеров и формы. Индуктивность катушки зависит от числа витков в ней, ее длины, поперечного сечения и от того, какой сердечник помещен внутрь ее. Для индуктивности катушки, длина которой велика по сравнению с ее диаметром, имеем:

$$L = \mu \mu_0 n^2 V,$$

где n — число витков, приходящихся на единицу длины катушки; V — объем катушки.

Задача. Найти индуктивность катушки, имеющей на длине $l = 20$ см $N = 400$ витков. Площадь поперечного сечения катушки $S = 9$ см². Относительная магнитная проницаемость материала сердечника в условиях работы $\mu = 400$.

Решение. Индуктивность катушки $L = \mu \mu_0 n^2 V$, по $n = \frac{N}{l}$, откуда

$$L = \mu \mu_0 \frac{N^2}{l^2} l S = \mu \mu_0 \frac{N S}{l}; \quad L = 9 \cdot 10^{-4} \text{ гн.}$$

Ответ. $L = 9 \cdot 10^{-4}$ гн.

Контрольные вопросы к главе «Магнитное поле и электромагнитная индукция»

- 1) Что такое магнитное поле и чем оно вызывается?
- 2) Какой характер имеет магнитное поле прямого тока? кругового тока?
- 3) Что называется силовой линией магнитного поля?
- 4) С помощью какого правила можно определить направление магнитных силовых линий?

5) Как по величине и направлению определяется сила, действующая на проводник с током в магнитном поле?

6) Какую величину называют магнитной индукцией и в каких единицах она измеряется?

7) Как связаны между собой магнитная индукция и напряженность магнитного поля?

8) Какую величину называют магнитным потоком?

9) Что происходит с железом при внесении его в магнитное поле?

10) Объясните принцип работы электромагнитного реле.

11) Какие существуют основные классы электроизмерительных приборов и в чем состоит принцип их действия?

12) В чем сущность явления электромагнитной индукции?

13) По какой формуле определяется э. д. с. индукции и какой физический смысл имеет знак «минус» в этой формуле?

14) В чем состоит закон Ленца?

15) Как определяется э. д. с. индукции, возникающая в проводнике при его движении в магнитном поле?

16) Как формулируется правило правой руки?

17) В чем сущность явления самоиндукции?

18) Что называется индуктивностью и каков ее физический смысл?

Вопросы и задачи к главе «Магнитное поле и электромагнитная индукция»

249. Определить индукцию магнитного поля между полюсами электромагнита, если проводник весом 1 н на 1 м длины проводника при токе в нем 20 а висит в поле этого электромагнита.

250. Какая мощность необходима для того, чтобы проводник длиной $l = 20\text{ см}$ перемещался со скоростью $v = 5\text{ м/сек}$ перпендикулярно магнитному полю напряженностью $H = 40\,000\text{ а/м}$, если по проводнику проходит ток $I = 10\text{ а}$?

251. Определить магнитный поток, пересекаемый радиусом диска за одну минуту вращения, если радиус диска $r = 10\text{ см}$, индукция магнитного поля $B = 0,1\text{ тл}$; диск делает $5,3\text{ об/сек}$.

252. Определить магнитную индукцию в никелевом стержне, помещенном в магнитное поле с напряженностью $H = 24\,000\text{ а/м}$. Относительную магнитную проницаемость никеля принять равной $\mu = 2$.

253. Между полюсами электромагнита создается однородное магнитное поле, индукция которого $B = 0,1\text{ тл}$. По проводу длиной $l = 70\text{ см}$, помещенному перпендикулярно силовым линиям, проходит ток силой $I = 70\text{ а}$. Найти силу, действующую на проводник.

254. В однородном магнитном поле, напряженность которого $H = 8 \cdot 10^4\text{ а/м}$, помещена квадратная рамка; ее плоскость составляет

с направлением магнитного поля угол 45° . Длина стороны рамки 4 см . Определить магнитный поток, пронизывающий эту рамку.

255. Рамка с замкнутой обмоткой из 100 витков проволоки вращается вокруг горизонтальной оси, лежащей в плоскости рамки и перпендикулярной магнитному полю Земли. Какой заряд индуцируется в рамке при повороте ее на 90° от положения, в котором плоскость рамки совпадает с направлением магнитных силовых линий? Площадь рамки $S = 2000\text{ см}^2$; сопротивление обмотки $R = 4\text{ ом}$; индукция магнитного поля Земли $B = 5 \cdot 10^{-5}\text{ тл}$.

256. Определить среднюю величину э. д. с., возникающей при размыкании тока в электромагните, если площадь его поперечного сечения $S = 30\text{ см}^2$, число витков его обмотки $N = 1000$, магнитная индукция $B = 1,6\text{ тл}$ и время размыкания $t = 0,001\text{ сек}$.

257. Пользуясь правилом Ленца, определить направление тока самоиндукции, возникающего в контуре в моменты замыкания и размыкания тока.

Глава XVI. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

§ 95. Генерирование переменного тока

Пусть в постоянном и однородном магнитном поле помещен замкнутый проводник, например один виток провода, охватывающий площадь S . Будем вращать этот виток вокруг оси, перпендикулярной направлению магнитных силовых линий. Когда плоскость витка перпендикулярна магнитным силовым линиям, то поток индукции через этот виток максимален и равен

$$\Phi_0 = BS = \mu_0 HS.$$

При повороте витка на 90° поток через его площадь станет равным нулю.

Таким образом, при вращении витка в магнитном поле все время изменяется магнитный поток через площадь, ограниченную контуром. Это изменение магнитного потока приводит к тому, что в контуре индуцируется э. д. с., в результате чего возникает электрический ток. Этот ток также изменяется со временем как по величине, так и по направлению. Такой ток называют *переменным током*.

Рассмотрим подробнее процесс образования переменного тока. Из рис. 90 мы видим, что магнитный поток, пронизывающий контур, будет максимальным тогда, когда плоскость вращающегося витка перпендикулярна магнитным силовым линиям (рис. 90, а, в). Скорость же изменения этого потока $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ в этом случае равна нулю, так

как при прохождении через это положение участки витка ab и cd скользят вдоль силовых линий, не пересекая их. Отсюда следует, что э. д. с. индукции, возникающая в этом случае в контуре, равна нулю.

Когда же плоскость витка параллельна силовым линиям поля (рис. 90, б, г), поток, пронизывающий его, равен нулю; скорость же изменения этого потока максимальна, так как участки контура ab

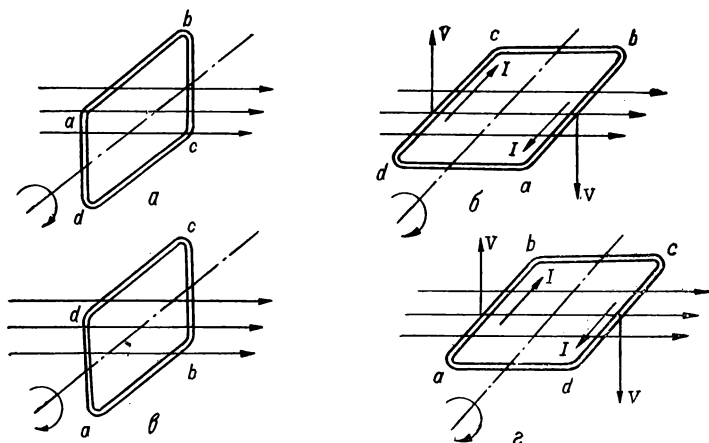


Рис. 90.

и cd пересекают магнитные силовые линии под прямым углом. Отсюда следует, что э. д. с. индукции, возникающая в контуре, будет в этом случае максимальной.

При вращении витка э. д. с., возникающая в нем, все время изменяется, изменяется и ток в витке. Направление тока, возникающего в участках ab и cd при вращении витка, можно определить по правилу правой руки. Мы видим, что при разных положениях витка ток на участках ab и cd изменяет свое направление. Следовательно, изменяется и направление тока во всем витке.

Таким образом, при вращении витка в магнитном поле в нем возникает переменный ток.

§ 96. Основные величины, характеризующие переменный ток

Электрический ток, возникающий в вилке при вращении его в магнитном поле, характеризуется тем, что сила его изменяется со временем по синусоидальному закону:

$$I = I_m \sin(\omega t + \varphi_0).$$

Значение тока I в любой момент времени называется *мгновсным значением* переменного тока. Наибольшее значение тока I_m называется *амплитудным значением* переменного тока. Промежуток времени T , за который переменная э. д. с. совершает одно полное колебание, называется *периодом переменного тока*.

Круговая частота переменного тока ω связана с частотой колебаний f и периодом T соотношением

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{1}{T}.$$

Частотой колебаний f называют число полных колебаний, совершаемых за 1 сек. Частота промышленного переменного тока $f = 50$ гц, т. е. равна 50 колебаниям в секунду.

Э. д. с. источника переменного тока или напряжение на зажимах какого-либо участка внешней цепи изменяется во времени, так же как и ток, по синусоидальному закону:

$$E = E_m \sin(\omega t + \varphi_0);$$

$$U = U_m \sin(\omega t + \varphi_0).$$

При прохождении переменного тока по проводнику в нем (как и в случае прохождения постоянного тока) выделяется тепло. Как же определить, какое количество тепла выделится в проводнике за время t при прохождении по нему переменного тока с заданным амплитудным значением I_m ?

Мгновенные значения переменного тока изменяются от одного момента времени к другому. Поэтому количество тепла, выделяемое в проводнике за какое-то определенное время, будет разным для разных моментов времени. Можно подобрать такой постоянный ток, который за длительный промежуток времени выделит в рассматриваемом проводнике то же количество тепла, что и заданный переменный ток.

Такой постоянный ток, который за одинаковый промежуток времени выделяет в одном и том же проводнике то же количество тепла, что и переменный с данным амплитудным значением, называется

эффективным, или действующим, значением переменного тока. Так же определяется и эффективное значение напряжения.

Эффективные значения тока и напряжения связаны с амплитудными значениями такой зависимостью:

$$I_{\text{эф}} = \frac{I_{\text{м}}}{\sqrt{2}} = 0,707 I_{\text{м}};$$

$$U_{\text{эф}} = \frac{U_{\text{м}}}{\sqrt{2}} = 0,707 U_{\text{м}},$$

где $I_{\text{эф}}$ и $U_{\text{эф}}$ — эффективные значения тока и напряжения. Обычно в практике величину переменного тока и его напряжение характеризуют именно эффективными (а не амплитудными) значениями. Так, например, 220 в обычной осветительной сети переменного тока являются эффективным напряжением; соответствующее амплитудное значение, т. е. наибольшее значение, которого достигает напряжение в сети, составляет 310 в.

Задача 1. Рамка, содержащая $n = 500$ витков с площадью поперечного сечения витка $S = 400 \text{ см}^2$, вращается в магнитном поле с напряженностью $H = 2 \cdot 10^4 \text{ а/м}$. Определить э. д. с. индукции через 0,01 сек после начала движения рамки из нейтрального положения, если амплитудное значение э. д. с. $E_{\text{м}} = 25 \text{ в}$; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ гн/м}$.

Решение. Амплитудное значение э. д. с. переменного тока

$$E_{\text{м}} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \mu\mu_0 H S n \omega,$$

откуда находим:

$$\omega = \frac{E_{\text{м}}}{\mu\mu_0 H S n}; \quad \omega = 49,8 \text{ рад/сек.}$$

$$E = E_{\text{м}} \sin \omega t; \quad \omega t = 0,498 \text{ рад} = 28^\circ 30';$$

$$E = 25 \text{ в} \cdot 0,4772 = 12 \text{ в.}$$

Ответ. Э. д. с. индукции в рамке будет равна 12 в.

Задача 2. Мгновенное значение э. д. с. синусоидального тока $E = 120 \text{ в}$ для фазы $\varphi = 40^\circ$. Каково амплитудное и действующее значение э. д. с.?

Решение. Мгновенное значение э. д. с.

$$E = E_{\text{м}} \sin \varphi;$$

$$E_{\text{м}} = \frac{E}{\sin \varphi}; \quad E_{\text{м}} = \frac{120 \text{ в}}{0,6428} = 187 \text{ в.}$$

Для эффективного значения э. д. с. находим

$$E_{\text{эф}} = \frac{E_m}{\sqrt{2}}; E_{\text{эф}} = \frac{1,87}{1,414} \text{ в} = 132 \text{ в}.$$

Ответ. Амплитудное значение э. д. с. равно 187 в, а действующее — 132 в.

§ 97. Сопротивление при переменном токе

Пусть переменный ток проходит по цепи, в которую включены конденсатор и катушка индуктивности. В этом случае сила тока будет зависеть не только от напряжения и сопротивления цепи, но также и от величины емкости конденсатора и индуктивности катушки. Рассмотрим отдельно влияние индуктивности и емкости на силу тока в цепи переменного тока.

Предположим, что в цепь включена катушка индуктивности. Тогда при прохождении переменного тока в цепи будет возникать добавочная э. д. с. самоиндукции. Как известно, э. д. с. самоиндукции всегда направлена против внешней э. д. с., поэтому сила переменного тока при наличии самоиндукции в цепи будет меньше, чем без нее.

Так как сопротивление цепи измеряется отношением напряжения к силе тока, проходящего по ней, то можно сказать, что наличие в цепи катушки индуктивности увеличивает общее сопротивление цепи переменного тока.

Э. д. с. самоиндукции, а следовательно, и индукционный ток тем больше, чем больше скорость изменения тока в катушке и индуктивность катушки L . Скорость же изменения переменного тока по величине тем больше, чем выше частота тока. Поэтому сопротивление X_L катушки индуктивности переменному току пропорционально частоте переменного тока и коэффициенту самоиндукции катушки:

$$X_L = \omega L,$$

где $\omega = 2\pi f$ — круговая частота переменного тока.

Рассмотрим теперь цепь переменного тока с введенным в нее конденсатором. Для постоянного тока конденсатор представляет разрыв цепи: постоянный ток через конденсатор не проходит. Если же подключить конденсатор к генератору переменного тока, то он будет попеременно заряжаться и разряжаться. В связи с этим в цепи, содержащей конденсатор и генератор, все время будет проходить ток разрядки и зарядки конденсатора то в одном, то в другом направлении. Поэтому можно сказать, что переменный ток «проходит через

конденсатор», подразумевая при этом не прохождение тока через сам конденсатор, а наличие тока в проводах цепи.

Так как заряд конденсатора пропорционален емкости, то чем больше емкость конденсатора, тем больший заряд будет перемещаться по цепи. Чем выше частота, тем быстрее конденсатор заряжается и разряжается и тем, следовательно, больше зарядов проходит в цепи за единицу времени. Поэтому чем больше ω и C , тем больший ток проходит в цепи.

Сопротивление X_C конденсатора переменному току равно

$$X_C = \frac{1}{\omega C},$$

где C — емкость конденсатора.

§ 98. Генератор переменного тока.

Выпрямление переменного тока.

Генератор постоянного тока

Генератором называется машина, превращающая механическую энергию в энергию электрического тока.

Генератор переменного тока. Моделью генератора может служить проводник в виде рамки, вращающийся в магнитном поле постоянного магнита (рис. 91). При вращении в рамке индуцируется переменная э. д. с. Если рамку соединить с внешней частью цепи, то в цепи будет проходить переменный ток.

Для соединения рамки с внешней цепью используются кольца, укрепленные на оси рамки. К кольцам присоединяются концы рамки, а под кольцами устанавливаются неподвижные скользящие контакты — так называемые щетки. При вращении рамки на щетках возникает переменное напряжение, причем за один полный оборот рамки полярность щеток меняется два раза.

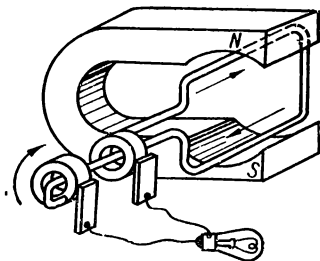


Рис. 91.

На практике для увеличения напряжения на рамку наматывают не один, а много витков. Такой тип генераторов переменного тока с вращающимися витками и неподвижной магнитной системой встречается редко. Объясняется это недостатками данной системы генераторов; с помощью подвижных контактов практически невозможно отводить высокое напряжение, снимаемое обычно с генераторов.

в подвижных контактах возникает очень сильное искрение. Чтобы избежать этого, в большинстве генераторов переменного тока обмотку (якорь), в которой индуцируется э. д. с., делают неподвижной, а вращается магнитная система (индуктор).

Неподвижная часть машины называется *статором*, вращающаяся — *ротором*. Статор генератора переменного тока собирают из листовой стали (чтобы избежать вихревых токов). В пазах, сделанных во внутренней полости статора, укладывают проводники, в которых индуцируется э. д. с. Ротор, вращающийся внутри статора, представляет собой электромагнит, магнитное поле которого создается постоянным

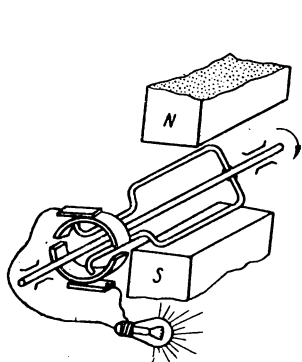


Рис. 92.

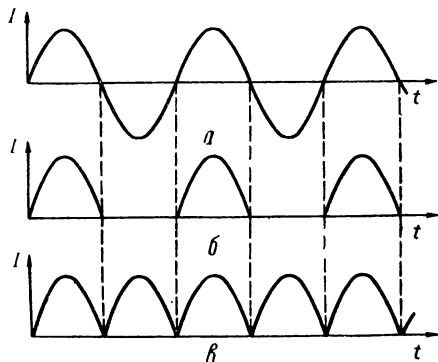


Рис. 93.

током, текущим по обмоткам. Магнитные силовые линии создаваемого им поля при вращении ротора пересекают проводники, вложенные в пазы статора, и индуцируют в них переменную э. д. с.

Величина э. д. с., создаваемая генератором, зависит от размеров и типа обмотки статора, величины магнитного поля ротора и скорости его вращения.

Выпрямление переменного тока. Генератор постоянного тока. Как было установлено, напряжение, снимаемое с клемм генератора, все время изменяется как по направлению, так и по величине. Поэтому и ток, протекающий во внешней цепи, будет не постоянным, а переменным.

Для получения во внешней цепи постоянного по направлению тока применяется особое устройство — *коллектор*.

Простейший коллектор представляет собой два изолированных друг от друга полукольца (рис. 92), к которым присоединяются

концы витка. Полукольца вращаются вместе с витком (они укрепляются на той же оси, что и виток).

При движении витка полукольца все время касаются неподвижных щеток. В то время, когда ток в витке изменяет направление, полукольца меняют щетки. Поэтому ток, возникающий во внешней цепи, будет иметь все время одно направление, но величина его меняется со временем. Получится так называемый пульсирующий ток. На рис. 93 показаны графики переменного (a) и выпрямленного пульсирующего тока (b , $в$).

Так как коллектор вращается, то и рабочую обмотку, соединенную с ним, делают всегда вращающейся. Ее располагают на внутреннем железном сердечнике, укрепленном на оси машины. Этот сердечник называется *якорем*.

Генератор постоянного тока имеет следующие основные части: станина (электромагнит), якорь и коллектор со щетками. На практике обмотку якоря делают из многих витков и соответственно коллектор — не из двух полуколец, а из большого числа пластин. Ток при этом возбуждается не пульсирующий, а почти постоянный.

§ 99. Трансформатор

Трансформатор — это прибор для преобразования переменного напряжения и силы тока. Он имеет сердечник (обычно замкнутой формы) из мягкого железа, на который намотаны две катушки — первичная и вторичная (рис. 94). Концы первичной обмотки подключены к сети питающего переменного тока, а концы вторичной обмотки — к потребителям электрической энергии.

Э. д. с. электромагнитной индукции, возникающая во вторичной обмотке, пропорциональна числу витков в ней; поэтому, изменяя число витков, можно изменять и напряжение на выходе трансформатора, т. е. на концах вторичной обмотки.

Трансформаторы играют огромную роль в современной электротехнике. В мощных линиях электропередачи применяется высокое напряжение (десятки и сотни тысяч вольт). Применение таких высоких напряжений позволяет уменьшить силу тока в линии, а значит, и сечение проводов. Это приводит к уменьшению стоимости сооружения линии электропередачи.

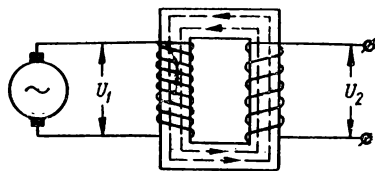


Рис. 94.

Рассмотрим подробнее передачу электроэнергии. При передаче электроэнергии на расстояние неизбежны ее потери в линии передачи. Ток, текущий по проводам, нагревает их. Энергия, идущая на нагревание, является потерянной. Чтобы эти потери были меньше, нужно уменьшить нагревание проводов.

По закону Джоуля—Ленца количество выделившегося тепла определяется выражением

$$Q = I^2 R t.$$

Для уменьшения Q можно уменьшать или сопротивление линии, или силу тока в линии, но первое экономически невыгодно, так как это уменьшение достигается увеличением сечения проводов; при этом сильно увеличивается вес последних. Для уменьшения Q можно уменьшить силу тока I . Сила тока I , передаваемая мощность N и напряжение U связаны соотношением

$$I = \frac{N}{U}.$$

Отсюда видно, что для уменьшения I при данном N нужно увеличить напряжение U . Таким образом, для уменьшения потерь энергии на нагревание при передаче ее на большие расстояния надо пользоваться высоким напряжением.

На практике при передаче энергии на большие расстояния пользуются напряжениями в 3300, 6600, 110 000, 160 000, 220 000, 800 000 в. Генераторы переменного тока обычно строят на 2200, 6600, 11 000, 13 200 в.

Построить генераторы на более высокие напряжения сложно, так как при этом необходимо обеспечить хорошую изоляцию обмоток. Поэтому напряжение, даваемое генератором, увеличивают при помощи повышающих трансформаторов. В местах потребления энергии высокое напряжение преобразуют при помощи понижающих трансформаторов в более низкое.

Прообразом современного трансформатора является устройство, которое П. Н. Яблочков применил для «дробления света». Свет электрической дуги, использованный Яблочковым для освещения, был достаточно сильным, чтобы осветить несколько комнат, и иногда его «дробили» с помощью системы зеркал. Яблочков пошел по другому пути: он использовал индукционную катушку — прибор, состоящий из двух проволочных катушек, расположенных одна в другой. При пропускании переменного тока по одной катушке в другой индуцировался «вторичный» ток. Включая в цепь динамомашины первичные катушки таких приборов, Яблочков подключал свои свечи ко вторичным обмоткам этих катушек.

Несколько лет спустя И. Ф. Усагин — физик-самоучка, а впоследствии ассистент Московского университета, применил трансформатор

для освещения на Всероссийской промышленно-художественной выставке в Москве в 1882 г.

Рассмотрим принцип действия трансформатора. Пусть к концам первичной обмотки приложено переменное напряжение U_1 . Тогда по обмотке пойдет переменный ток, который намагнитит железо сердечника, создав в нем переменный магнитный поток. Этот поток, возникающий в сердечнике трансформатора, пронизывает витки первичной и вторичной обмоток, возбуждая в каждом витке обмотки одну и ту же э. д. с. e . Обозначим число витков в первичной обмотке n_1 , а во вторичной — n_2 . Тогда

$$\begin{aligned} E_1 &= n_1 e; \\ E_2 &= n_2 e, \end{aligned}$$

где E_1 — э. д. с., возбуждаемая в первичной обмотке; E_2 — э. д. с., возбуждаемая во вторичной обмотке.

Напряжения на концах первичной и разомкнутой вторичной обмотки равны э. д. с. в этих обмотках:

$$\begin{aligned} U_1 &= E_1; \\ U_2 &= E_2. \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} U_1 &= n_1 e; & (1) \\ U_2 &= n_2 e. & (2) \end{aligned}$$

Разделив равенство (1) на (2), получим:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2} = k.$$

Величина k называется *коэффициентом трансформации трансформатора*. Если нужно повысить напряжение, вторичная обмотка выполняется с большим числом витков; если же нужно понизить напряжение, вторичную обмотку берут с меньшим числом витков, и в этом случае трансформатор работает как понижающий.

Пока вторичная обмотка разомкнута, трансформатор работает вхолостую. Энергия из первичной цепи во вторичную при этом не передается.

Нагрузим трансформатор. Для этого замкнем через реостат цепь вторичной обмотки. По цепи пойдет индукционный ток. Обозначим его I_2 . Этот ток, согласно закону Ленца, вызовет уменьшение магнитного потока в сердечнике, что приведет к уменьшению э. д. с. самоиндукции в первичной обмотке и к нарушению равновесия между напряжением U_1 , даваемым генератором на первичную обмотку, и э. д. с. самоиндукции E_1 . Вследствие этого ток в первичной обмотке увеличится на некоторую величину I_1 и станет равным $I + I_1$.

Увеличение тока приведет к увеличению магнитного потока в сердечнике. Равновесие между U_1 и E_1 опять восстановится. Таким образом, появление вторичного тока I_2 вызывает увеличение тока в первичной обмотке на величину I_1 , которая определит нагрузочный ток первичной цепи трансформатора.

Намагничивающее действие тока пропорционально числу витков n и силе тока I , т. е. пропорционально произведению nI .

Соотношение между нагрузочными токами I_1 и I_2 определится из равенства

$$I_1 n_1 = I_2 n_2; \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1},$$

т. е. нагрузочные токи в первичной и вторичной обмотках трансформатора обратно пропорциональны числам витков в них.

При нагрузке трансформатора происходит передача энергии из первичной цепи во вторичную. При этом мощности токов в первичной и вторичной цепи равны, т. е. выполняется равенство

$$I_1 U_1 \approx I_2 U_2.$$

Практически это равенство выполняется лишь приближенно, так как при работе трансформатора всегда имеются различные потери энергии.

Отношение

$$\frac{I_2 U_2}{I_1 U_1} = \eta$$

определяет коэффициент полезного действия трансформатора, который для современных мощных трансформаторов достигает значения 94—99%.

Задача 1. Трансформатор повышает напряжение $U_1 = 220$ в до $U_2 = 1500$ в. Во вторичной обмотке протекает ток $I_2 = 0,2$ а. Определить ток в первичной обмотке, если к. п. д. трансформатора $\eta = 96\%$.

Решение. Для к. п. д. имеем формулу

$$\eta = \frac{I_2 U_2}{I_1 U_1},$$

откуда

$$I_1 = \frac{I_2 U_2}{\eta U_1}; \quad I_1 = 1,4 \text{ а.}$$

Ответ. Ток в первичной обмотке равен 1,4 а.

Задача 2. Определить сопротивление вторичной обмотки трансформатора r_2 с коэффициентом трансформации $k = 10$, если при включении первичной обмотки в сеть напряжением $U_1 = 120$ в во

вторичной обмотке идет ток $I_2 = 5$ а, а ее напряжение $U_2 = 6$ в. Потерями энергии в первичной обмотке пренебречь.

Решение. Поскольку потерями в первичной обмотке пренебрегаем, постольку э. д. с. индукции в первичной обмотке равна по величине подведенному к ней напряжению ($E_1 = U_1$). Учитывая, что $k = \frac{E_1}{E_2}$, найдем э. д. с. во вторичной обмотке:

$$E_2 = \frac{E_1}{k} = \frac{U_1}{k};$$

но

$$E_2 = I_2 r_2 + U_2,$$

где I_2 — ток во вторичной обмотке, r_2 — ее сопротивление, U_2 — падение напряжения.

Отсюда находим

$$I_2 r_2 = E_2 - U_2 = \frac{U_1}{k} - U_2;$$

$$r_2 = \frac{U_1 - kU_2}{kI_2}; \quad r_2 = 1,2 \text{ (ом)}.$$

О т в е т. Сопротивление вторичной обмотки равно 1,2 ом.

Контрольные вопросы к главе «Переменный ток»

- 1) Какой ток называется переменным? Какова разница между переменным и пульсирующим током?
- 2) Каким образом осуществляется генерирование переменного тока?
- 3) Что называется мгновенным значением I_m переменного тока?
- 4) Какая величина называется периодом переменного тока T и как период связан с частотой колебания f ?
- 5) Как определяется эффективное значение тока и напряжения?
- 6) Какие величины влияют на величину сопротивления цепи при переменном токе?
- 7) Каков принцип работы генератора постоянного тока?
- 8) Как устроен трансформатор и чем определяется коэффициент трансформации?

Г л а в а XVII. ЭЛЕКТРОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ВАКУУМЕ

§ 100. Явление термоэлектронной эмиссии

Всякий металл характеризуется тем, что внутри его имеются свободные электроны, образующие своеобразный электронный газ и участвующие в тепловом движении. Так как электроны проводимости удерживаются внутри металла, то, очевидно, вблизи поверхности металла существуют силы, действующие на электроны и направленные внутрь металла. Чтобы электрон смог выйти из металла, он должен выполнить определенную работу A против этих сил. Это так называемая *работа выхода* электрона из металла. Она различна для разных металлов.

При комнатных температурах большинство электронов, находящихся внутри металла, обладают энергиями меньшими, чем работа выхода, и поэтому они не могут вылететь за пределы металла. Если же сообщить электронам дополнительную энергию, то у них появляется возможность покинуть металл. Сообщить энергию электронам можно различными способами: или освещая металл, или прилагая внешнее электрическое поле, или нагревая металл.

Явление вылета электрона из металла при повышении температуры металла называется *термоэлектронной эмиссией*.

§ 101. Двухэлектродная электронная лампа. Ее применение для выпрямления тока

Для наблюдения термоэлектронной эмиссии может служить пустотная лампа, содержащая два электрода: один в виде проволоки из тугоплавкого металла (вольфрам, молибден и др.), накаляемый током (катод), и другой — холодный электрод (анод), собирающий электроны, вылетевшие из катода. Такие лампы получили широкое применение в современной радиотехнике для выпрямления переменных токов (они называются *вакуумными диодами*).

Составим электрическую цепь, содержащую диод, источники напряжения и миллиамперметр (рис. 95). При холодном катоде K ток в цепи не возникает, так как в пространстве между катодом и анодом A отсутствуют электрические заряды.

Если же нагреть катод при помощи дополнительного источника тока B_{II} до высокой температуры, то миллиамперметр mA покажет некоторый ток. Ток в цепи появляется только тогда, когда положительный полюс анодной батареи B_a соединен с анодом, а отри-

цательный — с катодом. Сила термоэлектронного тока зависит от разности потенциалов между катодом и анодом.

Пусть вначале разность потенциалов между K и A равна нулю. В этом случае анодный ток будет равен нулю. Электроны, вылетающие из накаливаемого катода, образуют возле него как бы электронное облако. Оно удерживается возле нити, которая из-за потери электронов заряжается положительно. Часть электронов из облака попадает снова на положительно заряженную нить. Между двумя процессами — вылетанием электронов из нити и возвращением их — устанавливается подвижное равновесие. При этом среднее число электронов в облаке остается неизменным.

Если же теперь создать между катодом и анодом электрическое поле, то электроны из облака начнут двигаться к аноду и в анодной цепи появится электрический ток. С увеличением разности потенциалов между анодом и катодом увеличивается и число электронов, движущихся к аноду, и поэтому анодный ток будет возрастать.

При некоторой разности потенциалов все электроны, вылетающие из нити при данной ее температуре, будут достигать анода. Дальнейшее увеличение напряжения уже не приведет к увеличению тока, так как из нити (при данной температуре) может вылететь определенное число электронов. Зависимость анодного тока от напряжения показана на рис. 96. Максимальный ток (при данной температуре нити) называют *током насыщения* I_H .

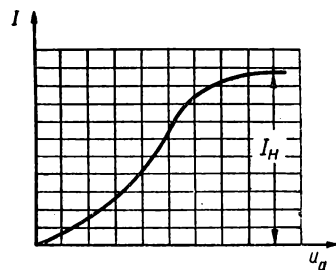


Рис. 96.

При перемене полярности приложенного напряжения все электроны возвращаются на катод и ток через лампу не проходит. Следовательно, электронная лампа обладает односторонней проводимостью и может быть использована для выпрямления переменного тока.

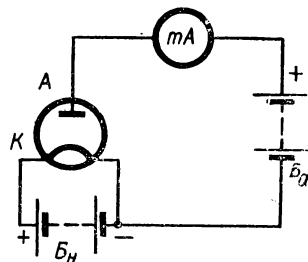


Рис. 95.

Так как раскаленный катод электронной лампы испускает только электроны, ток во внешней цепи будет существовать лишь тогда, когда ее катод соединен с отрицательным полюсом источника анодного напряжения.

Если включить диод в цепь переменного тока, то в цепи будет проходить ток только в те полупериоды, когда анод имеет положительный потенциал по отношению к катоду. Поэтому ток в цепи будет уже не переменным, а пульсирующим.

Для использования обоих полупериодов переменного тока применяются схемы двухполупериодного выпрямления, в которых имеются два диода, включенные в цепь, как показано на рис. 97. Когда верхний вывод A вторичной обмотки трансформатора имеет положительный потенциал, а нижний вывод B — отрицательный, работает верхняя лампа. В следующий полупериод работает нижняя лампа. Поэтому через проводник с сопротивлением R (т. е. во внешней цепи) проходит ток в одном и том же направлении в течение любого полупериода. График пульсирующего тока при двухполупериодном выпрямлении показан на рис. 93, в.

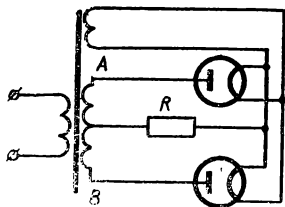


Рис. 97.

Двухэлектродную лампу, служащую для выпрямления переменного тока, называют *кенотроном* («кенос» — по-гречески «пустой»).

Выпрямленный пульсирующий ток при помощи специальных фильтров (таким фильтром является, например, конденсатор, включенный параллельно нагрузке) может быть сделан постоянным не только по направлению, но и по величине.

§ 102. Трехэлектродные электронные лампы

Электронным током в лампе можно управлять. Для этого внутрь лампы вводят один или несколько дополнительных металлических электродов. Часто их изготавливают в виде проволочных спиралей и помещают между катодом и анодом. Эти дополнительные электроды называют *сетками*.

Рассмотрим *трехэлектродную лампу*, или *триод*. Она имеет катод, анод и сетку. Электронный ток в триоде зависит не только от потенциала анода, но и от потенциала сетки относительно катода. Если потенциал сетки равен нулю, то количество электронов, достигающих анода, будет такое же, как и при отсутствии сетки. При положительном потенциале сетки ток в анодной цепи будет больше, чем при нулевом ее потенциале. При отрицательном потенциале сетки анодный ток меньше, так как часть термоэлектронов сеткой будет возвращена на катод. С увеличением отрицательного потенциала сетки анодный ток будет уменьшаться и при некотором потенциале

станет равным нулю. В этом случае говорят, что сетка полностью запирает лампу.

Следовательно, изменяя потенциал сетки, можно управлять анодным током, увеличивая или уменьшая его.

Контрольные вопросы к главе «Электронные явления в вакууме»

- 1) Какое явление называется термоэлектронной эмиссией?
- 2) От чего зависит величина анодного тока, проходящего через диод?
- 3) Что такое ток насыщения?
- 4) В чем заключается принцип действия двухэлектродной электронной лампы как выпрямителя?
- 5) Как влияет сетка в трехэлектродной лампе на величину анодного тока?

Глава XVIII. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

§ 103. Колебательный контур и свободные колебания

Основным элементом радиотехнических устройств является колебательный контур. Прежде чем рассмотреть процессы, происходящие в таком контуре, вспомним колебания пружинного маятника (см. § 29). Мы видели, что при механических колебаниях происходит периодическое превращение энергии системы из кинетической в потенциальную и обратно. Аналогичные процессы происходят также при электрических колебаниях.

Простейший электрический колебательный контур состоит из конденсатора C и индуктивности L , соединенных между собой.

Предположим, что мы, разомкнув контур, зарядили конденсатор C . Между пластинами конденсатора возникнет электрическое поле, обладающее некоторой энергией (рис. 98, а). Замкнем теперь конденсатор на индуктивность L . Конденсатор начнет разряжаться, и его электрическое поле будет уменьшаться. При этом в контуре возникнет электрический ток, а в катушке индуктивности появится магнитное поле.

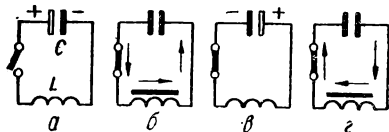


Рис. 98.

Через некоторое время, равное четверти периода колебания $\left(\frac{1}{4}T\right)$, конденсатор разрядится полностью и электрическое поле исчезнет совсем. Однако магнитное поле при этом достигнет максимума, а следовательно, энергия электрического поля превратится в энергию магнитного поля (рис. 98, б).

В последующие моменты времени магнитное поле будет исчезать, так как нет токов, его поддерживающих. Это исчезающее поле вызывает ток самондукции, который в соответствии с законом Ленца поддерживает ток разряда конденсатора и будет, следовательно, направлен так же. Поэтому конденсатор будет перезаряжаться и между его пластинами появится электрическое поле противоположного на-

правления. Через время, равное половине периода колебания $\left(\frac{1}{2}T\right)$,

магнитное поле исчезнет вовсе, а электрическое поле достигнет максимума, т. е. энергия магнитного поля вновь превратится в энергию электрического поля (рис. 98, в). В дальнейшем конденсатор снова будет разряжаться, и в контуре возникнет ток, направленный противоположно току в предыдущей стадии процесса. Через время $\frac{3}{4}T$

конденсатор вновь окажется разряженным, а энергия электрического поля превратится в энергию магнитного поля (рис. 98, г) и т. д. Через промежутки времени, равные полному периоду колебания T , электрическое состояние контура будет таким же, как и в начале колебаний (рис. 98, а).

Процесс периодического изменения напряженности магнитного поля и напряженности электрического поля называется *электромагнитными колебаниями*. При этом электрическое поле периодически превращается в магнитное, а магнитное опять в электрическое.

Если омическое сопротивление контура равно нулю, то указанный процесс будет продолжаться неограниченно долго и в контуре возникнут *незатухающие* колебания.

Механические колебания, возникающие под действием сил, разрывающихся в самой колебательной системе (сил упругости), называют собственными колебаниями. Аналогично этому электрические колебания, возникающие в контуре, которому был сообщен некоторый запас энергии, и поддерживаемые возникающим в контуре индукционным током, называются *собственными электрическими колебаниями*. Период собственных колебаний T в контуре зависит от индуктивности катушки L и от емкости конденсатора C :

$$T = 2\pi \sqrt{LC}.$$

Формула эта впервые была получена английским физиком В. Томсоном и поэтому названа его именем.

Если бы сопротивление контура равнялось нулю, то колебания, возникающие в контуре, были бы незатухающими. В действительности же сопротивление всегда отлично от нуля, поэтому энергия, вначале запасенная в контуре, непрерывно расходуется на выделение тепла. Вследствие этого интенсивность электрических колебаний постепенно уменьшается, т. е. со временем уменьшается и заряд, возникающий на обкладках конденсатора, и максимальное электрическое поле, возникающее между пластинами конденсатора, а также и магнитное поле, возникающее в катушке индуктивности. Следовательно, будет уменьшаться и сила тока в контуре, т. е. колебания будут *затухающими*.

§ 104. Вынужденные электрические колебания и их генерирование

Рассмотрим вначале колебания маятника. Колебания, которые происходят под действием внешней периодической силы, называются *вынужденными*. Вынужденные колебания происходят с частотой, определяемой частотой изменения внешней вынуждающей силы. Так как вынужденные колебания поддерживаются внешней силой, то амплитуда их может быть постоянной, т. е. можно получить незатухающие колебания.

Вынужденные колебания могут происходить и в электрическом колебательном контуре. Такие колебания возникнут в том случае, если к контуру подводить периодически изменяющуюся э. д. с. Частота вынужденных колебаний в контуре будет зависеть от частоты изменения внешней э. д. с.

Следовательно, в колебательном контуре могут существовать два типа колебаний: собственные колебания с постоянной частотой

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

и вынужденные, частота которых равна частоте изменения внешней э. д. с.

Если собственная частота колебательного контура резко отличается от частоты изменения внешней э. д. с., действующей в контуре, то ток, текущий в контуре, незначителен. При сближении частот собственных колебаний и частоты внешней э. д. с. наблюдается увеличение амплитудного значения тока, который достигает максимальной величины, когда обе частоты совпадают по величине.

Такое явление возрастания тока при совпадении частот колебаний называют *электрическим резонансом*. (Следует, однако, заметить, что резонанс наступает при равенстве частот только в том случае, если омическое сопротивление контура практически равно нулю. Если же колебательный контур обладает некоторым омическим сопротивлением, то резонанс наступает при частоте, несколько большей, чем частота собственных колебаний в контуре.)

На рис. 99 представлены примерные резонансные кривые для трех сопротивлений контура: $R_1 < R_2 < R_3$. Мы видим, что при малом сопротивлении контура затухание собственных колебаний незначи-

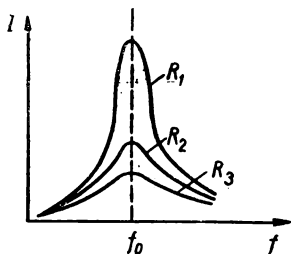


Рис. 99.

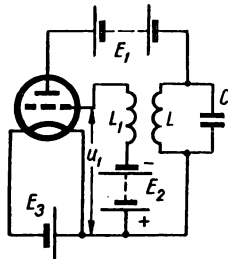


Рис. 100.

тельно, и в этом случае ток в контуре имеет большую величину, а кривая резонанса круче. При больших сопротивлениях резонанс будет менее острым.

Для получения незатухающих электрических колебаний может быть использована трехэлектродная электронная лампа — триод. Схема возбуждения таких колебаний показана на рис. 100. Энергия подводится к колебательному контуру с помощью триода от анодной батареи E_1 . Сеточное напряжение U_1 создается батареей E_2 , последовательно с которой включена катушка L_1 . Эта катушка индуктивно связана с катушкой индуктивности L колебательного контура.

При изменении силы тока в колебательном контуре в катушке L_1 возникает э. д. с. индукции, которая ведет к изменению сеточного напряжения U_1 . В результате изменения сеточного напряжения анодный ток, идущий через триод от батареи E_1 , будет изменяться с частотой, равной частоте колебаний в контуре. Если э. д. с. индукции, возникающая в катушке L_1 , совпадает по фазе с током в контуре, то колебания в контуре будут незатухающими.

В этом случае изменения анодного тока поддерживают колебания в контуре. Таким образом, в колебательном контуре возникают незатухающие колебания за счет энергии, подводимой от анодной батареи E_1 .

§ 105. Электромагнитные волны

Мы уже знаем, что электрическое поле возникает в пространстве, если в нем имеется покоящийся электрический заряд, а магнитное поле возникает вне движущегося электрического заряда. Электрическое поле, создаваемое покоящимся электрическим зарядом, характеризуется тем, что силовые линии этого поля имеют начало и конец. Такое поле называется электростатическим.

Английский ученый Максвелл разработал теорию, из которой следовало, что источником электрического поля является также и всякое

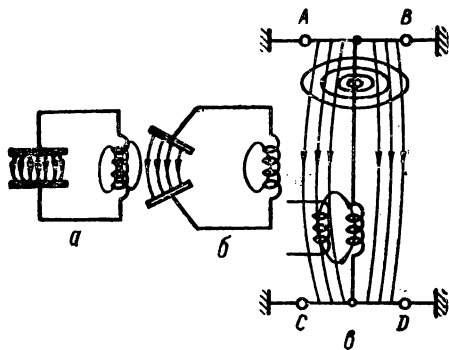


Рис. 101.

переменное магнитное поле. В свою очередь, переменное электрическое поле является источником переменного магнитного поля.

Электрическое поле, создаваемое переменным магнитным полем, имеет несколько иной характер, чем электростатическое, а именно: его силовые линии замкнуты. Такое поле называют *вихревым полем*.

Таким образом, оба поля — электрическое и магнитное — взаимосвязаны. Если в пространстве имеется созданное каким-либо способом переменное электрическое поле, то в этом же пространстве появится и переменное магнитное поле. Поле, которое представляет собой совокупность органически связанных между собой переменных электрического и магнитного полей, называется *электромагнитным полем*.

Если электромагнитное поле создается в некоторой ограниченной области пространства, то, как показывает опыт, оно распространяется на остальную часть пространства с конечной скоростью. Распространяется электромагнитное поле в вакууме со скоростью света: $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/сек.

Так как электромагнитное поле имеет периодический характер, т. е. периодически изменяющееся электрическое поле вызывает периодически изменяющееся магнитное поле, и наоборот, то процесс распространения этого поля в пространстве представляет собой электромагнитную волну. Расстояние λ , на которое перемещается волна за время одного периода, называется *длиной электромагнитной волны*: $\lambda = cT$.

Рассмотрим процесс образования электромагнитных волн. Пусть имеется колебательный контур, в котором каким-либо способом поддерживаются колебания. В результате в области контура создается переменное электромагнитное поле. Чтобы это поле распространялось в пространстве, или, как говорят, чтобы система заметно излучала, нужно создать такие условия, при которых область, в которой возбуждается переменное электрическое поле (т. е. пространство между пластинами конденсатора), была бы менее обособленной от окружающего пространства.

Этого достигают увеличением расстояния между обкладками конденсатора и заменой соленоида линейным проводником. Так осуществляется переход от закрытого колебательного контура (рис. 101, а) к открытому (рис. 101, в). В открытом контуре верхняя обкладка конденсатора заменена проводом AB , который располагается высоко над землей. Другая обкладка конденсатора заменяется нижним проводом CD , который располагается у самой земли или просто заменяется землей. В этом случае говорят, что провод заземлен. Вертикальный провод (так называемое «снижение») принимает главное участие в излучении электромагнитных волн. Вся рассмотренная система проводов называется *антенной*.

§ 106. Излучение и прием электромагнитных волн. Изобретение радио

Дж. Максвелл теоретически обосновал существование электромагнитных волн. Известный немецкий физик Г. Герц при помощи особого вибратора получил эти волны впервые на опыте. Для излучения электромагнитных волн он использовал колебательную систему, состоявшую из двух металлических стержней, разделенных искровым промежутком. Посредством двух вибраторов, расположенных на некотором расстоянии один от другого, Герц осуществил генерирование и прием электромагнитных волн.

Опыты с электромагнитными волнами привели знаменитого русского физика А. С. Попова к открытию радио. В 1895 г. А. С. Попов, используя способность металлических порошков слипаться под влиянием высокочастотных электрических колебаний (и тем самым повышать свою электропроводность), сконструировал первый чувствительный приемник электромагнитных волн.

Передатчиком в опытах Попова служила заземленная антенна A . В схеме передатчика (рис. 102) B — источник высокого переменного напряжения, питаемый батареей E . При замыкании ключа K в искровом промежутке образуется искра, представляющая собой колебательный процесс, вследствие чего антенна A начинает излучать электромагнитные волны. Эти волны, достигая антенны A_1 приемной станции, возбуждают электромагнитные колебания в цепи, содержащей заземленную антенну и когерер T (рис. 103). Сопротивление когерера резко уменьшается, вследствие чего замыкается цепь батареи E_1 , в которой находится электромагнитное реле, притягивающее молоточек F . При этом в точке O замыкается цепь более мощной бата-

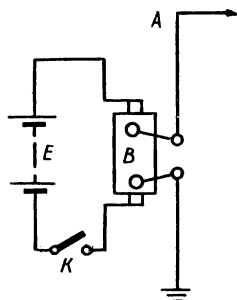


Рис. 102.

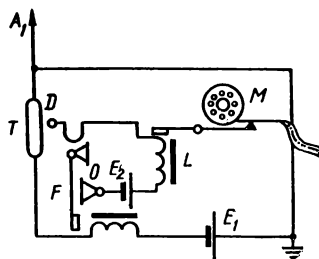


Рис. 103.

реи E_2 , действующей на пишущий аппарат LM . В то же самое время молоточек D ударяет по когереру T и размыкает цепь батареи E_1 (для приема следующего сигнала).

В 1899 г. А. С. Попов вместе с помощниками П. Н. Рыбкиным и Д. С. Троицким усовершенствовал свое изобретение и установил возможность принимать радиосигналы посредством телефона на слух.

§ 107. Передача и прием радиосигналов

Для передачи звуков по радио нужно воздействием звуковых колебаний модулировать излучаемые антенной электромагнитные волны. *Амплитудной модуляцией* называется процесс изменения высокочастотных колебаний, в результате которого периодически изменяется амплитуда этих колебаний в соответствии со звуковыми или какими-либо иными сигналами.

Модулирование производится по следующим соображениям: все звуковые колебания представляют собой колебания низкой частоты (при передаче речи и музыки — это частоты от 100 до нескольких тысяч герц). Для излучения радиоволн необходимы высокие частоты.

Чтобы изменить амплитуду высокочастотных колебаний в соответствии с передаваемым сигналом, поступают следующим образом.

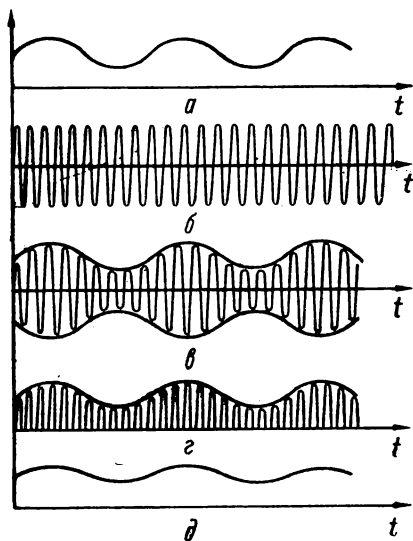


Рис. 104.

В цепи микрофона возбуждают колебания электрического тока, которые соответствуют звуковым колебаниям, действующим на микрофон (рис. 104, а). Эти колебания накладываются на основной ток радиопередатчика, а значит, и на основной ток в антенне радиоприемника (рис. 104, б). В результате амплитуда радиочастотных колебаний периодически изменяется (рис. 104, в).

Высокочастотные колебания, в которых происходят изменения амплитуды, соответствующие передаваемым сигналам, называются *модулированными*.

Чтобы обеспечить получение звука в радиоприемной установке, необходимо преобразовать модулированные высокочастотные колебания в колебания звуковой частоты, с помощью которых

была осуществлена модуляция в радиотелефонном передатчике.

Процесс преобразования модулированных колебаний в колебания звуковой частоты называется *детектированием*. Детектирование производится при помощи полупроводников или иных специальных устройств, обладающих односторонней проводимостью.

В цепи, содержащей детектор, происходит выпрямление модулированных колебаний (рис. 104, г). Для разделения высокочастотных колебаний и тока звуковой частоты в цепи детектора создается разветвление: конденсатор и телефон. Через конденсатор проходят высокочастотные токи, а через обмотки телефона — токи звуковой частоты. Таким образом, в телефоне будут воспроизводиться колебания,

частота которых соответствует частоте передаваемых звуковых колебаний (рис. 104, д).

Простейшими детекторами являются *кристаллические детекторы*. На рис. 105 представлена схема простейшего детекторного приемника. Роль детектора может играть и двухэлектродная электронная лампа, которая также обладает односторонней проводимостью. В этом случае в рассмотренной выше схеме детекторного приемника вместо кристаллического детектора D включается диод, нить которого накаливается от специальной батареи.

Э. д. с., индуцированная в антенне приемного контура, может быть очень малой (например, при приеме дальней станции). Для обеспече-

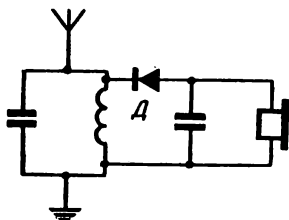


Рис. 105.

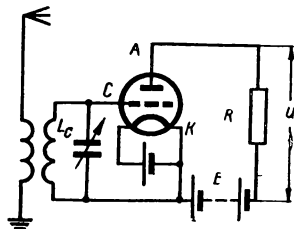


Рис. 106.

ния достаточной громкости приема приходится усиливать токи, индуцированные в антенне до их детектирования. А если приемник мощный и в нем есть репродуктор, то иногда нужно усиливать и токи звуковой частоты. Поэтому колебания сначала усиливаются на высокой частоте, а затем на низкой (звуковой).

В зависимости от частоты усиливаемых колебаний усилители подразделяются на *усилители высокой частоты* (УВЧ) и *усилители низкой частоты* (УНЧ).

Усиление электромагнитных колебаний может быть произведено при помощи трехэлектродной электронной лампы. Процесс усиления и низкочастотных, и высокочастотных колебаний одинаков.

В схеме усилителя с одной лампой (рис. 106) колебательный контур через катушку L_C индуктивно связан с сеткой C лампы. При возникновении электромагнитных колебаний в приемном контуре напряжение между катодом K и сеткой C будет изменяться. Эти изменения «сеточного» напряжения вызовут значительные изменения анодного тока (так как сетка сравнительно близко расположена к катоду, между катодом и сеткой создается сильное электрическое поле). Поэтому слабые колебания в колебательном контуре вызывают уже

сильные колебания в анодной цепи лампы. Источником энергии в анодной цепи служит батарея E .

В анодную цепь лампы включено сопротивление R . При изменении анодного тока на концах участка с сопротивлением R будет возникать переменное напряжение U , изменяющееся по тому же закону, что и подводимое к сетке напряжение.

§ 108. Телевидение и радиолокация

В прошлом веке, когда были созданы первые фотоэлементы, т. е. приборы, превращающие световые сигналы в электрические, появились проекты передачи изображений электрическим путем.

Наиболее реальным оказались проекты поочередной передачи электрических сигналов, соответствующих яркости каждого отдельного элемента изображения. Наше зрение имеет инерцию: каждое световое раздражение, каким бы кратковременным оно ни было, сохраняется на сетчатке глаза в течение $0,1 \text{ сек.}$ Поэтому, если перед глазами на одну десятую секунды в последовательном порядке возникает множество светящихся точек, то у зрителя создается впечатление, что все эти точки он видит одновременно.

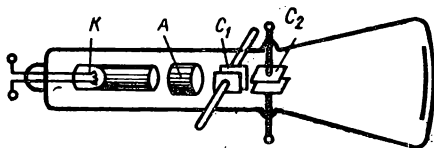


Рис. 107.

Такая поочередная передача сигналов от отдельных точек изображения лежит в основе современного телевидения. На передающей станции используют трубку с мозаичным фотокатодом. На эту фотомозаику при помощи объектива проектируют оптическое изображение. Различные элементы мозаики освещаются с разной интенсивностью. Фотоэлементы приобретают относительно сигнальной пластинки заряд, величина которого зависит от освещенности. На светочувствительную мозаику направляют электронный луч, который чертит параллельные линии-строчки, обходя всю ее поверхность. В результате в проводе, соединенном с сигнальной пластинкой, возникают электрические импульсы — видеосигналы. Их сила пропорциональна освещенности соответствующих участков мозаики. Сигналы усиливаются и подаются к радиопередатчику.

Сигналы, полученные приемной антенной, усиливаются и затем поступают к приемной электроннолучевой трубке. Она состоит из стеклянного баллона, из которого выкачан воздух до давления порядка $10^{-6} \text{ мм рт. ст.}$, ряда электродов и флюоресцирующего экрана (см. рис. 107).

Источником электронов служит катод K , накаливаемый током. Между катодом и анодом A создается напряжение в несколько сот или тысяч вольт. Электроны, вылетающие из катода, ускоряются электрическим полем и в виде узкого пучка выходят из отверстия в аноде. Этот пучок электронов при отсутствии электрического поля между отклоняющими электродами, попадая на флюоресцирующий экран, вызывает в нем свечение в виде маленького круглого пятнышка.

Если между пластинами небольших конденсаторов C_1 и C_2 создать электрическое поле, то электронный пучок будет отклоняться в направлении, противоположном направлению вектора напряженности поля \vec{E} . Если к вертикально отклоняющим пластинам конденсатора C_2 приложить переменное напряжение, то светлое пятно на экране будет совершать колебания по вертикали. Амплитуда этих колебаний прямо пропорциональна амплитуде приложенного напряжения.

Для того чтобы выявить форму этих электрических колебаний, нужно к горизонтально отклоняющим пластинам приложить такое переменное напряжение, которое равномерно увеличивается от нуля до некоторой величины, а затем очень быстро спадает до нуля, причем этот процесс изменения напряжения повторяется. Такое напряжение называется *развертывающим*.

Развертывающее напряжение заставляет электронный луч (а следовательно, и светлое пятно на экране) равномерно перемещаться на экране в горизонтальном направлении и затем практически мгновенно возвращаться к начальному положению. Повторение этого процесса дает развертку колебаний во времени, которая выявляет форму исследуемых электрических колебаний. Например, если приложить изменяющееся со звуковой частотой напряжение на вертикально отклоняющие пластины электроннолучевой трубки, а на горизонтальные — развертывающее напряжение, то, используя картину развертки на экране, можно исследовать различные звуковые колебания.

Радиолокация — это обнаружение различных предметов и измерение расстояний до них при помощи радиоволн.

Принцип радиолокации заключается в следующем. Специальный генератор импульсов радиолокатора создает очень короткие импульсы волн сверхвысокой частоты. Эти импульсы усиливаются и передающей антенной излучаются в окружающее пространство. При этом антенна поворачивается вокруг своей оси и «просматривает» небо. Импульсы, посланные передающей антенной, отражаются от объекта, расстояние до которого хотят определить, и воспринимаются приемной антенной.

Обычно для приема и для передачи используется одна и та же антенна, снабженная переключателем с приема на передачу, и на-

оборот. Радарные¹ антенны имеют вид металлических сеток, причем их форма позволяет излучать в пространство очень узкие пучки ультракоротких волн (в настоящее время применяют преимущественно сантиметровые волны).

Радиолуч излучается не непрерывно, а короткими импульсами, длительность которых равна миллионной доле секунды. Промежутки времени между отдельными сигналами примерно в 100 раз больше самого сигнала. Измеряя время между моментами излучения и приема сигнала и зная скорость распространения электромагнитных волн в воздухе (299 820 км/сек), можно определить расстояние до обнаруживаемого предмета (например, самолета).

Радиолокация находит применение и при исследовании космических объектов. В 1946 г. была осуществлена радиофизиками США и Венгрии радиолокация Луны. Позже были проведены опыты по радиолокации Венеры, Солнца, Меркурия, Юпитера.

Радиолокация позволяет не только определить расстояние до космического объекта, но также и судить по величине отраженного сигнала о характере поверхности объекта и веществе, из которого она состоит.

В связи с радиолокацией Венеры была поставлена и успешно решена задача по определению так называемой астрономической единицы. Для того чтобы рассчитать орбиту космического аппарата, посылаемого в околосолнечное пространство, необходимо очень точно знать траекторию Земли, с поверхности которой производится запуск. А так как эта траектория близка к круговой, то нужно точно знать радиус окружности, по которой Земля движется вокруг Солнца. Эта величина и называется астрономической единицей. Все остальные «габариты» Солнечной системы, а также расстояния до других звезд астрономы обычно отсчитывают исходя из астрономической единицы.

Радиолокация Венеры производилась независимо учеными Советского Союза, США, Англии в 1958, 1959 и 1961 гг. Ученым удалось установить, что среднее расстояние от Земли до Солнца (точнее от центра масс системы Земля—Луна) равно 149 599 300 км с наибольшей погрешностью в 2 тыс. км.

Что же представляют собой радиолокаторы, которые смогли принять слабый сигнал, отраженный от поверхности планеты Венеры? При увеличении расстояния, которое проходит сигнал (прямой и отраженный), очевидно, должна быть увеличена и мощность передатчика. Мощность передатчика, использованного советскими радиофизиками из Института радиотехники и электроники АН СССР в 1961 г., составила 250 млн. вт на единицу телесного угла. Это

¹ Слово «радар» составлено из первых букв английского названия «Radio Detecting and Ranging».

примерно в 1000 раз больше, чем у наиболее мощных радиолокаторов, использованных во время второй мировой войны. Для усиления отраженного сигнала производится также увеличение площади приемной антенны. Площадь обычной локационной антенны составляет 10—15 м². Антенна же большого радиотелескопа, на котором работали английские радиофизики в 1961 г. при радиолокации Венеры, имела диаметр 75 м.

Одновременно с радиолокацией Венеры 19 и 24 ноября 1962 г. впервые в истории человечества была успешно осуществлена радиопередача через планету Венеру. С Земли телеграфным кодом были переданы слова «Мир», «Ленин», «СССР». Радиосигнал, отразившись от поверхности Венеры, возвратился на Землю и был здесь принят.

Особенно возросло значение радиолокации с началом и развитием космической навигации, инициатива которой положена в СССР беспримерным полетом первого в мире космонавта Ю. А. Гагарина. Радиолокатор с электронным вычислительным устройством позволяет осуществлять автоматические полеты по заданной траектории. Методы радиолокации используются и в метеорологии.

Контрольные вопросы к главе «Электромагнитные колебания и волны»

- 1) Каким образом возникают свободные колебания в колебательном контуре?
- 2) От чего зависит период свободных колебаний в контуре?
- 3) Какие колебания называются вынужденными?
- 4) Какое явление называется электрическим резонансом?
- 5) Что представляет собой электромагнитная волна?
- 6) Как осуществляются генерирование и прием электромагнитных волн?
- 7) Объясните принцип радиотелефонной передачи.
- 8) Каков принцип действия детекторного и лампового радиоприемников?
- 9) Каким образом с помощью трехэлектродной лампы осуществляется усиление электромагнитных колебаний?
- 10) Как устроена электроннолучевая трубка?
- 11) Что такое радиолокация?

Глава XIX. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

§ 109. Введение

В разделе физики, называемом оптикой, изучаются световые явления и законы, установленные для них, взаимодействие света и вещества, вопросы природы света.

Свет представляет собой электромагнитные волны определенного диапазона (от 10 до $1,5 \cdot 10^4$ нм; $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$). Из всего состава оптического излучения глаз воспринимает только свет длиной волны от 380 до 770 нм. Излучение с длинами волн короче 380 нм называется *ультрафиолетовым*, а излучение с длинами волн, превышающими 770 нм, — *инфракрасным*. Ультрафиолетовое и инфракрасное излучения невидимы.

В вакууме свет распространяется со скоростью $c \approx 300\,000 \text{ км/сек}$, а в различных средах — с меньшей скоростью. Свет определенной длины волны называется *монохроматическим*. Проходя через вещество, свет в той или иной мере поглощается, при этом световая энергия превращается в другие виды энергии, в частности во внутреннюю энергию тела.

Существующие *источники света* подразделяются на естественные и искусственные. Главный естественный источник света для нас — Солнце. Искусственными источниками света являются раскаленные тела и так называемые холодные источники света, которые представляют собой газы, светящиеся при пропускании через них электрического тока, а также люминесцирующие твердые или жидкие тела.

Источники света обычно являются протяженными телами, но часто на практике их можно принимать за точечные. *Точечным источником света* называют такой источник света, линейные размеры которого очень малы по сравнению с расстоянием, на котором оценивается его действие.

Свет в однородной среде распространяется прямолинейно. Линия, вдоль которой распространяется световая энергия, называется *световым лучом*, или *лучом*. Доказательством прямолинейности распространения света является образование теней от предметов, поставленных на пути его распространения от точечного источника, или теней и полутеней — в случае протяженных источников. Прямолинейностью

распространения света объясняется также возможность получения изображений предметов с помощью малого отверстия. Однако закон прямолинейного распространения света, как будет показано дальше, нарушается в случае прохождения последнего сквозь малые отверстия.

Прямолинейность распространения света используется в *геометрической оптике*, т. е. в разделе оптики, рассматривающем вопросы распространения света в различных оптических системах (линзах, призмах и т. д.).

§ 110. Скорость света

Существует несколько методов измерения скорости света. В настоящее время принимают как наиболее точное значение скорости света, найденное Майкельсоном: $c = 299\,792,5$ км/сек.

Метод Майкельсона представляет собой усовершенствованный метод вращающегося зеркала (рис. 108), которым пользовались Физо и Фуко. Свет от источника S падает на вращающееся плоское зеркало M_1 , отразившись от него, падает на вогнутое зеркало M_2 , отражается от него и снова попадает на зеркало M_1 ; на экране получается в точке O изображение источника света S . Если зеркало M_1 не вращается, изображение источника света неподвижно. Если зеркало вращается медленно, изображение будет мигающим. Если же скорость вращения зеркала M_1 велика, то за время, которое требуется, чтобы свет прошел расстояние от M_1 до M_2 и обратно, т. е. расстояние $2a$, зеркало M_1 успеет повернуться на некоторый угол α , и свет, отражаясь от зеркала M_1 , дает изображение источника в другой точке, т. е. изображение источника смещается. Смещение изображения источника света может быть измерено. По этому смещению можно найти угол поворота зеркала M_1 , а зная угол поворота зеркала, можно определить время прохождения светом расстояния $2a$. Отсюда определяется

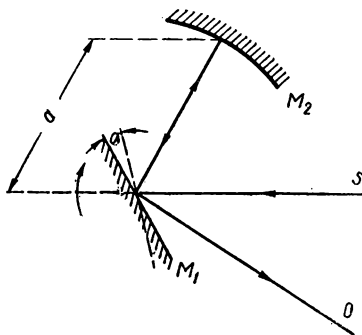


Рис. 108.

скорость света: $c = \frac{2a}{t}$. В опыте Майкельсона расстояние $2a = 70\,846,42$ м.

Задача. На рис. 109 изображена схема установки опыта Майкельсона по определению скорости света с помощью восьмигранного вращающегося зеркала. Расстояние между восьмигранной зеркальной призмой A и вогнутым зеркалом B равно $a = 35,426$ км. Наблюдатель видит в зрительную трубу T изображение щели M , когда призма A неподвижна. Если привести призму во вращение, изображение щели уходит из поля зрения наблюдателя, а при увеличении угловой скорости вращения призмы до значения, соответствующего частоте $\nu = 529$ сек⁻¹, изображение щели появляется вновь. Определить величину скорости света по этим данным. Будет ли наблюдаться

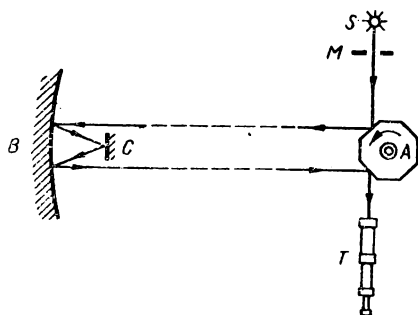


Рис. 109.

изображение щели при других значениях угловой скорости вращения, и если да, то при каких?

Решение. Наблюдатель будет видеть изображение щели в трубе, если за время поворота призмы на угол $\varphi = \frac{1}{8} 2\pi$ свет проходит удвоенное расстояние $2a$ между призмой и вогнутым зеркалом. Время поворота зеркальной призмы

$$t = \frac{\varphi}{\omega} = \frac{\frac{1}{8} 2\pi}{2\pi\nu} = \frac{1}{8\nu}.$$

Ответ.

$$c = \frac{2a}{t} = 16 a\nu; c = 299\,900 \text{ км/сек.}$$

Очевидно, изображение щели будет наблюдаться, если за время, в течение которого свет проходит расстояние $2a$, призма успеет повернуться на угол φ , соответствующий $1/8$, $2/8$, $3/8$ и т. д. от 2π (при этих углах данная грань заменяется другой). Итак, для наблюдения изображения источника света угловая скорость вращения призмы должна быть кратной $2\pi\nu$, т. е. $\omega = k \cdot 2\pi\nu$, где $k = 1, 2, 3, \dots$

§ 111. Светотехнические величины и единицы их измерения

Световые волны различаются не только длиной волны, но и интенсивностью. *Интенсивность* характеризуется той энергией, которую несут с собой световые волны. Для практических целей важно учи-

тывать не всю энергию, излучаемую источником света, а лишь ту часть ее, которая вызывает зрительное ощущение.

Энергию света, оцениваемую по зрительному восприятию, называют *световой энергией*.

Единицы измерения светотехнических величин, в которых оценивается только видимое излучение, называются *визуальными*. Основные величины, характеризующие световую энергию, следующие: световой поток, светимость, яркость, сила света и освещенность.

Световой поток Φ через некоторую поверхность S — это величина, численно равная световой энергии, переносимой световыми волнами в единицу времени. Полным световым потоком Φ_0 источника света называют величину, численно равную световой энергии, излучаемой источником света в единицу времени по всем направлениям, т. е. это его мощность.

Сила света I источника — это величина, численно равная световому потоку, распространяющемуся от данного источника света в единичном телесном угле.

Телесный угол ω измеряется отношением площади поверхности сферы, вырезанной конусом с вершиной в центре этой сферы, к квадрату радиуса сферы, т. е. $\omega = \frac{S}{R^2}$. Положив в формуле $S = 1 \text{ м}^2$ и $R = 1 \text{ м}$, получим единицу телесного угла 1 стерадиан (*стер*), т. е.

$$1 \text{ стер} = \frac{1 \text{ м}^2}{1 \text{ м}^2}.$$

1 стерадиан — телесный угол, вершина которого расположена в центре сферы и который вырезает на поверхности сферы площадь, численно равную квадрату радиуса. Единица телесного угла — безразмерная величина. Согласно определению стерадиана, полная сфера рассматривается из центра под телесным углом величиной $\omega_0 = 4\pi \text{ стер}$.

Если от источника света исходит световой поток Φ в телесном угле ω , то сила света источника

$$I = \frac{\Phi}{\omega}, \text{ откуда } \Phi = I\omega.$$

Величина полного светового потока Φ_0 , излучаемого источником силы света I , равна $\Phi_0 = I\omega_0 = 4\pi I$.

Светимость R источника света — это физическая величина, численно равная световому потоку, излучаемому единицей площади поверхности источника по всем направлениям, т. е. $R = \frac{\Phi}{S}$, где S — площадь излучающей поверхности источника.

В случае протяженных источников света глаз различает интенсивность излучения отдельных участков площади поверхности источника в определенном направлении. Эта интенсивность излучения характеризуется яркостью источника света.

Яркость B источника света — это физическая величина, численно равная силе света, даваемой единицей площади поверхности источника в перпендикулярном ей направлении, т. е. $B = \frac{I}{S}$. Если же наблюдение ведется не в перпендикулярном направлении от светящейся поверхности, а под некоторым углом к перпендикуляру к ней, то формула яркости примет вид: $B = \frac{I}{S \cos \varphi}$. Так как сила света $I = \frac{\Phi}{\omega}$, то яркость источника

$$B = \frac{\Phi}{S \omega \cos \varphi},$$

т. е. яркость источника света — физическая величина, численно равная световому потоку с единицы площади видимой поверхности источника света в единице телесного угла.

Таким образом, яркость светящейся поверхности зависит от угла, под которым последняя видна. Яркость, конечно, зависит также от свойств светящейся поверхности источника света.

Световой поток может исходить от светящегося тела не только вследствие того, что оно самостоятельно испускает свет, но и вследствие того, что рассеивает или отражает падающий на него свет от постороннего источника света. Поэтому вводится также величина, определяющая световой поток, падающий на освещаемую поверхность, — освещенность. Освещенностью E поверхности называется физическая величина, численно равная световому потоку, приходящему на единицу площади поверхности освещаемого тела. Если световой поток Φ падает на поверхность тела площадью S , то освещенность

$$E = \frac{\Phi}{S}.$$

Если точечный источник света находится в центре сферы, то на внутренней поверхности этой сферы площадью $S = 4\pi r^2$ создается освещенность, равная

$$E = \frac{\Phi_0}{S} = \frac{4\pi I}{4\pi r^2} = \frac{I}{r^2},$$

где $4\pi I$ — полный световой поток, создаваемый данным источником света, т. е. световой поток в телесном угле 4π *стер.*

Таким образом, если свет падает перпендикулярно поверхности, то ее освещенность пропорциональна силе света источника и обратно пропорциональна квадрату расстояния его от освещаемой поверхности. Если же свет падает на поверхность под углом α , то освещенность вычисляется по формуле

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

т. е. освещенность поверхности пропорциональна косинусу угла падения света.

Основной светотехнической единицей в системе СИ является единица силы света свеча. 1 свеча (св) — единица силы света, значение которой принимается таким, чтобы яркость полного излучателя (абсолютно черного тела) при температуре затвердевания платины (2042,15° К) была равна 60 св с поверхности площадью 1 см².

При этом нужно помнить, что понятие силы света вводится только для точечного источника света. При градуировании вторичных световых эталонов, которыми являются специальные лампы накаливания с точно определенными параметрами, их силу света сравнивают не с силой света, излучаемой с 1 см² площади поверхности платины при затвердевании, а с силой света, излучаемой с предельно малой поверхности. Так, Государственным световым эталоном является полный излучатель с площадью выходного отверстия 0,5305 мм².

Остальные светотехнические единицы устанавливаются по вышеприведенным формулам для светотехнических величин. Эти единицы в системе СИ следующие.

Единица светового потока 1 люмен (лм) — это световой поток, создаваемый точечным источником света силой света 1 св в телесном угле 1 стер.

Единица светимости 1 люмен на квадратный метр (лм/м²) — светимость такой поверхности площадью в 1 м², которая излучает световой поток в 1 лм.

Единица яркости 1 нит (нт) — яркость равномерно светящейся

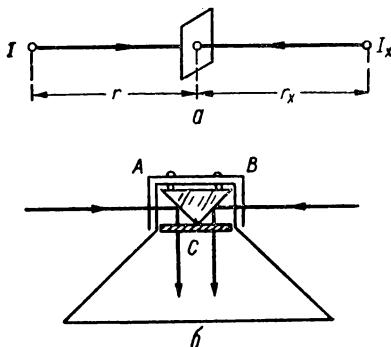


Рис. 110.

плоской поверхности, каждый квадратный метр которой дает в направлении, перпендикулярном поверхности, силу света 1 св.

Единица освещенности 1 люкс (лк) — это освещенность, создаваемая световым потоком 1 лм, равномерно распределенным на площади 1 м².

Пользуясь формулой освещенности, можно по силе света эталонного источника найти силу света исследуемого источника. Для этого эталонный и исследуемый источники, силы света которых соответственно I и I_x , устанавливают с разных сторон экрана (рис. 110, а) так, чтобы свет от них падал на экран под одним и тем же углом (например, перпендикулярно), и, передвигая один из источников света (или экран), добиваются одинаковой освещенности экрана с обеих сторон, т. е. $E = E_x$, или $\frac{I}{r^2} = \frac{I_x}{r_x^2}$,

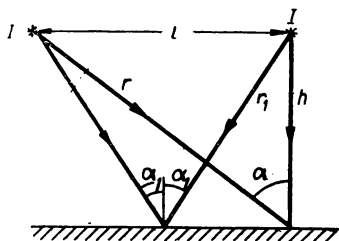


Рис. 111.

откуда $I_x = I \frac{r_x^2}{r^2}$, где r и r_x — расстояния от источников света до освещаемой поверхности.

Прибор, служащий для сравнения освещенностей, называется *фотометром*. Схема простейшего фотометра дана на рис. 110, б, где BC и AC — грани трехгранной призмы, которая освещается ис-

следуемым источником света I_x и эталонным I . Перемещением фотометра добиваются одинаковой освещенности обеих граней призмы.

Задача 1. Во дворе на высоте $h = 6$ м подвешены две лампы по $I = 500$ св каждая. Расстояние между лампами $l = 8$ м (рис. 111). Вычислить освещенность на земле под каждой из ламп и посредине между ними.

Решение. Освещенность под каждой из ламп будет одинаковой, так как лампы имеют одинаковую силу света $E = E_1 + E_2$, где E_1 — освещенность, создаваемая первой лампой: $E_1 = \frac{I}{h^2}$; E_2 — освещенность, создаваемая второй лампой (под первой лампой):

$$E_2 = \frac{I}{r^2} \cos \alpha, \text{ где } \cos \alpha = \frac{h}{r} = \frac{h}{\sqrt{l^2 + h^2}}.$$

Следовательно,

$$E = \frac{I}{h^2} + \frac{I}{l^2 + h^2} \cdot \frac{h}{\sqrt{l^2 + h^2}}; \quad E = 17 \text{ лк.}$$

Освещенность на земле посредине между лампами равна удвоенной освещенности, создаваемой каждой лампой:

$$E = 2E_1 = 2 \frac{l}{r_1^2} \cos \alpha_1, \text{ где } r_1 = \sqrt{h^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2};$$

$$\cos \alpha_1 = \frac{h}{\sqrt{h^2 + \frac{l^2}{4}}}.$$

$$E = 2 \frac{l}{h^2 + \frac{l^2}{4}} \cdot \frac{h}{\sqrt{h^2 + \frac{l^2}{4}}}; \quad E = 16 \text{ лк.}$$

Ответ. Под каждой лампой освещенность равна 17 лк, а посредине — 16 лк.

Задача 2. На стеклянном баллоне электрической лампочки написано $\Phi_0 = 1300 \text{ лм}$. Определить освещенность середины и края круглого стола диаметром $d = 1,5 \text{ м}$, создаваемую этой лампой, висящей на высоте $h = 2 \text{ м}$ над центром стола.

Решение. Освещенность середины стола $E = \frac{l}{h^2}$, где $l = \frac{\Phi_0}{4\pi}$. Следовательно, $E = \frac{\Phi_0}{4\pi h^2}$; $E = 26 \text{ лк}$. Освещенность края стола

$$E_1 = \frac{l}{r^2} \cos \alpha, \text{ где } r = \sqrt{h^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2}, \cos \alpha = \frac{h}{\sqrt{h^2 + \frac{d^2}{4}}};$$

$$E_1 = \frac{\Phi_0}{4\pi \left(h^2 + \frac{d^2}{4}\right)} \cdot \frac{h}{\sqrt{h^2 + \frac{d^2}{4}}}; \quad E = 21 \text{ лк.}$$

Ответ. Освещенность середины стола равна 26 лк, а края — 21 лк.

§ 112. Законы отражения света

В однородной среде свет распространяется прямолинейно. Если луч света переходит из одной среды в другую, то на границе раздела двух сред происходит отражение и преломление света. Свет может падать перпендикулярно отражающей поверхности и под углом к ней.

Углом падения называется угол, образованный падающим лучом с перпендикуляром (нормалью), восставленным к поверхности в точке падения луча. **Угол отражения** — это угол, образованный отраженным лучом с таким же перпендикуляром.

Отражение света происходит по следующим законам: лучи падающий и отраженный лежат в одной плоскости с перпендикуляром, восставленным из точки падения к отражающей поверхности, и угол отражения равен углу падения.

Ясно, что если луч падает перпендикулярно зеркалу, то отраженный луч пойдет по направлению падающего луча. Вообще, если луч света направить по направлению отраженного луча, то отраженный луч пойдет по направлению падающего луча, т. е. падающий луч и отраженный луч поменяются местами. Это свойство лучей называется *обратимостью световых лучей*.

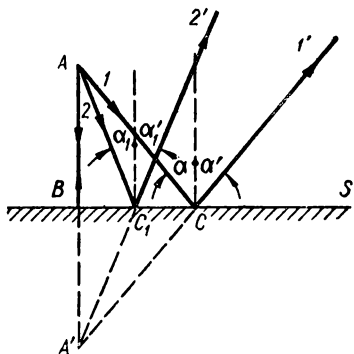


Рис. 112.

Построим изображение светящейся точки A в плоском зеркале (рис. 112). Рассмотрим два луча 1 и 2 и проведем отраженные лучи $1'$ и $2'$. Покажем, что продолженные отраженные лучи пересекаются в точке A' , отстоящей от зеркала на расстояние $A'B = AB$.

Продолжим луч $1'$ до пересечения с перпендикуляром, опущенным из точки A на зеркало, и докажем, что $\triangle ABC$ и $\triangle A'BC$ равны.

У этих треугольников сторона BC — общая, угол B — прямой. Легко видеть, что $\angle ABC = \angle CBA'$; следовательно, $A'B = AB$. Аналогично можно доказать, что и продолжение другого луча $2'$ проходит через точку A' . Эта точка является изображением (мнимым) точки A в плоском зеркале S .

Отметим, что изображение точки называется *действительным*, если оно получено пересечением световых лучей, идущих от этой точки, и *мнимым*, если оно получено пересечением продолженных лучей. Из построения изображения следует, что в плоском зеркале изображение находится за зеркалом и лежит оно на перпендикуляре, опущенном из точки на зеркало, на том же расстоянии, что и светящаяся точка. Зная, как строится изображение точки в плоском зеркале, можно построить изображение и протяженного предмета. Изображением предмета называется совокупность изображений всех точек предмета.

Изображение предмета в плоском зеркале всегда является мнимым, прямым и равным предмету. Изображение предмета всегда симметрично предмету относительно плоскости зеркала, т. е. «правая» сторона предмета видна, как «левая», и наоборот. Подобным же образом строится изображение каждой точки предмета, а значит, и всего предмета.

Рассеянное отражение. Если отражающая поверхность не является зеркальной, то продолженные отраженные лучи не будут пересекаться в одной точке и зеркального изображения точки A уже не получится (рис. 113). Глаз, находящийся под действием такого пучка света, будет только ощущать свет, но светящихся предметов он не увидит. Такое отражение света называют *рассеянным отражением*; оно происходит от шероховатой поверхности.

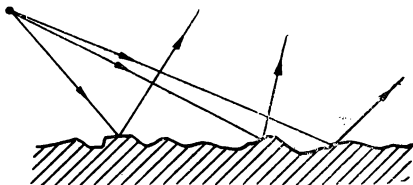


Рис. 113.

Задача. Экран помещен на расстоянии $r = 50$ см от точечного источника, сила света которого $I = 40$ св. Определить освещенность экрана в ближайшей от лампы точке экрана, если за источником света на расстоянии $l = 25$ см находится плоское зеркало, расположенное параллельно плоскости экрана. Считать, что свет, падающий на зеркало, полностью отражается.

Решение. Наличие зеркала за источником света равносильно существованию второго источника, расположенного на расстоянии $r_1 = r + 2l$ от экрана, с той же силой света I , так как при отражении от плоского зеркала телесный угол, в котором распространяется световая энергия, не изменяется и потери световой энергии, по условию задачи, отсутствуют. Следовательно, освещенность экрана в искомой точке будет

$$E = E_1 + E_2 = \frac{I}{r^2} + \frac{I}{(r + 2l)^2}; \quad E = 200 \text{ лк.}$$

Ответ. Освещенность в ближайшей точке экрана равна 200 лк.

§ 113. Сферические зеркала

Сферическое зеркало представляет собой часть хорошо отполированной шаровой поверхности (рис. 114). Центр шаровой поверхности C называется *оптическим центром зеркала*, вершина шарового сег-

мента O — полюсом зеркала. Прямая, проходящая через оптический центр зеркала C и его полюс O , называется *оптической осью зеркала*.

Для сферических зеркал существует формула, связывающая расстояние d от предмета до зеркала, расстояние f от его изображения до зеркала и радиус зеркала R . Выведем эту формулу. Пусть S — светящаяся точка (рис. 114). Расстояние ее от зеркала OS равно d . Луч SM падает на зеркало и отражается по направлению MS' . Очевидно, α — угол падения, так как он образован падающим лучом и радиусом MC , а радиус перпендикулярен к поверхности шара; угол α' — угол отражения.

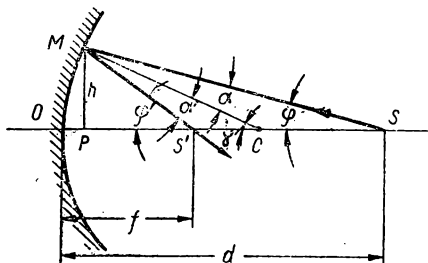


Рис. 114.

Пусть S' — точка пересечения отраженного луча с оптической осью. Из $\triangle CMS$ находим $\gamma = \alpha + \varphi$, а из $\triangle S'MC$: $\alpha' + \gamma = \varphi'$.

Складывая эти два равенства и учитывая, что $\alpha = \alpha'$, получим:

$$\varphi + \varphi' = 2\gamma.$$

Выведем формулу, пригодную только для лучей, идущих вблизи оптической оси и под малыми углами к ней; такие лучи назы-

ваются *центральными лучами*. При таком условии углы φ , φ' и γ малы, поэтому $\sin \varphi \approx \varphi$, $\sin \varphi' \approx \varphi'$ и $\sin \gamma \approx \gamma$. Кроме того, для центральных лучей отрезок OP очень мал, и мы можем им пренебречь, поэтому

$$\sin \varphi = \frac{h}{d} = \varphi, \quad \sin \varphi' = \frac{h}{f} = \varphi' \quad \text{и} \quad \sin \gamma = \frac{h}{R} = \gamma.$$

Подставляя это в равенство $\varphi + \varphi' = 2\gamma$, получим формулу зеркала:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{2}{R}.$$

Эта формула справедлива и для других лучей, исходящих из точки S ; поэтому все отраженные лучи пересекутся в точке S' , т. е. точка S' будет изображением точки S . Если $d = \infty$, то $f = \frac{R}{2}$; но при $d = \infty$ падающий на зеркало луч параллелен оптической

оси; следовательно, лучи, параллельные оптической оси, после отражения от зеркала пересекают эту ось в точке, отстоящей от

полюса на расстояние $\frac{R}{2}$. Эта точка называется *фокусом зеркала* F .

Расстояние от полюса зеркала до фокуса называется *фокусным расстоянием*. Фокусное расстояние обозначается буквой F (так же, как и фокус).

В случае выпуклого зеркала лучи, параллельные оптической оси, после отражения рассеиваются, а их продолжения пересекают оптическую ось в точке, называемой *мнимым фокусом зеркала*.

Плоскость, проходящая через фокус и перпендикулярная оптической оси, называется *фокальной плоскостью*. Побочной оптической осью называется прямая линия, проходящая через центр зеркала и образующая с главной оптической осью некоторый угол. Лучи, параллельные побочной оптической оси, после отражения от вогнутого зеркала сходятся в точке пересечения побочной оптической оси с фокальной плоскостью (в побочном фокусе).

Выразив в формуле сферического зеркала $\frac{R}{2}$ через фокусное расстояние F , получим другую запись формулы сферического зеркала:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}.$$

Если изображение мнимое, то f в формуле берется со знаком «минус». Эта формула пригодна и для выпуклого зеркала, если фокусное расстояние брать с тем же знаком «минус».

В случае, когда неизвестно, будет ли изображение действительным или мнимым, то в формуле зеркала расстояние f можно брать с любым знаком, т. е. предполагается, что изображение является действительным или мнимым; если найденное значение f получится со знаком «плюс», то предположение было правильным, а если со знаком «минус» — ошибочным.

§ 114. Построение изображения в сферических зеркалах

Из формулы сферического зеркала следует, что расстояние от зеркала до изображения зависит от расстояния между самим предметом и зеркалом. Подробного анализа мы приводить не будем, а рассмотрим построение изображения предмета при различных его расстояниях от зеркала.

Так как изображение предмета — это совокупность изображений точек предмета, то для построения изображения предмета надо найти изображение ряда точек этого предмета, а затем по ним построить все изображение. Например, для построения изображения отрезка прямой достаточно построить изображения концов этого отрезка, а для треугольника — его вершин.

Чтобы построить изображение точки, надо из нее провести два луча, ход которых после отражения от зеркала известен. Таких лучей существует три: 1) луч, параллельный оптической оси, 2) луч, проходящий через фокус зеркала, и 3) луч, проходящий через центр зеркала C . После отражения от зеркала первый луч проходит через фокус зеркала, второй — параллельно главной оптической оси, а третий — по тому же направлению, что и падающий луч.

1) Предмет AB находится за центром зеркала, т. е. $d > R$ (рис. 115). Для построения изображения крайних точек A и B воспользуемся лучом, параллельным оптической оси, и лучом, проходящим через центр зеркала. Отраженные лучи — луч, проходящий через

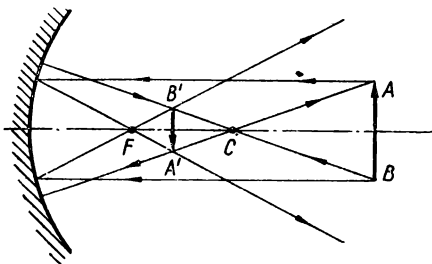


Рис. 115.

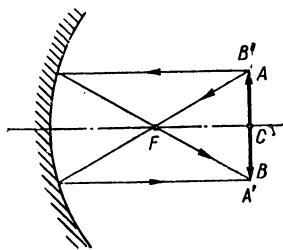


Рис. 116.

фокус, и луч, идущий в направлении падающего, — дадут изображения точек в местах пересечения A' и B' . В данном случае изображение $A'B'$ является действительным, обратным и уменьшенным.

2) Предмет AB находится на расстоянии, равном радиусу зеркала, т. е. $d = R$ (рис. 116). Для построения изображения в этом случае воспользуемся лучом, идущим параллельно оптической оси, и лучом, проходящим через фокус. На рис. 116 построено изображение лишь одной точки предмета (A). Построение изображения точки B , очевидно, производится аналогично. В этом случае изображение $A'B'$ является действительным, обратным и равным по величине предмету.

3) Предмет находится на расстоянии $F < d < R$. Для построения изображения в данном случае можно воспользоваться рис. 115. Исходя из обратимости падающего и отраженного лучей, мы можем изображение $A'B'$ принять за предмет, а предмет AB — за его изображение. В рассматриваемом случае изображение предмета является действительным, обратным и увеличенным.

4) Предмет находится на расстоянии $d = F$, т. е. лежит в фокальной плоскости (рис. 117). В данном случае изображение находится на бесконечности, так как лучи, выходящие из точки A , после от-

ражения идут параллельным пучком. Это вытекает из закона обратимости падающего и отраженного лучей, а именно: лучи, параллельные побочной оптической оси, после отражения собираются в точке, лежащей на фокальной плоскости; следовательно, лучи, исходящие

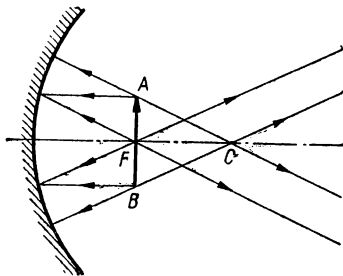


Рис. 117.

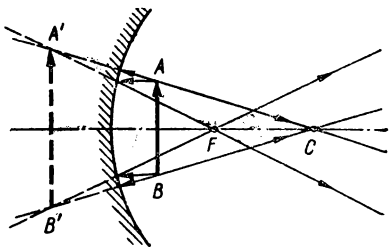


Рис. 118.

из точки, которая лежит на фокальной плоскости, после отражения идут параллельным пучком.

5) Предмет находится на расстоянии $d < F$, т. е. между фокусом и зеркалом (рис. 118). В этом случае лучи после отражения пойдут расходящимся пучком. Изображение будет за зеркалом; оно мнимое, прямое и увеличенное.

Изображение предмета в выпуклом зеркале (рис. 119) всегда мнимое, прямое и уменьшенное.

Для сравнения величины изображения с величиной предмета вводят понятие линейного увеличения. *Линейным увеличением* называется отношение размера изображения к размеру самого предмета, т. е.

$$k = \frac{A'B'}{AB}.$$

Из рис. 118 видно,

что линейное увеличение можно выразить через отношение расстояния от изображения до зеркала к расстоянию от предмета до зеркала, т. е. $k = \frac{f}{d}$. Действительно, из подобия треугольников $A'B'C$ и ABC следует пропорци-

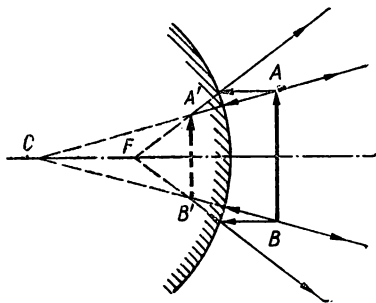


Рис. 119.

опальность сторон $A'B'$ и AB высотам треугольников $R+f$ и $R-d$, т. е. $\frac{A'B'}{AB} = \frac{R+f}{R-d}$. Заменяя R его значением, найденным из формулы зеркала, $\frac{2}{R} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}$, получим $\frac{A'B'}{AB} = -\frac{f}{d}$, что и требовалось доказать. Аналогично можно доказать полученное соотношение, пользуясь рис. 119.

Особый интерес представляет построение изображения точки, лежащей на оптической оси зеркала, так как все три луча, которыми мы пользовались при построении изображений точек в зеркале, сливаются

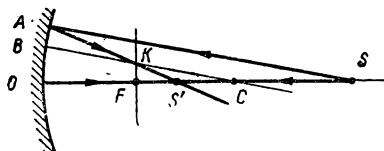


Рис. 120.

в один луч, идущий вдоль оптической оси зеркала. Построим изображение в вогнутом зеркале точки S , лежащей за центром зеркала (рис. 120). С этой целью возьмем один луч, идущий вдоль оптической оси SO , который после отражения пойдет по тому же направлению. Второй луч берем, например, в направлении SA . Чтобы найти ход луча SA после отражения от зеркала, воспользуемся тем,

что пучок лучей, параллельный какой-либо побочной оптической оси, после отражения сходится в точке пересечения данной побочной оси с фокальной плоскостью. Следовательно, луч SA после отражения пойдет через точку пересечения побочной оптической оси CB (параллельной SA) с фокальной плоскостью. Находим точку пересечения побочной оси CB с фокальной плоскостью (точка K) и через эту точку проводим искомый отраженный луч. Точка пересечения S' этого луча с оптической осью (с отраженным лучом OS) и будет изображением точки S .

Аналогично можно построить изображение точки, лежащей между полюсом зеркала и его оптическим центром, а также и в случае выпуклого зеркала.

Задача. Вогнутое сферическое зеркало дает действительное изображение, которое в два раза меньше предмета (см. рис. 115). Определить фокусное расстояние F зеркала, если расстояние между предметом и его изображением $l = 75$ см.

Решение. Из формулы линейного увеличения имеем $f = kd$. Так как по условию задачи $d - f = l$, то $d - kd = l$. Следовательно,

$$d = \frac{l}{1-k} = \frac{75 \text{ см}}{1-0,5} = 150 \text{ см}, \text{ а } f = 75 \text{ см. Подставляя значения } d$$

и f в формулу зеркала и решая ее относительно фокусного расстояния, получим:

$$F = \frac{fd}{f + d}; \quad F = 50 \text{ см.}$$

Ответ. Фокусное расстояние зеркала равно 50 см.

§ 115. Проектор

Проектор — это прибор для получения параллельного пучка света не только после отражения от центральных частей сферического зеркала, но и от точек, лежащих далеко от полюса зеркала. Это достигается тем, что зеркалу придают параболическую форму и источник помещают в фокусе параболоида. Из геометрических свойств параболы следует, что все лучи, идущие параллельно ее оптической оси, после отражения пересекаются в одной точке — фокусе параболы. Это следствие вытекает из такого свойства параболы (рис. 121): касательная к параболе в любой ее точке M составляет одинаковые углы с прямой, соединяющей точку касания с фокусом F и с прямой, параллельной оси и проходящей через точку M . Из этого свойства следует, что луч света, выйдя из фокуса, после отражения от параболического зеркала пойдет параллельно оптической оси. Это справедливо для всех точек зеркала, а не только для точек, лежащих около полюса. Поэтому в проекторах и пользуются параболическими (а не сферическими) зеркалами.

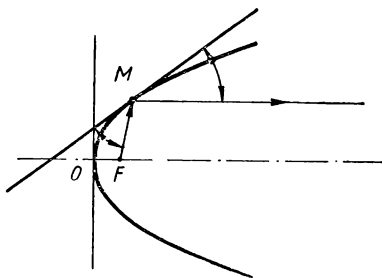


Рис. 121.

§ 116. Законы преломления света

При переходе луча света из одной среды в другую происходит *преломление света*, т. е. луч изменяет направление своего распространения. Явление преломления света при переходе из одной среды в другую обусловлено тем, что скорость света в разных средах различна.

Среда, в которой свет распространяется с меньшей скоростью, называется *оптически более плотной*, а среда, в которой свет рас-

пространяется с большей скоростью, называется *оптически менее плотной*.

Законы преломления света следующие:

1. Луч падающий и луч преломленный лежат в одной плоскости с перпендикуляром, проведенным из точки падения луча к границе раздела двух сред.

2. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная, называемая *относительным показателем преломления* второй среды по отношению к первой, т. е. $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{21}$

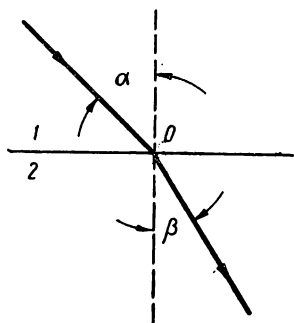


Рис. 122.

(рис. 122). Индекс 21 (читается: «два, один», а не «двадцать один») означает, что это показатель преломления второй среды по отношению к первой. Показатель преломления показывает, во сколько раз скорость света во второй среде меньше, чем в первой, т. е. $n_{21} = \frac{v_1}{v_2}$. Относи-

тельный показатель преломления может быть как больше, так и меньше единицы. При переходе луча из среды, оптически менее плотной, в среду, оптически более плотную, луч приближается к перпендикуляру, а при обратном переходе — удаляется от перпендикуляра.

Показатель преломления какой-либо среды по отношению к вакууму называется *абсолютным показателем преломления*. Абсолютный показатель преломления вещества показывает, во сколько раз скорость света в пустоте больше, чем в веществе, т. е. $n = \frac{c}{v}$. Так как

скорость света в воздухе очень мало отличается от скорости света в вакууме, абсолютный показатель преломления воздуха принимается равным единице. Абсолютный показатель преломления вещества всегда больше единицы.

Из определений абсолютного и относительного показателей преломления следует, что показатель преломления второй среды относительно первой равен отношению абсолютных показателей преломления второй среды к первой, т. е. $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$. Действительно,

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Если падающий луч направить вдоль преломленного луча, то преломленный луч пойдет по направлению падающего, т. е. лучи падающий и преломленный взаимнообратимы. Отсюда следует, что показатель преломления второй среды по отношению к первой и показатель преломления первой среды по отношению ко второй являются величинами взаимнообратными: $n_{21} = \frac{1}{n_{12}}$.

§ 117. Ход лучей в призме и в пластинке с плоско-параллельными гранями

Пусть на грань AC трехгранной призмы ABC падает луч SO (рис. 123). Так как этот луч переходит из оптически менее плотной среды в оптически более плотную, то в призме он приближается к перпендикуляру, а выходя из призмы, удаляется от перпендикуляра, в результате чего луч, пройдя призму, отклоняется от своего первоначального направления на угол δ . Этот угол тем больше, чем больше преломляющий угол призмы C .

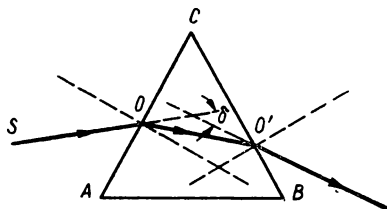


Рис. 123.

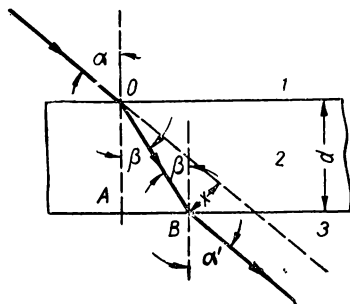


Рис. 124.

При прохождении через плоско-параллельную пластинку луч света выходит из нее в направлении, параллельном начальному, но смещается относительно последнего на некоторое расстояние x (рис. 124). Так как среда 1 и 3 одна и та же, то углы α и α' равны; действительно, $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$ и $\frac{\sin \beta}{\sin \alpha'} = \frac{1}{n}$, откуда $\sin \alpha = \sin \alpha'$, или $\alpha = \alpha'$, что и требовалось доказать.

Задача. Определить смещение луча при прохождении через стеклянную плоско-параллельную пластинку толщиной $d = 10$ см, если угол его падения $\alpha = 70^\circ$. Показатель преломления стекла $n = 1,5$.

Решение. Из рис. 124 находим $x = OB \sin(\alpha - \beta)$. Так как

$$OB = \frac{OA}{\cos \beta}, \text{ то } x = \frac{d \sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta}.$$

По закону преломления света $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$; отсюда

$$\sin \beta = \frac{\sin \alpha}{n} = 0,627; \quad \beta = 39^\circ.$$

Следовательно, смещение x равно

$$x = \frac{d \cdot \sin 31^\circ}{\cos 39^\circ} = 6,6 \text{ см.}$$

Ответ. При прохождении через пластинку луч сместится на 6,6 см.

§ 118. Полное внутреннее отражение. Предельный угол

Если луч света переходит из среды, оптически более плотной, в среду, оптически менее плотную, то угол преломления луча будет больше угла падения. Следовательно, при увеличении угла падения будет возрастать и угол преломления (рис. 125), и при некотором угле падения угол преломления будет равен 90° , т. е. преломленный луч будет скользить вдоль границы раздела сред. Такой угол падения, для которого угол преломления равен 90° , называется *предельным углом*.

При дальнейшем увеличении угла падения луч света во вторую среду не проникает, а полностью отражается от границы раздела сред. Такое явление называется *полным внутренним отражением*. Итак, полное внутреннее отражение наблюдается в случае, если луч переходит из среды, оптически более плотной, в среду, оптически менее плотную, и если при этом угол падения больше предельного.

Предельный угол падения определяется из закона преломления света:

$$\frac{\sin \alpha_0}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1},$$

где n_2 и n_1 — абсолютные показатели преломления сред. Если вторая среда — вакуум (или воздух), то

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{n},$$

где n — абсолютный показатель преломления среды.

Полное внутреннее отражение используется в оптических приборах для отражения света без искажений и без заметных потерь. Обычно для этих целей служат стеклянные прямоугольные призмы, которые позволяют повернуть луч света на 90° , 180° и перевернуть изображение, полученное в каком-либо оптическом приборе (например, в бинокле). В частности, полное внутреннее отражение используется для изготовления так называемых световодов — пучков особо приготовленных стеклянных нитей. Сплошная стеклянная нить, окруженная стеклянной же трубкой, но с меньшим, чем у нити, показателем преломления, имеет важное свойство: свет, распространяющийся в сплошной нити, претерпевает полное внутреннее отражение и, таким образом, не выходит из стекла через боковые стенки, а распространяется вдоль нити.

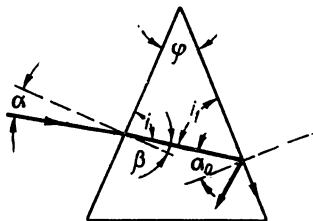


Рис. 126.

Задача 1. Преломляющий угол призмы $\varphi = 45^\circ$, показатель преломления материала призмы $n = 1,6$. Каким должен быть наибольший угол падения луча на призму, чтобы при выходе луча из нее не наступило полное внутреннее отражение?

Решение. Из рис. 126 видно, что $\beta = 90^\circ - i$, $180^\circ = \varphi + i + i_1$, $\alpha_0 = 90^\circ - i_1$. Сложив почленно эти равенства, получим: $\alpha_0 + \beta + 180^\circ = 180^\circ + \varphi$, или $\beta = \varphi - \alpha_0$. Угол α_0 определяется из условия $\sin \alpha_0 = \frac{1}{n} = \frac{1}{1,6} = 0,625$; $\alpha_0 = 38^\circ 42'$. Следовательно, $\beta =$

$= 45^\circ - 38^\circ 42' = 6^\circ 18'$. По закону преломления $\sin \alpha = n \sin \beta = 0,1755$; $\alpha = 10^\circ 7'$.

Ответ. Наибольший угол падения, при котором еще не наступает полное внутреннее отражение, равен $10^\circ 7'$.

Задача 2. Луч света выходит из скипидара в воздух. Предельный угол для этого случая $\alpha_0 = 42^\circ 23'$. Определить скорость света в скипидаре. Считать показатель преломления воздуха равным единице ($n_a = 1$).

Решение. Скорость света в скипидаре $v = \frac{c}{n}$, где n — показатель преломления скипидара, который определяется из условия $\sin \alpha_0 = \frac{1}{n}$. Следовательно,

$$v = c \sin \alpha_0; \quad v = 3 \cdot 10^8 \text{ м/сек} \cdot 0,6741 = 2,02 \cdot 10^8 \text{ м/сек}.$$

Ответ. Скорость света в скипидаре равна $2,02 \cdot 10^8 \text{ м/сек}$.

§ 119. Собирающие и рассеивающие линзы

Линзой называется прозрачная среда, ограниченная сферическими или иными кривыми поверхностями (одна из них может быть и плоской). *Собирающими линзами* называются такие линзы, у которых середина толще, чем края. У *рассеивающих линз* середина тоньше, чем края.

Мы будем рассматривать тонкие линзы, т. е. линзы, у которых расстояние между ограничивающими поверхностями мало по сравнению с расстоянием до предмета и до изображения. Поэтому при рассмотрении хода лучей через такие линзы их толщина не учитывается. Точка, находящаяся посредине линзы, называется *оптическим центром линзы*. Прямая линия, проходящая через центры кривизны обеих поверхностей линзы, называется *оптической осью линзы*. Прямые же, проходящие через оптический центр линзы, называются *побочными оптическими осями*.

Лучи, идущие параллельно оптической оси линзы, после прохождения линзы собираются в одной точке (на оптической оси), называемой *фокусом линзы*. В случае рассеивающей линзы в одной точке (на оптической оси) пересекаются линии, являющиеся продолжением проходящих лучей; эту точку называют *мнимым фокусом*. Расстояние F между фокусом линзы и ее оптическим центром называется *фокусным расстоянием*. Плоскость, проходящая через фокус линзы и перпендикулярная оптической оси, называется *фокальной плоскостью*. Лучи, падающие на линзу параллельно побочной оптической оси, после преломления в линзе сходятся в точке пересечения побочной оптической оси с фокальной плоскостью (в побочном фокусе).

Величина, обратная фокусному расстоянию, называется *оптической силой линзы* D :

$$D = \frac{1}{F}.$$

За единицу оптической силы линзы в системе СИ принимается *диоптрия* — оптическая сила такой линзы, у которой фокусное расстояние равно 1 м. У собирающих линз оптическая сила положительная, а у рассеивающих — отрицательная.

Для собирающих и рассеивающих линз имеется формула, связывающая расстояние от предмета до линзы d , расстояние от изображения до линзы f и фокусное расстояние F :

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}.$$

Величина, обратная фокусному расстоянию, т. е. оптическая сила линзы, выражается через показатель преломления вещества линзы n и радиусы кривизны ее поверхностей R_1 и R_2 следующим образом:

$$\frac{1}{F} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Задача 1. Из стекла с показателем преломления $n = 1,5$ изготовлена плоско-выпуклая линза с радиусом кривизны поверхности $R_1 = 25$ см. Определить оптическую силу линзы.

Решение. Оптическая сила линзы определяется по формуле

$$D = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

В нашем случае радиус кривизны одной поверхности (плоской) равен бесконечности, т. е. $R_2 = \infty$. Следовательно, $\frac{1}{R_2} = 0$, а

$$D = \frac{n - 1}{R_1}; \quad D = \frac{1,5 - 1}{0,25 \text{ м}} = 2 \text{ м}^{-1}.$$

Ответ. Оптическая сила линзы равна 2 диоптриям.

Задача 2. Собирающая линза, оптическая сила которой в воздухе $D = 8$ диоптрий, в некоторой жидкости действует как рассеивающая линза с фокусным расстоянием $F_1 = 1$ м. Показатель преломления стекла линзы $n = 1,5$. Определить показатель преломления жидкости.

Решение. Оптическая сила линзы в жидкости определяется по формуле

$$D_1 = \frac{1}{-F_1} = \left(\frac{n}{n_1} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

а в воздухе по формуле

$$D = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Разделив почленно первое равенство на второе, получим:

$$\frac{1}{-F_1 D} = \frac{\frac{n}{n_1} - 1}{n - 1},$$

откуда

$$n_1 = \frac{F_1 D n}{F_1 D - n + 1}; \quad n = 1,6.$$

Отв е т. Показатель преломления жидкости равен 1,6.

Задача 3. С какой выдержкой следует фотографировать велосипедиста, едущего со скоростью $v = 5$ м/сек, чтобы размытость изображения не превышала 0,2 мм? Фокусное расстояние объектива $F = 10$ см, а расстояние от велосипедиста до фотоаппарата $d = 5$ м.

Р е ш е н и е. Расстояние $s = vt$, на которое переместится велосипедист за время экспозиции t , и расстояние l , на которое переместится за это же время его изображение, связаны соотношением

$$\frac{s}{l} = \frac{d}{f}, \quad \text{или} \quad \frac{vt}{l} = \frac{d}{f}.$$

Тогда

$$f = \frac{ld}{vt}.$$

Подставляя значение f в формулу линзы, получим:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{vt}{ld}; \quad t = \frac{l(d - F)}{Fv}; \quad t = 0,002 \text{ сек.}$$

Отв е т. Время экспозиции не должно превышать 0,002 сек.

§ 120. Построение изображений в линзах

Заметим, что как для сферического зеркала были существенны три точки — полюс зеркала, фокус и оптический центр зеркала, так и для линзы существенными являются три точки — оптический центр линзы, фокус и точка, удаленная от оптического центра линзы на расстояние, равное двойному фокусному расстоянию (вдоль оптической оси).

Для построения изображения предмета необходимо (как и при построении изображения в зеркалах) найти изображение ряда точек этого предмета, а затем по ним построить изображение. При построении изображения точки удобно пользоваться тремя лучами: лучом, параллельным оптической оси, лучами, проходящими через оптический центр линзы и через фокус линзы. Ход этих лучей после прохождения линзы известен: первый луч проходит через фокус линзы, второй не меняет своего первоначального направления, а третий идет параллельно оптической оси. При построении изображения точки используются два из них.

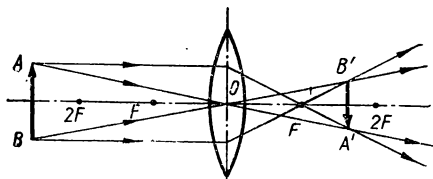


Рис. 127.

1) Предмет AB находится от линзы на расстоянии, превышающем двойное фокусное расстояние, т. е. $d > 2F$. Точки изображения A' и B' (рис. 127) находим при пересечении лучей, ход которых известен. В этом случае изображение находится на расстоянии, большем фокусного и меньшем двойного фокусного расстояния; оно действительное, уменьшенное и обратное.

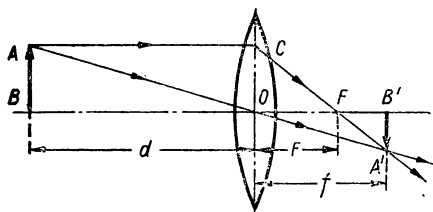


Рис. 128.

На рис. 128 выполнено построение изображения предмета AB в линзе; воспользуемся этим рисунком для вывода формулы линзы.

Из подобия треугольников FOC и $FA'B'$ имеем: $\frac{OC}{A'B'} = \frac{FO}{FB'}$, а из

подобия треугольников ABO и $A'B'O$ имеем: $\frac{AB}{A'B'} = \frac{BO}{B'O}$. Так как $AB = OC$, то левые части этих двух пропорций равны; следовательно

$$\frac{FO}{FB'} = \frac{BO}{B'O}; \quad \frac{F}{f-F} = \frac{d}{f}, \quad \text{откуда } fF + dF = df.$$

Поделив это равенство на dfF , получим формулу линзы:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}.$$

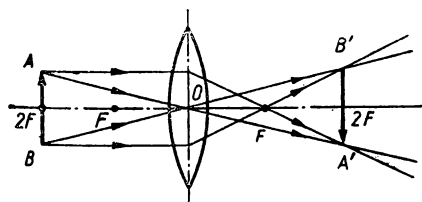


Рис. 129.

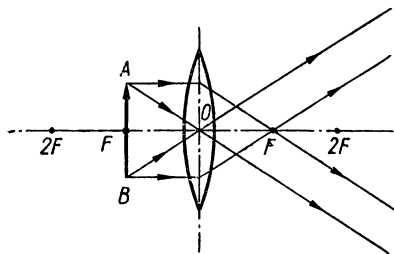


Рис. 130.

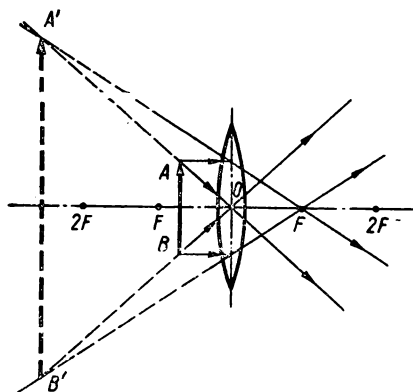


Рис. 131.

2) Предмет находится на расстоянии, равном двойному фокусному расстоянию, т. е. $d = 2F$ (рис. 129). Для построения изображения использованы те же лучи, что и в первом случае. Из построения следует, что изображение получено на расстоянии, равном $2F$, т. е. на том же расстоянии от линзы, что и сам предмет; оно действительное, такое же по величине, как и сам предмет, и обратное.

3) Предмет находится между фокусом и точкой, отстоящей от линзы на двойное фокусное расстояние, т. е. $2F > d > F$. Для построения изображения в данном случае можно воспользоваться рис. 127, приняв на нем изображение $A'B'$ за предмет; тогда AB будет его изображением. При построении этого изображения использовались лучи, проходящие через фокус и через оптический центр линзы. Полученное изображение действительное, увеличенное и обратное.

4) Предмет находится на расстоянии, равном фокусному расстоянию, т. е. $d = F$ (рис. 130). В этом случае лучи, исходящие из точки A , после выхода из линзы идут параллельным пучком, что следует из закона обратимости падающего и преломленного лучей. Лучи, параллельные побочной оптической оси, после преломления

в линзе собираются в точке пересечения данной побочной оси с фокальной плоскостью. Так как в нашем случае предмет лежит в фокальной плоскости, то лучи, исходящие из каждой точки предмета, после преломления идут параллельным пучком. Следовательно, изображение находится на бесконечности.

5) Предмет находится между фокусом и линзой, т. е. $d < F$ (рис. 131). Изображение строим, пользуясь лучом, параллельным оптической оси, и лучом, проходящим через оптический центр линзы. Как видно из построения, лучи выходят из линзы расходящимся пучком; они как бы выходят из точек A' и B' , лежащих на продолжении лучей. Полученное изображение $A'B'$ мнимое, увеличенное и прямое.

6) Для построения изображения в рассеивающей линзе (рис. 132) можно воспользоваться лучом, идущим параллельно оптической оси, и лучом, проходящим через оптический центр. Выходящие из линзы лучи рассеиваются, а поэтому изображение получается на пересечении линий, являющихся продолжением выходящих лучей. Из построения изображения в этом случае следует, что при любом расположении предмета относительно рассеивающей линзы всегда получается изображение мнимое, уменьшенное и прямое.

Отношение размера изображения предмета к размеру самого предмета называется *линейным увеличением*. Линейное увеличение, согласно определению,

$$k = \frac{A'B'}{AB}.$$

Из подобия треугольников $A'B'O$ и ABO следует, что

$$k = \frac{f}{d}.$$

При построении изображения точки мы пользовались лучами, пути которых после преломления заведомо известны. Особый интерес представляет случай, когда точка лежит на оптической оси.

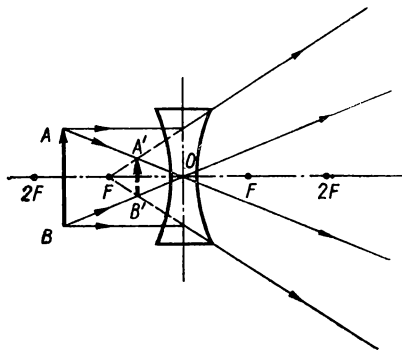


Рис. 132.

В этом случае лучи, которыми мы пользовались при построении изображения, сливаются в один луч. Построим изображение светящейся точки S , лежащей на оптической оси линзы (рис. 133). Проведем из точки S на линзу какой-либо луч SA и побочную ось BO , параллельную SA . Побочная ось BO пересекает фокальную плоскость MN в точке C , в которой собираются продолжения лучей, вышедших из линзы, если до падения на линзу эти лучи были параллельны побочной оси OB . Следовательно, через эту точку будет направлен

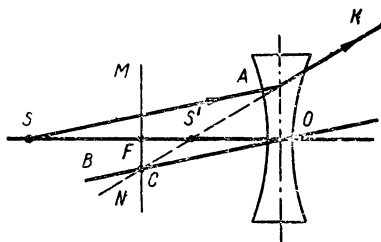


Рис. 133.

преломленный луч AK . Он пересечет главную оптическую ось в точке S' , которая и является изображением точки S .

Задача. На каком расстоянии от двояковыпуклой линзы нужно поместить предмет высотой $h = 3$ см, чтобы получить изображение размером $H = 12$ см? Фокусное расстояние линзы $F = 20$ см. Предмет расположен перпендикулярно к оптической оси.

Решение. Первый случай — изображение действительное. Линейное увеличение $k = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}$. Следовательно, $f = \frac{H}{h} d = 4d$.

Подставляя полученное выражение для f в формулу линзы, получим:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{4d}. \quad \text{Отсюда } d = \frac{5F}{4}; \quad d = 25 \text{ см.}$$

Второй случай — изображение мнимое. Формула линзы в этом случае имеет вид:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}.$$

Подставляя значение $f = 4d$ в формулу линзы, получим:

$$d = \frac{3F}{4}; \quad d = 15 \text{ см.}$$

Ответ. Предмет следует поместить на расстоянии 25 или 15 см от линзы.

§ 121. Оптические приборы и ход лучей в них

1. *Проекционный аппарат.* Проекционные приборы, предназначенные для проектирования прозрачных объектов, называются *диакопами* (греч. «диа» — прозрачный), а для проектирования непрозрачных предметов — *эпископами* (греч. «эпи» — непрозрачный). На рис. 134 показан ход лучей в проекционном аппарате, предназначенном для проектирования на экран MN прозрачных предметов.

Главной частью проекционного аппарата является объектив O . Свет от источника S (лампы) направляется на диапозитив D . Чтобы свет, идущий от диапозитива, целиком попадал на объектив, перед диапозитивом ставят конденсор K . Сам диапозитив помещают вблизи фокальной плоскости объектива, а поэтому линейное увеличение проекционного

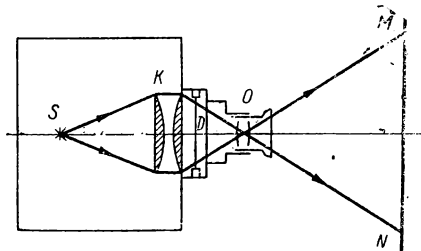


Рис. 134.

аппарата $k = \frac{F}{f}$, где f — расстояние от объектива до изображения, F — фокусное расстояние объектива. Объектив можно смещать и тем самым делать резким изображение предмета на экране (наводить на фокус).

Схема хода лучей в эпископе показана на рис. 135.

Свет от источника C падает на предмет AB , отражается от предмета, идет к плоскому зеркалу $З$ и далее падает на объектив O , который дает изображение $A'B'$ предмета на экране. На рисунке показан ход лучей для точки S предмета AB .

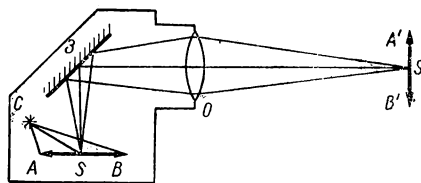


Рис. 135.

В настоящее время широкое распространение получили приборы, называемые *эпидиакопами*. Они имеют двойную оптическую систему, позволяющую проектировать на экран прозрачные и непрозрачные предметы.

2. *Фотоаппарат.* Основными частями фотоаппарата (рис. 136) является его объектив O и темная камера K , на задней стенке которой укрепляется фотопластинка или фотопленка. Изображение $A'B'$ на пластинке получается уменьшенное, действительное и обратное.

Для того чтобы изображение на пластинке было четким, употребляются сложные объективы, состоящие из систем линз. Заметим, что фотоаппарат будет работать и тогда, когда вместо объектива сделано просто небольшое отверстие. В этом случае аппарат называется *камерой-обскурой*.

При фотографировании большое значение имеет освещенность фотопластинки. Ясно, что количество световой энергии, попадающей

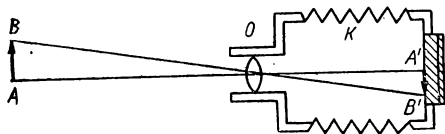


Рис. 136.

в аппарат, ограничено площадью объектива, т. е. пропорционально d^2 , где d — диаметр объектива. При достаточном удалении предмета от фотоаппарата пластинка будет находиться на расстоянии F от объектива. Следовательно, освещенность пластинки обратно пропор-

циональна F^2 . Таким образом, освещенность пластинки пропорциональна величине $\frac{d^2}{F^2}$, которая называется *светосилой объектива*.

Обычно качество объектива оценивается величиной $\frac{d}{F}$, которая называется *относительным отверстием объектива*.

3. *Лупа* — обычно это короткофокусная собирающая линза. Чтобы детально рассмотреть мелкий предмет, надо приблизить его к глазу; однако для глаза существует расстояние наилучшего зрения (для нормального глаза оно равно 25 см). Назначение лупы состоит в том, чтобы на расстоянии наилучшего зрения рассматривать предмет под большим углом зрения (рис. 137). Предмет AB находится на расстоянии наилучшего зрения и виден под углом α . В положении A_1B_1 он виден под углом α' , но находится очень близко от глаза. Лупа удаляет изображение предмета на расстояние наилучшего зрения (положение $A'B'$). Но теперь оно видно под углом зрения α' и, следовательно, можно лучше рассмотреть детали предмета.

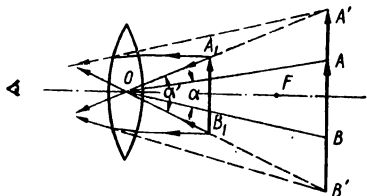


Рис. 137.

Увеличение, даваемое лупой, равно $\frac{D}{F}$, где D — расстояние наи-

лучшего зрения, F — фокусное расстояние линзы. Конечно, эта формула приближенная, что видно из рисунка.

4. *Микроскоп* служит для рассматривания близко расположенных малых объектов. Его оптическая система состоит из объектива O_1 и окуляра O_2 (рис. 138). Оптические оси окуляра и объектива совпадают. Назначение объектива — давать увеличенное действительное изображение объекта. Однако увеличение, даваемое объективом, недостаточно, поэтому изображение рассматривается через окуляр, который дает увеличенное мнимое изображение. Окуляр является лупой.

Определим увеличение, которое дает микроскоп. Обозначив через δ расстояние между фокусами объектива и окуляра, т. е. расстояние F_2F_1 , из рисунка можно видеть, что $\frac{A_1B_1}{AB}$ приблизительно равно $\frac{\delta}{F_1}$. Это есть увеличение объектива, а увеличение окуляра (лупы) равно $\frac{D}{F_2}$ (где D — расстояние наилучшего зрения). Полное увеличение, даваемое микроскопом, будет равно

$$k = \frac{\delta D}{F_1 F_2}.$$

Для получения большего увеличения пользуются электронным и ионным микроскопами. При помощи этих микроскопов можно получить увеличение более чем в 1 000 000 раз и различить объекты размером приблизительно 10^{-7} см, т. е. можно различать отдельные крупные молекулы. В электронном микроскопе вместо светового потока используются пучок электронов, которые фокусируются так называемыми электрическими и магнитными линзами. Действие их основано на том, что электрические и магнитные линзы влияют на движущиеся заряды и заставляют их изменять свою траекторию.

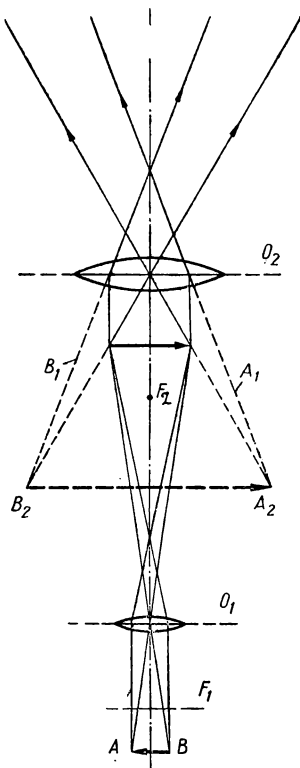


Рис. 138.

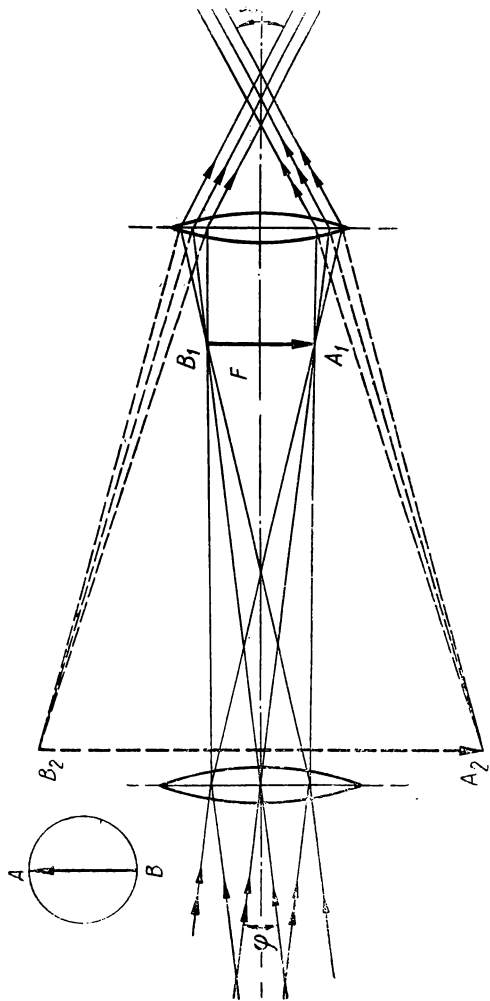


Рис. 139.

Подбирая соответствующую конфигурацию полей, достигают нужной фокусировки пучков.

5. *Телескоп* служит для рассматривания больших, но весьма удаленных предметов. Его оптическая система состоит из объектива и окуляра. Но в телескопе, в отличие от микроскопа, объектив делают большого размера, чтобы в его фокусе собралось больше лучей, так как яркость рассматриваемых объектов очень мала. Окуляр, так же как и в случае микроскопа, служит лупой (рис. 139). В телескопе задний фокус объектива F_1 обычно совпадает с передним фокусом окуляра F_2 . От отдельных точек предмета, например от точек A и B , лучи идут в объектив телескопа почти параллельным пучком и после прохождения через объектив пересекаются соответственно в точках A_1 и B_1 , лежащих в фокальной плоскости, давая действительное изображение точек A и B . Так как фокальная плоскость объектива одновременно является фокальной плоскостью окуляра, эти пучки лучей после пересечения в точках A_1 и B_1 идут на окуляр и выходят из последнего в виде параллельных пучков, образуя между собой угол γ , значительно больший, чем угол φ , под которым они поступили в объектив. Увеличение, даваемое телескопом, равно $k = \frac{\gamma}{\varphi}$. В силу малости углов γ и φ это отношение можно заменить

отношением $\frac{F_{об}}{F_{ок}}$, т. е.

$$k = \frac{F_{об}}{F_{ок}}.$$

§ 122. Глаз как оптический прибор

Глаз представляет собой оптическую систему, дающую изображение предмета на светочувствительной сетчатой оболочке глазного яблока. Глаз окружен снаружи тремя оболочками (рис. 140). Внешняя оболочка называется *склерой*, или *белковой оболочкой 1*. Эта плотная оболочка защищает глаз от различных внешних воздействий. Впереди глаза эта оболочка переходит в так называемую *роговую оболочку*, которая прозрачна в своей средней части, а по бокам имеет белый цвет (*белок*). Далее идет *передняя камера 2*, заполненная водянистой влагой. За ней расположен *хрусталик 3*, который может менять свою кривизну при помощи особых мускулов. Перед хрусталиком имеется так называемая *радужная оболочка 4*, в которой посредине есть отверстие — *зрачок*: он может изменять свой диаметр в зависимости от того, какое количество света падает на глаз. При

большой интенсивности света зрачок сужается, при малой — расширяется. За хрусталиком находится *глазное яблоко 5*, заполненное *стекловидным телом*.

Второй оболочкой является *сосудистая оболочка*, а третьей — *сетчатая*, или *сетчатка*. Сетчатая оболочка покрывает всю внутреннюю поверхность глаза, за исключением его передней части. Через оболочку глаза в задней его части входит зрительный нерв. Сетчатая оболочка представляет собой светочувствительную поверхность глаза. Основным элементом оптической системы глаза, *хрусталик*, — это двояковыпуклая линза. Благодаря хрусталику изображение внешних предметов проектируется на сетчатую оболочку. Так как кривизна поверхности хрусталика может изменяться, то всегда имеется возможность привести изображение предмета на поверхность сетчатки. Этот процесс называется *аккомодацией глаза*.

Недалеко от входа зрительного нерва на поверхности сетчатки имеется так называемое *желтое пятно 6* — наиболее чувствительное место на сетчатке.

Водянистая влага передней камеры, хрусталик и стекловидное тело представляют собой единую оптическую систему глаза.

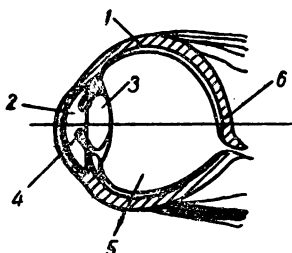


Рис. 140.

§ 123. Недостатки глаза. Очки

Способность глаза к аккомодации обеспечивает проектирование предметов на поверхность сетчатки. Нормальный глаз может аккомодировать без какого-либо усилия предметы с любого расстояния до так называемого наименьшего, которое колеблется от 10 см до 22 см. С возрастом это расстояние увеличивается до 30 см. Однако есть глаза, у которых фокус в спокойном состоянии лежит внутри глаза, т. е. хрусталик этого глаза сильнее преломляет лучи, чем хрусталик нормального глаза (рис. 141, а). Такой глаз называется *близоруким*, так как он не может отчетливо видеть удаленные предметы. Для того чтобы лучи, идущие от каждой точки удаленного предмета (т. е. почти параллельные пучки), собирались на сетчатке, нужно их сделать расходящимися, что достигается путем помещения перед глазом рассеивающей линзы (рис. 141, б).

Есть глаза, у которых фокус в спокойном состоянии расположен за сетчаткой (рис. 141, в), т. е. хрусталик недостаточно преломляет лучи. Такой глаз называется *дальнозорким*, так как не может от-

четливо видеть близко расположенные предметы. Чтобы привести фокус на сетчатку, надо параллельный пучок лучей света, падающий на хрусталик, превратить в сходящийся пучок, что достигается размещением перед глазом собирающей линзы (рис. 141, а). Эти рассеивающие и собирающие линзы называются *очками*. Оптическая сила очков измеряется в диоптриях.

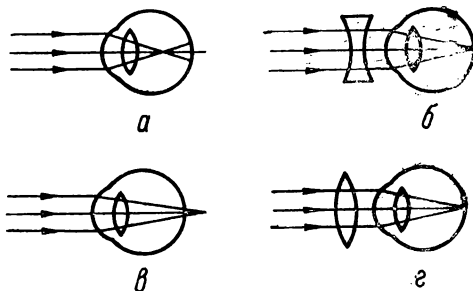


Рис. 141.

Контрольные вопросы к главе «Геометрическая оптика»

- 1) Что представляет собой свет?
- 2) Как объяснить образование теней и полутеней?
- 3) Как экспериментально определяется скорость света?
- 4) Что называется световым лучом?
- 5) Дайте определения следующих светотехнических величин и единиц их измерения: светового потока, силы света и освещенности.
- 6) Что называется фотометром? Какие типы фотометров вам известны?
- 7) Что называется углом падения луча? углом отражения?
- 8) Каковы законы отражения световых лучей?
- 9) На какой бумаге удобнее для глаза читать написанное: на гладкой или шероховатой?
- 10) Что называется фокусом и фокусным расстоянием сферического зеркала?
- 11) Что называется изображением (действительным, мнимым) точки?
- 12) Что называется изображением предмета?

13) Каково изображение предмета в плоском зеркале? в сферическом?

14) Какими лучами удобно пользоваться при построении изображения в сферическом зеркале и почему?

15) Может ли собирающее зеркало рассеивать лучи?

16) Как перемещается и изменяется по величине изображение предмета, если предмет перемещать из бесконечности до вогнутого зеркала?

17) Для каких лучей справедлива формула зеркала $\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{2}{R}$?

18) Почему днем из комнаты через окно видно все, что происходит на улице, а смотрящему с улицы трудно разобрать, что находится в комнате?

19) Что называется углом преломления и каковы законы преломления света?

20) Каков ход лучей в призме? в пластинке с плоско-параллельными гранями?

21) Что называется предельным углом? полным внутренним отражением света?

22) Каково необходимое и достаточное условие существования полного внутреннего отражения?

23) Что называется линзой и какие существуют типы линз?

24) Что называется фокусом (действительным и мнимым) линзы? оптической осью и побочной оптической осью линзы?

25) Что называется оптической силой линзы и какими единицами она измеряется?

26) Какими лучами пользуются при построении изображения в линзе и почему?

27) Можно ли при помощи собирающей линзы получить мнимое изображение предмета?

28) Как строится изображение в линзе, если точка лежит на оптической оси?

29) Как перемещается и изменяется изображение предмета в линзе, если предмет перемещать от линзы до бесконечности?

30) Каков ход лучей в проекционном аппарате? в фотоаппарате? в лупе?

31) Каков ход лучей в микроскопе? в телескопе?

32) Что называется увеличением оптического прибора и от каких величин зависит оно в микроскопе и в телескопе?

33) Опишите устройство глаза.

34) Какие существуют недостатки глаза и как они устраняются?

Вопросы и задачи к главе «Геометрическая оптика»

258. Покажите, как получается изображение в камере с малым отверстием. О чем свидетельствует резкость изображения в этой камере?

259. Для измерения скорости света непосредственно в вакууме Майкельсон применил метод вращающейся призмы. Свет распространялся в трубе, из которой был откачан воздух. Длина трубы $l = 1,6$ км, свет проходил в ней туда и обратно $n = 10$ раз. С какой частотой вращалась призма, если для скорости света получилось значение $c = 299\,774$ км/сек?

260. Для выполнения некоторой работы освещенность стола должна быть $E = 10$ лк. На каком расстоянии от стола нужно поместить лампу, сила света которой $I = 100$ св?

261. Две лампы силой света $I = 25$ св и $I_1 = 150$ св находятся на расстоянии одна от другой $l = 120$ см. Где между ними надо поместить фотометр, чтобы освещенность его граней BC и AC (см. рис. 110) была одинаковой?

262. На высоте $h = 2$ м над серединой стола диаметром $d = 3$ м висит лампа силой света $I = 100$ св. Ее заменили лампой силой света $I = 25$ св, изменив расстояние от стола так, что освещенность середины стола не изменилась. Как изменится освещенность края стола?

263. Как можно осветить дно колодца при помощи плоского зеркала лучами Солнца, находящегося на высоте 60° ?

264. Лучи Солнца падают на Землю под углом 50° . Под каким углом к горизонту надо поставить плоское зеркало, чтобы лучи, отразившись от него, пошли горизонтально параллельным пучком?

265. Какого наименьшего размера должно быть плоское зеркало, чтобы, став перед ним, человек мог видеть себя во весь рост?

266. Светящаяся точка находится между двумя плоскими параллельными зеркалами. Сколько изображений получится в зеркалах?

267. Светящаяся точка находится на биссектрисе угла, образованного двумя плоскими зеркалами. Сколько будет изображений точки, если угол равен 60° ?

268. В глазу собеседника можно увидеть свое изображение в прямом и уменьшенном виде. Как возникает это изображение?

269. На какой угол повернется луч, отраженный от плоского зеркала, при повороте самого зеркала на угол $\varphi = 17^\circ$ вокруг оси, лежащей в плоскости зеркала и проходящей через точку падения луча?

270. Фокусное расстояние вогнутого зеркала равно 25 см. Каков его радиус кривизны?

271. Мальчик ростом 150 см стоит перед вогнутым зеркалом на расстоянии 6 м от него. Его изображение находится на расстоянии 60 см перед зеркалом. Какова высота изображения? Каково фокусное

расстояние зеркала? Сделайте чертеж предмета и его изображения в зеркале

272. Почему свет, переходя из одной среды в другую, преломляется?

273. На столе лежит лист бумаги. Узкий пучок света, падающий на бумагу под углом 45° , дает на ней светлое пятно. На сколько сместится это пятно, если на бумагу положить стеклянную пластинку толщиной $d = 5$ см? Определить, на сколько смещает эта пластинка падающий на нее пучок света. Показатель преломления стекла $n = 1,5$.

274. На какое расстояние сместился луч, проходящий через пластинку с плоско-параллельными гранями, если толщина ее d , показатель преломления n , а угол падения луча α ? Может ли смещение луча быть больше толщины пластинки?

275. Может ли получиться полное внутреннее отражение при переходе луча из стекла в воду?

276. В дно пруда вбили вертикально шест высотой 1 м. Определить длину тени от шеста на дне пруда, если лучи Солнца падают на поверхность воды под углом $\alpha = 60^\circ$, а шест целиком находится под водой. Показатель преломления воды $n = 1,33$.

277. На дне ручья лежит камешек. Мальчик хочет столкнуть его палкой. Прицеливаясь, мальчик держит палку под углом 45° . На каком расстоянии от камешка воткнется палка в дно ручья, если его глубина 50 см? Показатель преломления воды $n = 1,33$.

278. Луч света входит в стеклянную призму под углом α и выходит из призмы в воздух под углом β , причем, пройдя призму, отклоняется от первоначального направления на угол δ . Найти преломляющий угол призмы φ и показатель преломления материала, из которого она изготовлена.

279. Сечение стеклянной призмы имеет форму равностороннего треугольника. Луч падает на одну из граней перпендикулярно к ней. Найти угол δ между лучом падающим и лучом, вышедшим из призмы. Показатель преломления стекла $n = 1,5$.

280. На дно аквариума, наполненного водой до высоты $h = 20$ см, помещен точечный источник света. Какого наименьшего радиуса круглую непрозрачную пластинку нужно положить на воду, чтобы ни один луч не мог выйти через поверхность воды?

281. При падении на плоскую границу двух сред световой луч частично отражается, частично преломляется. При каком угле падения отраженный луч перпендикулярен преломленному?

282. Желая получить снимок зебры, фотограф снял белого осла, наведя на объектив фотоаппарата стекло с черными полосками. Что получилось на снимке?

283. Как следует расположить две собирающие линзы, чтобы пучок параллельных лучей, идущий вдоль оптической оси, после пре-

ломления в обеих линзах вышел снова параллельным пучком, идущим вдоль оптической оси?

284. Как следует расположить собирающую и рассеивающую линзы, чтобы пучок параллельных лучей, идущий вдоль оптической оси, после преломления в обеих линзах вышел снова параллельным пучком, идущим вдоль оптической оси? Всегда ли возможно это сделать?

285. Из стекла с показателем преломления $n = 1,56$ требуется изготовить линзу, оптическая сила которой $D = 8$ диоптриям. Каковы должны быть радиусы кривизны обеих поверхностей линзы, если кривизна их одинакова?

286. Фокусное расстояние линзы в воздухе равно 10 см. Чему будет равно фокусное расстояние этой линзы, если ее погрузить в воду? $n_c = 1,5$; $n_v = 1,33$.

287. Почему, открыв глаза под водой, мы видим только туманные очертания предметов, а в маске для ныряния предметы видны совершенно отчетливо?

288. Чему равен показатель преломления стекла, из которого изготовлена симметричная собирающая линза, если фокусное расстояние этой линзы равно радиусу кривизны ее поверхностей?

Глава XX. ФИЗИЧЕСКАЯ ОПТИКА

§ 124. Природа света

Первые высказывания о природе света относятся к древним временам, когда придерживались мнения, что светящиеся тела испускают частицы—корпускулы. Развитие и формулировка *корпускулярной теории света* принадлежит И. Ньютону (1672 г.). Отчетливую форму лировку *волновой теории света* связывают с именем Х. Гюйгенса (1690 г.). Последовательным сторонником волновой теории был М. В. Ломоносов. Согласно этой теории, свет распространяется в среде, которая была названа *эфиром*.

В течение всего XVIII ст. параллельно существовали обе теории. Общее признание волновая теория получила лишь в XIX ст. благодаря работам Юнга, Френеля и других ученых, объяснивших интерференцию, дифракцию, прямолинейное распространение света и ряд других явлений.

В 70 гг. XIX ст. механическая волновая теория света была заменена *электромагнитной волновой теорией света*, создателем которой был английский физик Дж. Максвелл (1865 г.). Эта теория экспериментально подтверждена Герцем. Создавая электромагнитную теорию света, Максвелл показал, что свет должен производить дав-

ление на тела, на которые он падает. Величину этого давления экспериментально определил русский физик проф. П. Н. Лебедев. Опыты Лебедева с большой наглядностью подтвердили электромагнитную теорию света.

На рубеже XIX и XX столетий были открыты явления (в частности, фотоэффект), которые не могли быть объяснены волновой теорией света. Немецким ученым М. Планком была предложена *квантовая теория излучения*, согласно которой свет излучается источником не непрерывно, как это следует из электромагнитной теории света, а отдельными порциями энергии — квантами. Величина кванта энергии $\epsilon = h\nu$, где ν — частота излучающего света, а h — коэффициент пропорциональности, названный постоянной Планка, $h = 6,62 \times 10^{-34}$ Дж · сек.

Впоследствии Эйнштейн развил идеи Планка и ввел представление о квантах света, или фотонах. *Фотоны* — это частицы света; таким образом, свет стали рассматривать как поток частиц. Такое представление о свете дает возможность объяснить фотоэлектрический эффект и ряд других явлений, которые не могут быть объяснены волновой теорией.

Согласно современной квантовой теории, свет обладает двойственной природой: это одновременно и волна, и поток частиц. В таких явлениях, как дисперсия, интерференция, дифракция и др., свет обнаруживает свойства непрерывных электромагнитных волн, а в других явлениях, например в фотоэффекте, проявляются корпускулярные его свойства, т. е. свет в этих явлениях ведет себя как поток отдельных частиц — квантов света. Квантовая природа света непосредственно подтверждена многими опытами.

§ 125. Дисперсия света

Проходя через трехгранную призму, свет преломляется и по выходе из нее отклоняется от своего первоначального направления. Величина отклонения луча зависит от показателя преломления вещества призмы (обычно стекла). Как показывают опыты, показатель преломления зависит от длины волны света. Белый свет представляет собой совокупность лучей света различных длин волн; если направить на поверхность трехгранной призмы пучок параллельных лучей света, то по выходе из призмы пучок уже не будет параллельным, а каждый луч пойдет по своему направлению, и на экране получится радужная полоска $K\Phi$ (рис. 142), которая называется *спектром*.

Явление зависимости показателя преломления вещества от длины световой волны называется *дисперсией света*.

В получаемом спектре различают семь основных цветов: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый. Между

этими цветами, конечно, имеется множество промежуточных. Меньше всего отклоняются красные лучи, больше всего фиолетовые.

Показатель преломления вещества, как мы видели, зависит от длины волны. С другой стороны, известно, что показатель преломления равен отношению синуса угла падения к синусу угла преломления, причем это отношение равно отношению скорости света в среде, из которой идет свет, к скорости в среде, в которую он про-

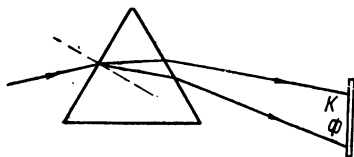


Рис. 142.

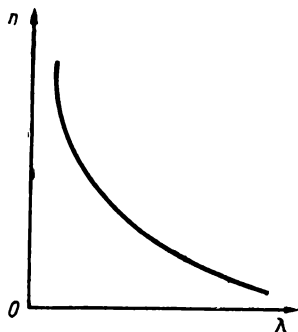


Рис. 143.

никает. В случае распространения света из вакуума в среду $n = \frac{c}{v}$, где c — скорость света в пустоте, v — скорость света в среде. В пустоте скорость света не зависит от длины световой волны, а в среде зависит. Поэтому и показатель преломления вещества зависит от

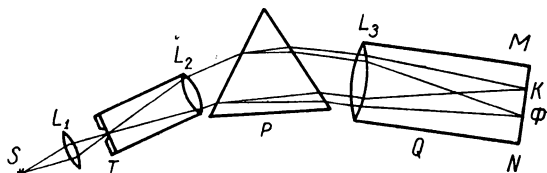


Рис. 144.

длины волны. Кривая зависимости показателя преломления n от длины волны λ называется *дисперсионной кривой* (рис. 143).

Для наблюдения и изучения спектров служат специальные приборы, называемые *спектроскопами*. На рис. 144 показаны основные части спектрографа: S — источник света, L_1 — линза, фокусирующая

пучок света на щель коллиматора. Коллиматор — это труба с линзой L_2 и щелью T , помещаемой в фокусе линзы L_2 . Из коллиматора свет выходит параллельным пучком и падает на трехгранную призму P . Здесь он преломляется и разлагается в спектр. Линза L_3 собирает соответствующие цветные лучи в фокальной плоскости MN камеры (зрительной трубы).

Спектр солнечного света состоит не только из видимых лучей, в нем есть и невидимые лучи: ультрафиолетовые, инфракрасные и др.

Ультрафиолетовые лучи оказывают химическое действие. Кроме того, под действием этих лучей многие вещества светятся (люминесцируют). Таким свойством обладает, в частности, стекло, содержащее соли урана. Урановое стекло является хорошим индикатором для обнаружения ультрафиолетовой части спектра. Ультрафиолетовая часть спектра длиннее видимой его части.

Инфракрасные лучи оказывают значительное тепловое действие. Поэтому наличие инфракрасной части спектра можно обнаружить при помощи обыкновенного термометра, помещенного за красную часть спектра. Конечно, термометр не является достаточно чувствительным прибором, поэтому для обнаружения инфракрасных лучей применяются так называемые *болометры* — приборы, которые в качестве составной части имеют вещества, сильно меняющие электросопротивление при изменении температуры. Инфракрасная часть спектра намного длиннее видимой части.

Все спектры делятся на спектры испускания и спектры поглощения. *Спектр испускания* создается светящимися телами. *Спектр поглощения* получается, если на пути лучей, падающих на призму, поместить какое-либо вещество. Это вещество не пропустит определенные лучи (поглотит их), и на экране на сплошной спектральной полоске появятся линии или полосы — спектр поглощения.

По виду различают спектры сплошные, линейчатые и полосатые. *Сплошной спектр* — это непрерывная радужная полоска. Такой спектр дают раскаленные твердые и жидкие тела (расплавленные металлы и др.). *Линейчатый спектр* — это совокупность определенных спектральных линий (на черном фоне). Такой спектр дают возбужденные пары и газы, находящиеся в атомарном состоянии. *Полосатый спектр* представляет собой отдельные спектральные полосы, один край которых резкий, а другой размытый. Такие спектры дают возбужденные пары и газы, находящиеся в молекулярном состоянии (молекулярные спектры).

Немецкий физик Кирхгоф открыл закон, согласно которому спектральный состав света, который излучается телами в горячем состоянии, поглощается ими в холодном состоянии. Тело, которое поглощает все падающие на него лучи, называется *абсолютно черным*.

Задача 1. Длина волны света, соответствующего красной линии водорода в вакууме, составляет $\lambda = 656,3$ нм. Определить длину волны

этого же света в стекле, если показатель преломления стекла для этих лучей $n = 1,51$.

Решение. При переходе света из одной среды в другую изменяется длина волны, а частота остается той же. Следовательно, для вакуума $\lambda = \frac{c}{\nu}$, а для стекла $\lambda_1 = \frac{v}{\nu}$, где ν — частота света, c и v — скорости света соответственно в вакууме и в стекле. Разделив первое равенство на второе, получим: $\frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{c}{v}$; но так как $\frac{c}{v} = n$, то $\frac{\lambda}{\lambda_1} = n$. Отсюда

$$\lambda_1 = \frac{\lambda}{n}; \quad \lambda_1 = 435 \text{ нм.}$$

Ответ. Длина световой волны в стекле равна 435 нм.

Задача 2. Угол падения белого света на поверхность стекло—воздух равен $\alpha = 41^\circ$. Выйдет ли белый свет из стекла в воздух, если показатели преломления данного сорта стекла для красных и фиолетовых лучей равны соответственно $n_1 = 1,51$ и $n_2 = 1,53$?

Решение. Определим значения предельных углов полного внутреннего отражения для крайних лучей белого света (т. е. для красного и фиолетового) при их падении на границу стекло—воздух. Для красных лучей

$$\alpha_0 = \arcsin \frac{1}{n_1} = \arcsin \frac{1}{1,51} = 41^\circ 28'.$$

Для фиолетовых лучей

$$\alpha'_0 = \arcsin \frac{1}{n_2} = \arcsin \frac{1}{1,53} = 40^\circ 49'.$$

Из решения следует, что угол падения для красных лучей меньше предельного угла, поэтому красные лучи выходят из стекла в воздух. Угол падения для фиолетовых лучей больше предельного угла, поэтому фиолетовые лучи испытывают полное внутреннее отражение и из стекла не выходят. Следовательно, из стекла в воздух выйдет свет, но не белый, так как в нем не будет всех лучей, составляющих белый свет.

§ 126. Спектр Солнца. Фраунгоферовы линии. Спектральный анализ

Солнце дает непрерывный спектр. Поскольку такой спектр дают раскаленные твердые и жидкие тела, можно было бы думать, что Солнце представляет собой или раскаленное твердое тело, или раскален-

ную жидкость. На самом деле причиной непрерывного спектра является большая плотность солнечного вещества.

Видимое излучение испускается нижними слоями атмосферы Солнца — так называемой *фотосферой*; при этом оно проходит через верхнюю часть атмосферы с более низкой температурой — через *обращающий слой*. По закону Кирхгофа, этот слой дает спектр поглощения, поэтому на сплошной спектр Солнца наложено более 20 000 линий поглощения. Они названы *фраунгоферовыми* линиями, по имени ученого, открывшего их.

Как уже сказано, раскаленные газы дают линейчатые спектры, причем каждый газ дает свой особый спектр. Зная линейчатые спектры газов (для всех раскаленных газов имеются таблицы спектров), можно производить анализ неизвестных веществ. Для этого нужно только сфотографировать спектр вещества и сравнить его с известными спектрами. Совпадение спектральных линий позволит определить, какие элементы входят в состав вещества. Изучение спектров звезд позволило астрономам определить химический состав этих небесных тел.

Получить спектр в том случае, если исследуемый объект представляет собой газ, можно, пропустив через него электрический ток. Если объект — жидкость, то ею пропитывают один из углей электрической дуги и потом исследуют спектр этой дуги. Раскаленный уголь даст сплошной спектр, а на его фоне обозначатся линии исследуемого вещества. Исследуя твердое тело, кусочек его кладут в кратер анода электрической дуги.

§ 127. Рентгеновские лучи

Если исследовать спектр Солнца за пределами земной атмосферы, то оказывается, что за ультрафиолетовой частью спектра начинается так называемый рентгеновский спектр, который образуют *рентгеновские лучи*. Обычными источниками света рентгеновские лучи не испускаются. Для получения их требуются специальные приборы — *рентгеновские трубки*.

Существуют два типа рентгеновских трубок: ионные и электронные. *Ионная трубка* (рис. 145) представляет собой колбу, в которой создается невысокий вакуум. В колбу впаяны электроды *К* и *А*, между которыми образуется разряд. Положительные ионы, ударяясь о катод *К*, выбивают из него электроны, которые летят к аноду *А* (антикатоду) и тормозятся в нем. При торможении они испускают особые лучи, названные рентгеновскими.

Электронная трубка (рис. 146) — это колба, в которой создается высокий вакуум. Катодом *К* является нить накала, а антикатодом *А* — металлическая пластинка, укрепленная на трубке, охлаждаемой водой. Электроны, испускаемые нитью накала, летят к анти-

катоду и в нем тормозятся, испуская рентгеновские лучи. При этом получается сплошной рентгеновский спектр. Если энергия электронов достаточно велика, то они могут выбить электроны внутренних слоев атомов антикатада, и тогда эти атомы будут испускать рентгеновское излучение, характерное для вещества антикатада,— так называемое *характеристическое рентгеновское излучение*. Получается

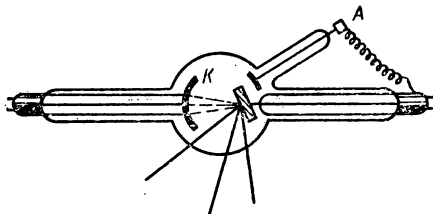


Рис. 145.

целый характеристический спектр, состоящий из отдельных спектральных линий. Таким образом, на фоне сплошного рентгеновского спектра всегда имеются отдельные линии характеристического спектра.

Рентгеновские лучи невидимы для глаза, но они действуют на фотопластинку, заставляют флуоресцировать некоторые вещества. Все рентгеновское излучение называют жестким, так как оно проникает через многие вещества. Степень жесткости зависит от длины

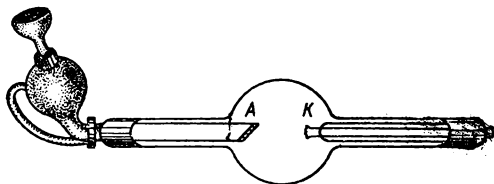


Рис. 146.

волны (рентгеновское излучение занимает в шкале электромагнитных волн диапазон от 80 до 10^{-5} нм). Наименее жестки лучи, имеющие длину волны в области 80—3 нм, поэтому их называют мягкими рентгеновскими лучами. Жесткостью рентгеновского излучения пользуются на практике. В медицине рентгеновские лучи применяют для просвечивания человеческого тела и с лечебной целью, в технике — для обнаружения различных дефектов внутри металлических частей машин и т. д.

§ 128. Интерференция света

Из повседневного опыта известно, что чем больше лампочек включено в комнате, тем больше освещенность предметов, находящихся в ней. Однако оказывается, что при встрече двух световых потоков, исходящих из одного источника и распространяющихся далее по одному направлению, происходит явление усиления или ослабления света. Такое взаимодействие двух лучей носит название

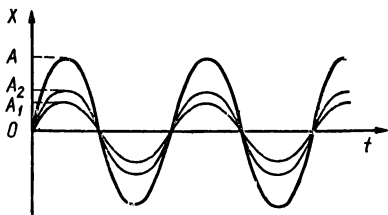


Рис. 147.

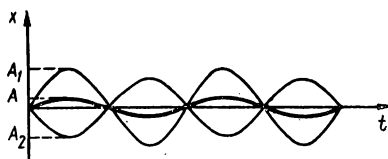


Рис. 148.

интерференции света. Усиление и ослабление света происходит вследствие того, что световые волны (аналогично колебаниям, распространяющимся на поверхности воды от двух источников) могут встречаться так, что их фазы будут совпадать (рис. 147), или так, что фазы их будут противоположны (рис. 148; здесь A_1 и A_2 — амплитуды складываемых колебаний, A — результирующего колебания). Конечно, могут быть и промежуточные случаи.

Явление интерференции света (как и других волн) наблюдается лишь тогда, когда частоты у обоих лучей одинаковы и разность фаз во время взаимодействия света сохраняется, т. е. имеет все время одно и то же значение. В противном случае происходит простое сложение колебаний. Волны, имеющие разность фаз, называются *когерентными волнами*.

одинаковые частоты и постоянную

Рассмотрим случай интерференции волн на воде. Пусть в двух точках поверхности воды непрерывно создаются когерентные волны. Распространяясь по поверхности воды, эти волны в местах встреч накладываются одна на другую, и в зависимости от разности фаз, с которой приходят волны в рассматриваемую точку поверхности воды, они взаимно усиливаются или ослабляются. Если источниками волн создаются колебания в одинаковой фазе, то разность фаз возникает за счет разности расстояний до этой точки от источника колебаний. Величину, равную разности расстояний от рассматриваемой точки до источников волн, называют *геометрической разностью хода*.

Легко сообразить, что если источники излучают колебания в одинаковых фазах, то колебания приходят в некоторую точку пространства в одинаковых фазах тогда, когда разность хода волн равна целому числу длин волн (четному числу полуволн), и в противофазах, когда разность хода равна нечетному числу полуволн. Таким образом, при наличии когерентных источников колебаний в точках пространства, для которых выполняется условие $\Delta x = 2k \frac{\lambda}{2}$, колебания усиливаются, а в точках, для которых выполняется условие $\Delta x = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$, — ослабляются. Здесь Δx — разность хода волн, λ — длина волны, $k = 0, 1, 2, \dots$

Следует отметить, что если на поверхности воды мы можем получить когерентные волны от двух источников, то для разных источников света этого достичь нельзя, так как световые волны излучают атомы вещества (источники света) и фаза их колебаний быстро и беспорядочно изменяется. Поэтому для получения когерентных лучей света надо пользоваться одним источником (как сказано выше). Лучи должны пройти разные пути, затем встретиться и дальше идти по одному направлению. Этого можно достигнуть, используя систему зеркал, в которых лучи отразятся нужным образом.

Интерференцию света можно наблюдать, например, в тонких пленках. Плоский проволочный каркас с мыльной пленкой на нем ставят вертикально; получается водяной клин: сверху пленка будет тоньше, а внизу толще. Если направить на такую пленку пучок параллельных лучей монохроматического света (например, красного), то одна часть светового потока отразится от передней поверхности пленки, а другая часть — от задней. Таким образом, луч, упавший на пленку, в некоторой точке раздваивается, и появляются два практических параллельных луча, в которых волны обладают определенной разностью хода (величина последней обусловлена толщиной пленки и длиной световой волны). Попад в глаз, лучи сводятся хрусталиком в одну точку, вследствие чего и наблюдается интерференционная картина. Каждой точке поверхности пленки соответствует точка на сетчатке глаза. Участки пленки, имеющие одинаковую толщину, будут восприниматься окрашенными в красный цвет или темными, в зависимости от усиления или ослабления света светом. Так как толщина пленки постепенно сверху вниз увеличивается, то и разность хода волн возрастает, становясь в определенных местах поочередно равной то четному, то нечетному числу полуволн; в силу этого мы будем наблюдать на пленке красные и темные полосы. Жидкость из мыльной пленки постепенно вытекает, поэтому со временем толщина пленки становится иной, следовательно, меняются места расположения красных и темных полос. Окрашенные и темные полосы

вследствие уменьшения толщины пленки станут более широкими. Если мыльную пленку осветить белым светом, состоящим из набора световых волн различной длины, то световые полосы будут иметь разноцветную, радужную окраску, так как усиление и ослабление света произойдет в разных местах.

Когерентными источниками света могут быть два мнимых изображения источника в зеркалах, расположенных под углом, близким к 180° (зеркала Френеля). Мнимые источники света будут когерентными, и поэтому в местах пересечения пучков от них наблюдается явление интерференции света.

§ 129. Дифракция света

Дифракцией волн называется явление огибания волнами различных препятствий, встречающихся на их пути, т. е. отклонение волн от прямолинейного распространения. Явление дифракции хорошо наблюдается для звуковых волн. Всем известно, что звук слышен за зданием, даже если источник звука находится с противоположной стороны, впереди здания. Явление дифракции волн можно наблюдать также на поверхности воды, если на пути их поставить преграду, размеры которой соизмеримы с длиной создаваемых волн. Явление дифракции характерно для любых волновых процессов, естественно, также и для света.

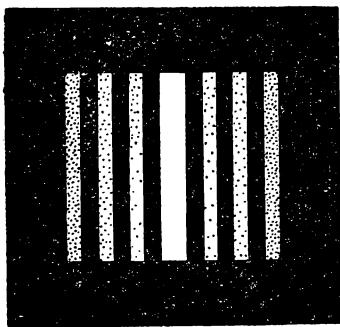


Рис. 149.

Чтобы наблюдать отчетливую картину дифракции света, необходимо создать специальные условия. Лучшее всего, если свет пропускают через узкую щель, причем ширина ее должна иметь порядок длины световой волны ($10^{-4} - 10^{-5}$ см); на экране, расположенном за щелью, мы видим не светлую полосу, имеющую форму щели, как этого можно было бы ожидать, а чередующиеся светлые и темные полосы, параллельные краям щели (рис. 149). В прямом направлении будет светлая полоса с наибольшей освещенностью.

Наблюдается явление дифракции от непрозрачных преград. Например, если на пути света расположить тонкую проволочку, то на экране получим не тень ее, а чередование светлых и темных полос.

Явления интерференции и дифракции света свидетельствуют о волновой природе света. Вообще, нужно сказать, что если мы наблюдаем явления интерференции и дифракции света, то имеют место волновые процессы, и наоборот, если мы имеем дело с волновыми процессами, то для них должны наблюдаться явления интерференции и дифракции света. Явления интерференции и дифракции света широко используются в технике, например для контроля за качеством плоской поверхности.

§ 130. Действие света. Фотоэлектрический эффект

Иногда металлическая пластинка при освещении приобретает положительный заряд вследствие выбивания из нее электронов. Явление вырывания электронов из тела под действием света называется *фотоэффектом*. Первые подробные исследования фотоэлектрического эффекта выполнил русский физик А. Г. Столетов.

В опыте Столетова свет падал через сетчатый анод *A* (рис. 150) на металлическую пластинку *K* (катод). Если пластинка *K* соединена с отрицательным полюсом батареи, то в цепи появляется ток. Сила фототока возрастает с увеличением напряжения между катодом и анодом. Начиная с некоторого напряжения, сила фототока достигает максимального значения, называемого *током насыщения*. Таким образом, ток насыщения называется ток,

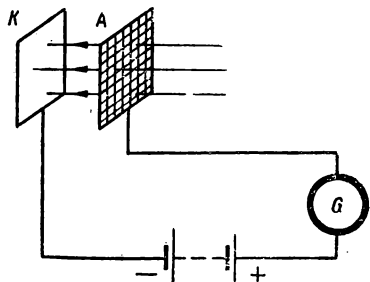


Рис. 150.

который не зависит от приложенного напряжения. Нужно отметить, что фототок наблюдается даже когда нет источника тока в цепи. Если металлическая пластинка соединена с положительным полюсом батареи, то, начиная с некоторого минимального напряжения, называемого задерживающим потенциалом, ток в цепи отсутствует. При тщательном изучении фотоэлектрического эффекта установлены следующие его закономерности.

1) Сила фототока (тока насыщения), возникающего при освещении монохроматическим светом (а следовательно, и число фотоэлектронов) пропорциональна интенсивности света, падающего на фотокатод.

2) Скорость фотоэлектронов возрастает с увеличением частоты света, падающего на фотокатод, и не зависит от интенсивности света.

3) Для каждого вещества существует свет вполне определенной максимальной длины волны, при которой еще происходит явление фотоэффекта. Граничная длина волны носит название *красной границы фотоэффекта* (название обусловлено тем, что это длинноволновая граница).

4) Фотоэлектрический эффект наступает мгновенно после включения света.

Такие свойства фотоэлектрического эффекта привели ученых к заключению, что свет представляет собой поток отдельных частиц; они были названы *квантами света*, или *фотонами*. Энергия фотона равна $h\nu$, где h — так называемая постоянная Планка: $h = 6,62 \times 10^{-34}$ дж · сек, а ν — частота света.

Частота ν связана с длиной волны следующим образом: $\nu = \frac{c}{\lambda}$, где c — скорость света.

Законы фотоэффекта могут быть объяснены на основе представлений о квантах света. Энергия падающего кванта монохроматического света $h\nu$, согласно закону сохранения энергии, расходуется на работу вырывания электрона из вещества A и на сообщение электрону кинетической энергии $\frac{mv^2}{2}$, где m — масса электрона, а v — его скорость, т. е.

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}.$$

Это уравнение называется *уравнением Эйнштейна для фотоэффекта*. Оно хорошо объясняет все законы фотоэффекта.

Действительно, за счет энергии кванта света вырывается лишь один электрон, поэтому с увеличением светового потока, падающего на металл, соответственно увеличивается число выбитых электронов, так как с увеличением светового потока возрастает число квантов света, падающих на металл.

Если энергия падающего кванта $h\nu$ меньше работы A , которую нужно затратить, чтобы вырвать электрон из вещества, то фотоэффект не будет наблюдаться. Пользуясь формулой Эйнштейна, можно найти наименьшую частоту ν , при которой еще возможен фотоэффект, а по частоте можно вычислить и красную границу фотоэффекта, так как λ связана с частотой ν соотношением $\lambda = \frac{c}{\nu}$, т. е. $h\nu_{\min} = A$;

$$\nu_{\min} = \frac{A}{h}, \text{ откуда}$$

$$\lambda_{\max} = \frac{c}{\nu_{\min}} = \frac{c}{A} h.$$

Из формулы Эйнштейна следует, что кинетическая энергия вырванного светом электрона, а следовательно, и его скорость зависят лишь от частоты света. Обычно работу выхода выражают в электрон-вольтах ($1 \text{ эв} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$).

Рассмотренный нами фотоэффект называется *внешним*. Наряду с внешним фотоэффектом существует так называемый *внутренний* фотоэффект, при котором освободившийся электрон остается в пределах вещества. Ряд полупроводников благодаря внутреннему фотоэффекту увеличивает свою электропроводность. Тела, увеличивающие электропроводность при воздействии на них света, называются *фотопроводниками*, или *фотосопротивлениями*. К фотопроводникам, в частности, относятся селен, цинковая обманка и др.

Задача 1. Сколько квантов излучения падает за $t = 15 \text{ сек}$ на поверхность площадью $S = 10 \text{ см}^2$, если она облучается потоком гамма-лучей с длиной волны $\lambda = 10^{-12} \text{ см}$, мощность которого на 1 см^2 составляет $N = 0,002 \text{ Вт}$?

Решение. Количество квантов излучения равно отношению энергии излучения, падающего на поверхность тела, к энергии одного кванта излучения, т. е. $n = \frac{W}{\epsilon}$. Энергия излучения, падающего на поверхность тела, равна $W = NSt$. Энергия кванта излучения $\epsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$. Следовательно,

$$n = \frac{NSt\lambda}{hc}; \quad n = 1,5 \cdot 10^{10}.$$

Ответ. На поверхность падает $1,5 \cdot 10^{10}$ квантов.

Задача 2. Определить красную границу фотоэффекта для калия, если работа выхода электрона из калия $A = 2,2 \text{ эв}$.

Решение. Для красной границы фотоэффекта уравнение Эйнштейна имеет вид: $h\nu_0 = A$. Выразив ν_0 через λ_0 , получим $A = \frac{hc}{\lambda_0}$; отсюда

$$\lambda_0 = \frac{hc}{A}; \quad \lambda_0 = 5,6 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 560 \text{ нм}.$$

Ответ. Красная граница фотоэффекта соответствует длине волны 560 нм .

Задача 3. Какую наименьшую разность потенциалов нужно приложить между катодом и анодом (рис. 150), чтобы полностью затормозить фотоэлектроны, вылетающие из катода при освещении его лучами с длиной волны $\lambda = 200 \text{ нм}$, если работа выхода $A = 4 \text{ эв}$?

Решение. Чтобы фотоэлектроны не достигали анода, нужно между катодом и анодом приложить разность потенциалов, при ко-

торой работа, совершаемая во время перемещения фотоэлектронов от катода к аноду против электрических сил, была бы равна кинетической энергии, приобретаемой электронами при вылетании их из катода, т. е. $eU = \frac{mv^2}{2}$, где e — заряд электрона, U — разность потенциалов между анодом и катодом, $\frac{mv^2}{2}$ — кинетическая энергия электрона. При этом потенциал анода должен быть отрицательным, так как электрон имеет отрицательный заряд. Отсюда находим $U = \frac{mv^2}{2e}$.

Кинетическая энергия электрона определяется из уравнения Эйнштейна, т. е. $\frac{mv^2}{2} = h\frac{c}{\lambda} - A$. Следовательно,

$$U = \frac{h\frac{c}{\lambda} - A}{e}; \quad U = 2,2 \text{ в.}$$

О т в е т. Наименьшая разность потенциалов равна 2,2 в.

§ 131. Фотоэлементы и их применение

Приборы, преобразующие световую энергию в электрическую, называются *фотоэлементами*. Простейшим фотоэлементом является вакуумный. Он состоит из стеклянного баллона (рис. 151), из которого выкачан воздух. Одна сторона этого баллона с внутренней стороны покрыта металлом (обычно это калий, цезий или сплав сурьмы и цезия). Этот слой через электрод K соединяется с отрицательным полюсом батареи. Анодом A является металлическая петелька или сетка.

Если на слой металла свет не падает, то тока в электрической цепи, в которую включен фотоэлемент, не будет. Если же на слой металла падает свет, то он вырывает из него электроны и они летят к аноду; тогда в электрической цепи проходит ток.

Фотоэлементы находят самое разнообразное применение. Укажем только на два случая.

В фотореле (рис. 152) фотоэлемент Φ включен так, что при прохождении тока через сопротивление R на сетке лампы L возникает отрицательный потенциал и ток в анодной цепи лампы прерывается, так как электроны нити накала отбрасываются обратно к нити. В анодную цепь лампы включен электромагнит M . Когда ток прекращается, пружина N отскакивает от якоря магнита. Если свет

не падает на фотоэлемент, то отрицательного потенциала на сетке лампы нет и в анодной цепи лампы ток идет, пружина N притягивается к якорю магнита. Пружина соединяется с каким-либо механизмом. Таким образом, при наличии света фотореле срабатывает, а при отсутствии света пружина притянута к магниту.

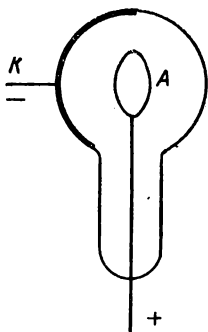


Рис. 151.

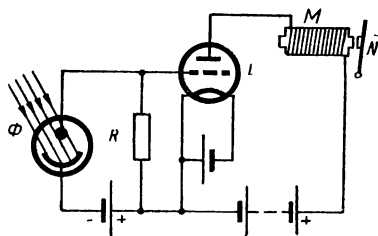


Рис. 152.

Воспроизведение звука при наличии ленты с так называемой звуковой дорожкой (рис. 153, *а*) происходит с помощью фотоэлемента.

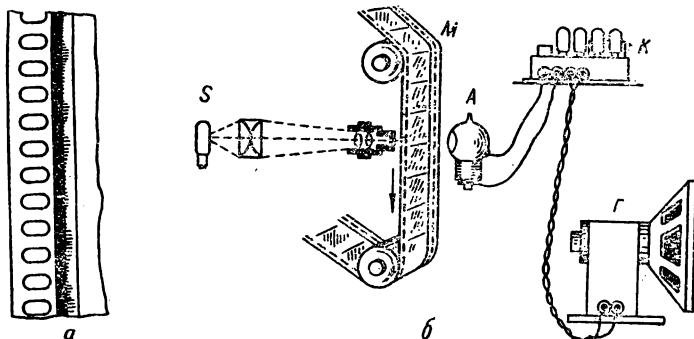


Рис. 153.

Лента M с темными и светлыми полосами пропускается на роликах. По одну сторону ленты помещается источник света S (рис. 153, *б*) с фокусирующей системой. По другую сторону ленты расположен

фотоэлемент *А*, соединенный с усилителем *К*, а дальше с громкоговорителем *Г*. На звуковую дорожку от источника света падает постоянный световой поток, но вследствие того, что звуковая дорожка состоит из ряда поперечных непрозрачных штрихов различной длины, величина светового потока, падающего на фотоэлемент, меняется в соответствии с изменениями светового потока, который падал раньше на пленку при записи звука. Фотоэлемент превращает колебания светового потока в колебания электрического тока, которые (после усиления) громкоговорителем превращаются в механические колебания, т. е. в звук.

§ 132. Люминесценция

Люминесценция — это свечение веществ, которое не обусловлено сообщением тепла. Люминесцентное свечение обуславливается превращением разнообразных видов энергии, кроме тепловой, в световую энергию. Оно возникает, например, при облучении некоторых веществ ультрафиолетовыми, рентгеновскими, гамма-лучами. Так, ряд органических красителей после облучения их ультрафиолетовыми лучами дает яркое свечение разных цветов. Люминесцентное свечение дают многие живые организмы: бактерии, рыбы, грибы, насекомые; это так называемая *биолюминесценция*.

Люминесцентное свечение подразделяют на два вида — флуоресцентное и фосфоресцентное. Первое очень быстро исчезает после того, как прекращается освещение тела посторонним источником, второе, напротив, продолжается в течение длительного времени. Вещества, способные фосфоресцировать, называют фосфорами. В настоящее время фосфоры получили широкое техническое применение.

Люминесцирующие вещества применяются в светотехнике (в частности, в лампах дневного света), для изготовления экранов телевизоров, осциллографов, светящихся шкал приборов, циферблатов и т. д.

Явление люминесценции наблюдается как в твердых телах, так и в жидких и в газообразных. Спектральный состав люминесцентного излучения для каждого вещества различен. Обычно свет, излучаемый при люминесценции, имеет длину волны большую, чем свет, вызвавший люминесценцию. Это используется, в частности, в лампах дневного света. Вследствие разряда в разреженных газах (или парах ртути) в этих лампах возникает ультрафиолетовое излучение, которое поглощается люминесцентными веществами, находящимися на внутренней части баллона лампы, и вызывает излучение, близкое к дневному свету. Таким образом, лампа дневного света действует подобно трансформатору — превращает излучение коротких волн (ультрафиолетовое излучение) в излучение более длинных волн (видимое излучение).

По характеру свечения вещества при люминесценции можно установить, какое это вещество, и даже указать, каково его процентное содержание. Люминесцентный анализ может быть проведен, например, на капле раствора, при этом можно обнаружить примеси порядка 10^{-11} г в 1 г исследуемого вещества. В частности, люминесцентный анализ применяют в криминалистической практике: обнаруживают следы крови, проявляют написанное невидимыми чернилами и т. д. Люминесцентный анализ применяется в различных отраслях промышленности: горной, пищевой, текстильной и т. д.

Контрольные вопросы к главе «Физическая оптика»

- 1) Что называется дисперсией света? спектром?
- 2) Какие лучи называются монохроматическими?
- 3) Что называется дисперсионной кривой и каков ее вид?
- 4) Какие существуют типы спектров излучения?
- 5) Какие вещества дают сплошной спектр?
- 6) Какие вещества дают линейчатый спектр, а какие — полосатый?
- 7) Как обнаруживается ультрафиолетовое излучение?
- 8) Что такое фраунгоферовы линии?
- 9) Что называется спектральным анализом?
- 10) Какой спектр называется спектром поглощения?
- 11) Каков спектр света, идущего от Луны?
- 12) В чем состоит различие между корпускулярной и волновой теориями света?
- 13) Какие опытные факты говорят в пользу волновой теории света?
- 14) Что называется интерференцией света? дифракцией света?
- 15) Какие лучи называются когерентными?
- 16) Могут ли две электрические лампочки, включенные в осветительную сеть, дать устойчивую картину интерференции?
- 17) При каком условии волны, накладываясь, дают усиление света? ослабление света?
- 18) Что такое фотоэффект и кто установил его законы?
- 19) Что называется квантом света?
- 20) Чему равна энергия кванта?
- 21) Что называется красной, или длинноволновой, границей фотоэффекта?
- 22) От чего зависит скорость вырываемых светом электронов?
- 23) От чего зависит количество вырываемых светом электронов?
- 24) Напишите и объясните формулу Эйнштейна для фотоэффекта.
- 25) Что такое фотоэлемент и какие типы фотоэлементов вам известны?
- 26) Что такое люминесценция?

Вопросы и задачи к главе «Физическая оптика»

289. Показатель преломления стекла для крайних красных лучей спектра $n = 1,51$, а для крайних фиолетовых $n_1 = 1,53$. Определить, на сколько больше в стекле скорость распространения красных лучей, чем фиолетовых.

290. Длина волны желтых лучей натрия в вакууме $\lambda = 590 \text{ нм}$, а в воде $\lambda_1 = 442 \text{ нм}$. Каков показатель преломления воды для этих лучей?

291. На белой бумаге написано красным карандашом «отлично» и зеленым «хорошо». Имеется два стекла — зеленое и красное. Через какое стекло надо смотреть на бумагу, чтобы увидеть надпись «отлично»?

292. Наблюдатель рассматривает горизонтально расположенную узкую двухцветную бумажную полоску (левая половина красная, правая — синяя) через трехгранную призму, расположив ее ребра параллельно полоске, а основание вниз. Как для наблюдателя расположатся половинки полоски?

293. Можно ли определить химический состав вещества по его сплошному спектру?

294. Две световые волны, налагаясь одна на другую в определенном участке пространства, взаимно гасятся. Означает ли это, что световая энергия превращается в другие формы?

295. Длинноволновая граница фотоэффекта для лития $\lambda_0 = 537 \text{ нм}$. Определить работу выхода электронов из лития.

296. Работа выхода электронов из цинка $A = 6,4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$. При какой наибольшей длине волны свет выбивает электроны из цинка?

297. Какой должна быть длина волны ультрафиолетовых лучей, падающих на поверхность цинка, чтобы скорость вылетающих фотоэлектронов составляла 1000 км/сек ? Работа выхода электронов из цинка $A = 6,4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

298. При освещении металла монохроматическим светом длиной волны $\lambda = 400 \text{ нм}$ фотоэлектроны приобрели наибольшую скорость $v = 8,2 \cdot 10^5 \text{ м/сек}$, а при освещении этого же металла монохроматическим светом длиной волны $\lambda_1 = 600 \text{ нм}$ наибольшая скорость оказалась равной $v_1 = 5,5 \cdot 10^5 \text{ м/сек}$. По этим данным определить значение постоянной Планка.

299. Поверхность некоторого металла освещается светом с длиной волны $\lambda = 350 \text{ нм}$. Подбором определенной задерживающей разности потенциалов запирают фототок. При изменении длины волны света на $\Delta\lambda = 50 \text{ нм}$ задерживающую разность потенциалов пришлось увеличить на $\Delta U = 0,59 \text{ в}$, чтобы фототок опять полностью прекратился. Считая постоянную Планка и скорость света известной, определить заряд электрона.

Глава XXI. СТРОЕНИЕ АТОМА И АТОМНОГО ЯДРА

§ 133. Радиоактивность

Любое тело состоит из молекул, а они в свою очередь — из атомов. Молекулы бывают одноатомные и многоатомные. Таким образом, атомы представляют собой частицы, из которых построены все тела. До конца XIX в. считали, что атом неделим, что он есть элементарная частица (само слово «атом» на греческом языке означает «неделимый»). В конце XIX в. открыли ряд явлений, которые нельзя было объяснить исходя из представления о неделимости атома. Так, в частности, был открыт электрон, что доказало сложное строение атома. В этом же убеждали такие явления, как ионизация, фотоэффект и др.

В начале XX в. появились первые модели атома. Ныне существующая планетарная модель атома была создана в 1913 г. английским ученым Э. Резерфордом. Согласно этой модели атом представляет собой сложную систему, состоящую из положительно заряженного ядра, вокруг которого вращаются электроны, обладающие отрицательным зарядом.

В пользу сложного строения атома свидетельствовала и радиоактивность. Французский физик А. Беккерель обнаружил, что соли урана испускают лучи, которые действуют на фоточувствительную пластинку, причем даже тогда, когда пластинка находится в кассете.

По воздействию магнитного поля на излучение радия было установлено, что это излучение является сложным (рис. 154): две части отклоняются в магнитном поле в разные стороны, а третья совсем не отклоняется. Самый факт описанного воздействия свидетельствует о том, что составляющие излучения, отклоняющиеся в магнитном поле, представляют собой потоки заряженных частиц, а та составляющая, которая не отклоняется, представляет собой излучение, подобное рентгеновскому, но с очень малой длиной волны. Эти три части излучения радия были названы α -, β - и γ -лучами. α - и β -лучи отклоняются в магнитном поле, γ -лучи не отклоняются.

Оказалось, что β -лучи отклоняются в магнитном поле в ту же сторону, что и отрицательно заряженные частицы. Определив массу и величину заряда β -частиц, ученые выяснили, что β -лучи представ-

ляют собой поток быстрых электронов. α -лучи отклоняются в ту же сторону, что и положительно заряженные частицы. По измерению массы и заряда было установлено, что α -лучи — это поток ядер гелия (почему ядра гелия часто называют α -частицами).

Так как α - и β -частицы вылетают из атома, то атом — тело не простое, а обладающее определенной структурой. Атом состоит из положительно заряженного ядра, вокруг которого вращаются электроны. Само ядро также представляет собой сложную систему; оно

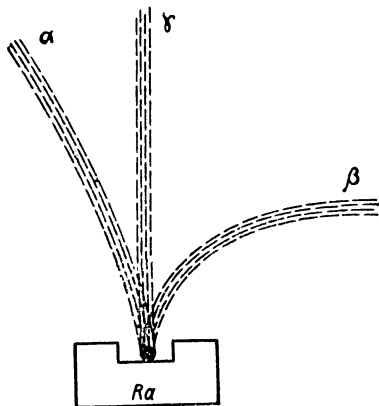


Рис. 154.

состоит из протонов и нейтронов. Масса ядра не равна сумме масс протонов и нейтронов. При радиоактивном излучении происходит распад атомного ядра, т. е. α - и β -частицы испускаются атомом при распаде ядра.

Каждый элемент характеризуется его порядковым номером Z в таблице Менделеева и так называемым массовым числом M . Массовым числом называется целое число, ближайшее к значению атомного веса элемента. Между порядковым номером элемента Z , массовым числом M и числом нейтронов в ядре N существует простая связь: $M = N + Z$.

В ходе дальнейшего исследования радиоактивности веществ было установлено, что

при излучении α -частиц ядром атома порядковый номер элемента уменьшается на две единицы, т. е. в результате α -распада получается новый элемент, обладающий химическими свойствами, соответствующими элементу, который стоит в таблице Менделеева на два номера раньше. Массовое число при этом уменьшается на четыре единицы. При излучении β -частицы порядковый номер элемента увеличивается на единицу, а масса элемента не изменяется. При излучении же γ -лучей номер элемента и его масса не изменяются. Приведенная выше закономерность называется *законом радиоактивного смещения* (закон Содди—Фаянса).

§ 134. Способы наблюдения заряженных быстро движущихся частиц

Заряженные частицы, вылетающие из ядра атома, всегда движутся с большими скоростями. Кроме того, имеются частицы, попадающие на поверхность Земли из космического пространства, которые также движутся с огромными скоростями.

Для изучения свойств заряженных частиц их нужно уметь наблюдать. Существуют различные методы и приборы для регистрации заряженных частиц.

1. *Метод сцинтилляций* (мерцаний). Этот метод очень прост. Берется трубка с флуоресцирующим экраном \mathcal{E} и лупой \mathcal{L} (рис. 155)—так называемый *спинтарископ*. Перед экраном помещается радиоактивный препарат P , например маленький кусочек какой-либо соли радиоактивного элемента. Частицы, вылетающие из этого препарата, ударяются об экран и заставляют его светиться в месте удара. Вследствие этого на экране возникает светящаяся вспышка, которую и наблюдают через лупу.

2. *Счетчик Гейгера* состоит из металлической трубки C , в которую через изолирующую пробку B введена игла A (рис. 156). Счетчик включают в цепь, состоящую из иглы A , сопротивления R и батареи B . Один из полюсов батареи соединен через сопротивление R с иглой A , другой — с трубкой C . Когда в счетчике нет заряженных частиц, то нет в нем и разряда и вся разность потенциалов V ,

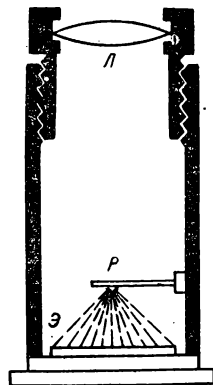


Рис. 155.

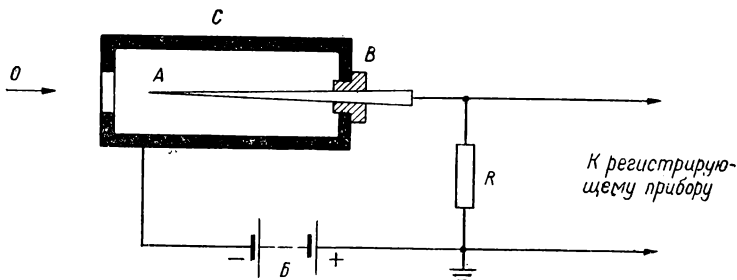


Рис. 156.

создаваемая батареей B , приложена между иглой и стенкой трубки. Если обозначить через E э. д. с. батареи B , то в этом случае, очевидно, $U = E$. Когда в счетчик через окошко O попадет заряженная частица, то она вызовет разряд и в цепи пойдет ток I . Теперь уже соотношение между U и E изменится, а именно:

$$E = U + IR,$$

где IR — падение напряжения на сопротивлении R . Таким образом, разность потенциалов между иглой и стенкой счетчика будет равна

$$U = E - IR.$$

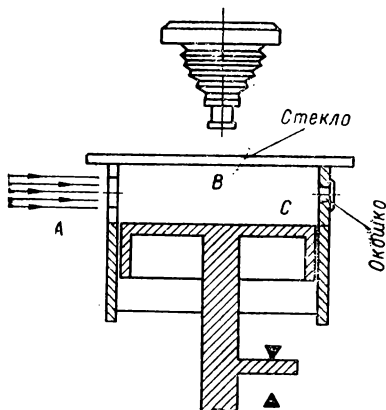


Рис. 157.

Когда ток станет достаточно большим, U будет мало и разряд прекратится. Таким образом, попавшая в счетчик частица вызовет в нем разряд, который быстро прекратится; регистрирующий прибор, соединенный со счетчиком, отметит этот разряд, а следовательно, и прохождение частицы.

3. *Камера Вильсона* представляет собой цилиндрический сосуд, заполненный насыщенным паром какой-либо жидкости (обычно смеси воды и спирта). Вследствие быстрого расширения объема, занимаемого паром, он охлаждается и переходит из насыщенного в пересыщенное состояние. При этом нужна строго определенная величина расшире-

ния, т. е. величина отношения $\frac{V_2}{V_1}$, где V_1 — начальный объем, V_2 — конечный объем. Она зависит от концентрации смеси вода—спирт. Для чистого этилового спирта это отношение равно 1,18, для водяных паров — 1,22.

Если в объем, занимаемый пересыщенным паром, влетает заряженная частица, то она на своем пути создает ионы, а вокруг них образуются капельки жидкости (из пересыщенного пара), и таким образом будет виден путь частицы. При этом камера освещается мощным источником света.

Простейшая камера Вильсона изображена на рис. 157. В объеме B создается насыщенный пар жидкости (если поверхность C влажная,

то пространство будет насыщено паром). Расширение объема B достигается быстрым опусканием поршня C . Частицы, обладая большой энергией, легко проникают через стенки камеры A .

Рассмотренные приборы (счетчик Гейгера, камера Вильсона) служат для обнаружения и регистрации быстро движущихся заряженных частиц. Если камеру Вильсона поместить в магнитное поле, что впервые сделал советский физик Д. Скобельцын, то частицы, пролетающие в ней, будут двигаться по круговым траекториям. Зная индукцию магнитного поля и отношение $\frac{e}{m}$, можно, измерив радиус круговой траектории частицы, вычислить ее скорость. Для этого пользуются следующим соотношением:

$$\frac{mv^2}{R} = Bve,$$

где m — масса частицы; v — ее скорость; e — заряд; R — радиус кривизны траектории частицы; B — магнитная индукция. В правой части этого равенства дана формула силы, с которой магнитное поле действует на движущийся в нем заряд. Эта сила и вынуждает частицу двигаться по окружности, т. е. она является центростремительной силой, выражение которой дано в левой части равенства.

§ 135. Строение атома

Э. Резерфорд проводил опыты по рассеянию α -частиц различными атомами. Измеряя углы рассеяния α -частиц, он смог установить, что α -частица подходит к рассеивающему центру на расстояние порядка 10^{-13} см, а так как α -частица имеет положительный заряд, то, следовательно, и рассеивающий центр имеет положительный заряд. Так было доказано, что в атоме имеется положительно заряженное ядро, размер которого порядка 10^{-13} см. Так как атом нейтрален, то в его состав должны входить электроны, компенсирующие своим отрицательным зарядом положительный заряд ядра. Электроны вращаются вокруг ядра. Размер атома определяется размером орбит электронов. Он, как известно, равен 10^{-8} см. Таким образом, орбиты электронов отстоят от ядра на расстояние, превышающее размер ядра в 10^5 раз, т. е. в 100 000 раз.

В атоме электрон не может вращаться по любой орбите. Существует вполне определенное условие для скорости электрона и размера орбиты, по которой он вращается:

$$mvR = n \frac{h}{2\pi}.$$

т. е. электрон может вращаться вокруг ядра только по орбите такого радиуса R , для которого произведение количества движения на радиус равно целому кратному величины $\frac{h}{2\pi}$, где число n — показатель кратности (оно называется *квантовым числом*). Таким образом, все орбиты электронов в атоме, как говорят, квантуются.

Вращаясь по одной из разрешенных орбит, электрон не излучает и не поглощает энергию, а так как он вращается вокруг ядра с постоянной скоростью, то обладает постоянной кинетической энергией. Находясь все время на одинаковом расстоянии от ядра, электрон обладает и постоянным значением потенциальной энергии, т. е. у него за все время движения по орбите сохраняется постоянное значение полной энергии. Отсюда вытекает следующее: поскольку в атоме разрешены только вполне определенные орбиты, а вращаясь по этим орбитам, электрон обладает определенными постоянными значениями энергии, то, следовательно, в атоме существует ряд определенных уровней энергии. Эти значения энергии обозначают через E_1 , E_2 и т. д. Если электрон переходит с одной орбиты на другую, то при этом его энергия изменяется скачкообразно и испускается (или поглощается) один квант энергии, равный величине $h\nu$. Этот квант энергии связан со значениями энергии тех уровней, между которыми происходит переход, следующим соотношением:

$$h\nu = E_2 - E_1.$$

Квант энергии поглощается тогда, когда электрон переходит на более отдаленную орбиту. Если же электрон переходит с дальней орбиты на ближнюю, происходит излучение кванта энергии. Это соотношение для кванта энергии названо *условием частот Бора* в честь датского ученого Н. Бора — основоположника квантовой теории атома.

Все сказанное выше Бор сформулировал в виде трех постулатов:

1. В атоме существуют устойчивые электронные орбиты. Вращаясь по этим орбитам, электрон не излучает энергии.

2. Возможными орбитами являются только такие, для которых выполняется условие:

$$m\nu k = n \frac{h}{2\pi}.$$

3. При переходе с одной орбиты на другую электрон излучает один квант энергии согласно условию:

$$h\nu = E_2 - E_1.$$

Простейшей системой является атом водорода. Все остальные атомы характеризуются более сложной структурой. У них ядро имеет заряд, измеряемый многими положительными единицами. Последний элемент, который был недавно открыт, имеет заряд ядра, равный 104

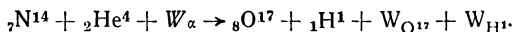
(он назван *курчатовием* в честь советского ученого И. В. Курчатова). Вокруг сложного ядра вращаются электроны, которые в атоме группируются слоями, так что имеется первый слой, второй и т. д. Приближенно можно говорить о числе электронов, вращающихся по первой орбите, по второй и т. д. Общее число электронов в атоме равно заряду ядра, который численно равен порядковому номеру элемента в таблице Менделеева, поэтому и число электронов в атоме равно этому номеру. Таким образом, по мере возрастания номера элемента в периодической таблице возрастает число электронов в атоме и будет заполняться последовательно один слой за другим. Максимальное число электронов в первом слое равно 2, во втором 8, в третьем 18 и т. д. Общая формула для максимального числа электронов в слое $2n^2$, где n — номер слоя. В соответствии с этим в периодической системе элементов Менделеева в первом ряду два элемента (водород и гелий), во втором — восемь элементов (от лития до неона). Отступления от этого закона, начиная с третьего ряда, объясняются в квантовой теории атома.

§ 136. Ядро атома

Ядро атома, так же как и сам атом, обладает определенной структурой. Оно состоит из протонов и нейтронов. Как мы уже знаем, *протон* — это ядро атома водорода — элементарная частица, обладающая единичным положительным зарядом. *Нейтрон* — это также элементарная частица, масса его приближенно равна массе протона, но заряда эта частица не имеет, т. е. нейтрон — нейтральная частица. Существует общее название для протонов и нейтронов — *нуклоны*, т. е. ядерные частицы. Так как протоны — положительно заряженные частицы, а нейтроны — нейтральные, то они не могут удерживаться в ядре обычными кулоновскими силами. Протоны и нейтроны удерживаются в ядре особого рода силами — *ядерными силами*. И хотя природа ядерных сил еще не выяснена, сам механизм взаимодействия нуклонов представляется следующим образом: протоны и нейтроны испускают и поглощают так называемые π -мезоны. Эти частицы имеют массу, превышающую массу электрона в 273,2 раза. Существуют как положительные π -мезоны, так и отрицательные и нейтральные (нейтральный π -мезон имеет массу в 264 раза превышающую массу электрона). Когда протон испускает π^+ -мезон, он превращается в нейтрон, а нейтрон, поглотив π^+ -мезон, превращается в протон. Испустив π^- -мезон, нейтрон превращается в протон, а протон, поглотив π^- -мезон, — в нейтрон.

Обмен π -мезонами обуславливает существование ядерных сил. π -мезоны осуществляют взаимодействие протонов и нейтронов между собой. Такие силы носят название *обменных сил*.

Общее число протонов и нейтронов в ядре называется *массовым числом*. Так, в составе ядра урана с массовым числом $M=235$ общее число нейтронов и протонов составляет 235. А так как заряд ядра урана равен 92, то, следовательно, протонов в ядре 92, а нейтронов $N = M - Z = 143$. Теперь сравним атомный вес урана с суммарным весом протонов и нейтронов. Атомный вес выражается в единицах, равных $1/12$ атомного веса углерода. В этих единицах атомный вес урана с массовым числом 235 равен также 235, а вес протона равен 1,0081, нейтрона — 1,0089. Поскольку в ядре урана находится 92 протона, то их вес будет $1,0081 \cdot 92 = 92,7452$, вес нейтронов $1,0089 \times 143 = 144,2727$ и атомный вес урана должен быть $92,7452 + 144,2727 = 237,0179$. Однако атомный вес ядра урана, содержащего 92 протона и 143 нейтрона, равен 235. Разность $237,0179 - 235 = 2,0179$ называется *дефектом массы ядра*. Он возникает вследствие того, что при образовании сложного ядра происходит очень плотная упаковка нуклонов. Что это действительно так, можно видеть на примере преобразования ядра атома азота при бомбардировке его α -частицей. Запишем такое соотношение:

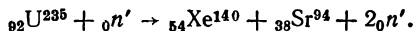


Здесь значком ${}_7\text{N}^{14}$ обозначено ядро атома азота, у которого массовое число $M = 14$, а заряд $Z = 7$. Соответствующие обозначения используются и для α -частицы (ядро атома гелия), изотопа кислорода и протона (ядра атома водорода). W_α , $W_{\text{O}^{17}}$, W_{H^1} — это обозначение кинетической энергии соответственно α -частицы и ядер кислорода и водорода (протона). Приведенное выражение представляет собой запись ядерной реакции превращения азота в кислород при бомбардировке азота α -частицами. Опыт показывает, что $W_\alpha > W_{\text{O}^{17}} + W_{\text{H}^1}$, т. е. кинетическая энергия частиц, являющихся продуктом ядерной реакции, оказалась меньше, чем кинетическая энергия α -частицы. Это произошло вследствие того, что масса образовавшихся продуктов превышает массу исходных элементов. Действительно, если подсчитать сумму масс азота и α -частицы, с одной стороны, и сумму масс кислорода и протона, с другой, то окажется, что $(A_{\text{O}^{17}} + A_{\text{H}^1}) < (A_{\text{N}^{14}} + A_{\text{He}^4})$, т. е. масса частиц, являющихся продуктом ядерной реакции, больше, чем масса исходных частиц.

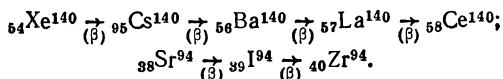
§ 137. Деление ядер урана

Мы уже рассмотрели ядерную реакцию превращения ядра атома азота (при бомбардировке его α -частицей) в ядро атома кислорода с вылетом протона. Совершенно другой тип ядерных реакций про-

исходит при бомбардировке атомов нейтронами: здесь наряду с реакциями с вылетом протонов могут происходить еще два вида ядерных реакций: реакции с захватом нейтронов и реакции, приводящие к преобразованию ядра с вылетом нейтронов. Ядро урана (^{235}U) содержит 92 протона и 143 нейтрона. Такая система устойчива на пределе, и с определенной вероятностью происходит самопроизвольный распад ядер урана. Однако особый интерес представляет собой ядерная реакция расщепления ядра урана при захвате им нейтрона. Когда в ядро урана влетает нейтрон, устойчивость ядра нарушается и оно раскалывается на две части, разлетающиеся с огромными скоростями; при этом вылетает еще два-три нейтрона:



Образующиеся ксенон и стронций претерпевают многократные β -распады, в результате которых получаются элементы церий и цирконий. Реакции записываются так:



Сумма масс атомов церия, циркония и двух нейтронов равна $140,13 + 91,22 + 2 = 233,35$, т. е. меньше, чем сумма масс атома урана (^{235}U) и нейтрона (^{236}U). Таким образом, одновременно с уменьшением массы урана при реакции деления ядра возрастает кинетическая энергия осколков. Поэтому осколки и разлетаются с огромными скоростями. Расщепление ядра урана на ксенон и стронций не является единственным возможным. Ядро урана может расщепляться и на другие осколки. Однако всегда имеется более тяжелый осколок и более легкий.

Существенным является вылет при реакции расщепления двух нейтронов: этот факт обуславливает возникновение *цепной реакции*, т. е. лавинное нарастание расщепившихся атомов урана. Действительно, первичный нейтрон вызывает расщепление одного ядра урана, при этом вылетает два-три нейтрона, они вызывают расщепление последующих двух ядер урана, затем расщепляются уже четыре ядра и т. д., т. е. число распавшихся ядер урана будет лавинным образом нарастать (рис. 158). Так как при каждом распаде ядра выделяется энергия, то в результате быстрого распада огромного количества ядер урана произойдет взрыв; однако произойдет это лишь в том случае, если образующиеся при расщеплении ядер нейтроны не будут вылетать за пределы объема самого урана. Поэтому должен существовать такой минимальный объем урана (а следовательно, и такое минимальное весовое количество урана), когда цепная реакция возможна. Такой минимальный объем называется *критическим*.

Для того чтобы цепная реакция была управляемой, нужно часть вылетающих нейтронов при делении ядер урана поглощать, что осуществляется в так называемых *атомных реакторах*.

Атомные реакторы используются для разнообразных научно-исследовательских целей, а также как источники энергии на атомных электростанциях. Первая атомная электростанция была введена в эксплуатацию в Советском Союзе в 1954 г. в г. Обнинске, мощность ее — 5000 квт. В настоящее время в СССР работает ряд атомных электростанций. Из них наиболее мощная — Воронежская атомная электростанция. В Советском Союзе построен первый в мире атомный ледокол «Ленин».

В реакторах используется энергия, получаемая в результате расщепления ядер урана. Но поскольку уран дорог и запасы его на Земле не так уж велики, постольку поставлен вопрос об использовании энергии, получаемой в процессе синтеза ядер, т. е. получения сложных ядер из простых. При этом происходит, как мы уже знаем, сильное уплотнение вещества и выделяется большое количество энергии. В настоящее время в СССР и в ряде других стран ведутся работы по синтезу ядер гелия из водорода ${}_1^2\text{H}$ и ${}_1^3\text{H}$. Изотоп ${}_1^2\text{H}$, или дейтерий (D), обладает ядром, состоящим из одного протона и одного нейтрона (дейтон). Изотоп ${}_1^3\text{H}$ — тритий (T) имеет ядро (три-тон), состоящее из одного протона и двух нейтронов. Ядра изотопов должны сблизиться так, чтобы был возможен синтез ядра гелия, содержащего два протона и два нейтрона. Для сближения ядра должны обладать огромной кинетической энергией, и, следовательно, смесь изотопов ${}_1^2\text{H}$ и ${}_1^3\text{H}$ должна иметь высокую температуру (от 10 до 100 млн. град). При такой температуре газы полностью ионизируются и переходят в состояние плазмы. Реакция синтеза идет при очень высокой температуре и поэтому названа *термоядерной*. Изучение физических свойств плазмы ведется интенсивно, и в недалеком будущем человек сможет управлять термоядерными реакциями.

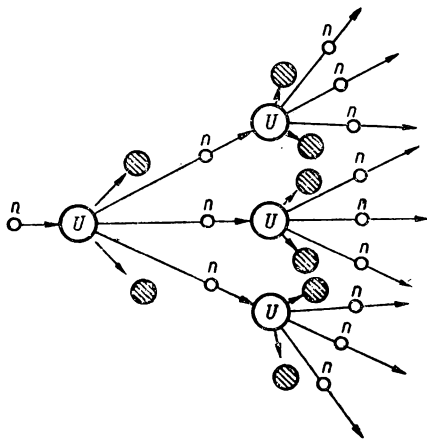


Рис. 158.

ты по синтезу ядер гелия из водорода ${}_1^2\text{H}$ и ${}_1^3\text{H}$. Изотоп ${}_1^2\text{H}$, или дейтерий (D), обладает ядром, состоящим из одного протона и одного нейтрона (дейтон). Изотоп ${}_1^3\text{H}$ — тритий (T) имеет ядро (три-тон), состоящее из одного протона и двух нейтронов. Ядра изотопов должны сблизиться так, чтобы был возможен синтез ядра гелия, содержащего два протона и два нейтрона. Для сближения ядра должны обладать огромной кинетической энергией, и, следовательно, смесь изотопов ${}_1^2\text{H}$ и ${}_1^3\text{H}$ должна иметь высокую температуру (от 10 до 100 млн. град). При такой температуре газы полностью ионизируются и переходят в состояние плазмы. Реакция синтеза идет при очень высокой температуре и поэтому названа *термоядерной*. Изучение физических свойств плазмы ведется интенсивно, и в недалеком будущем человек сможет управлять термоядерными реакциями.

Контрольные вопросы к главе «Строение атома и атомного ядра»

- 1) В чем заключается явление радиоактивности?
- 2) Какова природа радиоактивного излучения?
- 3) В чем состоит правило радиоактивного смещения?
- 4) Каково устройство и действие камеры Вильсона? счетчика Гейгера?
- 5) Каково строение атома и его ядра?
- 6) Что называется массовым числом?
- 7) Что такое дефект массы?
- 8) Какая ядерная реакция называется цепной?

Вопросы и задачи к главе «Строение атома и атомного ядра»

300. Какое количество энергии в киловатт-часах можно получить от деления 1 г урана ${}_{92}\text{U}^{235}$, если при каждом делении выделяется энергия, равная приблизительно 200 Мэв?

301. Как изменится атомный вес и номер элемента при выбрасывании из ядра протона? нейтрона?

302. Вследствие радиоактивного распада уран ${}_{92}\text{U}^{238}$ превращается в свинец ${}_{82}\text{Pb}^{206}$. Сколько α - и β -превращений он при этом испытывает?

303. Ядро бериллия ${}_{4}\text{Be}^9$, захватив дейтрон ${}_{1}\text{H}^2$, превращается в ядро атома бора ${}_{5}\text{B}^{10}$. Написать уравнение ядерной реакции и определить, какая частица при этом выбрасывается.

304. При облучении бора ${}_{5}\text{B}^{10}$ α -частицами образуется радиоактивный азот ${}_{7}\text{N}^{13}$, который распадается с испусканием позитрона. Написать уравнение ядерных реакций.

305. Радиоактивный азот ${}_{7}\text{N}^{13}$, распадаясь, превращается в изотоп углерода ${}_{6}\text{C}^{13}$. Напишите уравнение ядерной реакции. Какая частица при этом излучается?

ОТВЕТЫ И РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

2. Точки оси колеса.
3. Поступательно.
4. Пассажиры находятся в покое друг относительно друга; движутся же они относительно палубы парохода и предметов, находящихся на пароходе, а также относительно воды и берега.
5. 738 км/ч.
6. 3 ч 13 мин.
7. Скорость рыбака относительно воды постоянна. Рыбак догнал багор через час, а поэтому $v = \frac{s}{t} = 1$ м/сек.
8. Скорость одного поезда относительно другого $u = v_1 + v_2 = 36$ м/сек; $t_1 = \frac{s_1}{u} = 4,2$ сек; $t_2 = \frac{s_2}{u} = 2,8$ сек.
9. Грузоподъемность состава поезда mn , следовательно, требуется составов $N = \frac{M}{mn}$. Искомое время $t = \frac{T}{N} = \frac{Tmn}{M} = 30$ мин, где T — продолжительность года в минутах.
10. Пусть к некоторому пункту A дороги (рис. 159) человек прибежит, а автомобиль приедет туда же через t сек. Из рисунка

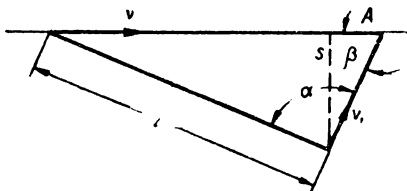


Рис. 159.

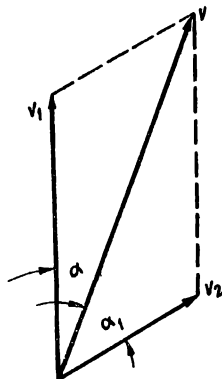


Рис. 160.

видно, что $\frac{\sin \alpha}{vt} = \frac{\sin \beta}{l}$, но $\sin \beta = \frac{s}{v_1 t}$, тогда $v_1 = \frac{vs}{l \sin \alpha}$. Наименьшая скорость, с которой должен бежать человек, чтобы встретиться с автомобилем, будет при $\sin \alpha = 1$, т. е. при $\alpha = 90^\circ$ она равна $v_1 = \frac{vs}{l}$; $v_1 = 2,5$ м/сек.

11. а) 2 сек; б) BC; в) 17 м/сек.

12. Скорость движения лодки по течению реки равна $\frac{s}{t_1} = v_1 + v_2$, против течения воды $\frac{s}{t_2} = v_2 - v_1$, где v_1 — скорость течения, а v_2 — скорость лодки относительно воды. Из этих двух равенств находим

$$v_1 = 0,5 \left(\frac{s}{t_1} - \frac{s}{t_2} \right).$$

Время движения круга $t = \frac{s}{v_1} = \frac{2t_1 t_2}{t_2 - t_1} = 48$ мин.

13. Равномерное; тело IV; точка пересечения графиков определяет момент времени, для которого тела находятся на одинаковом расстоянии от точки, принятой за начало координат; точка излома графика определяет момент времени, соответствующий изменению скорости тела.

14. Через 1 ч 52,5 мин; ≈ 150 км.

15. Скорость движения лодки (рис. 6) $v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$, где $v_2 = v - v' + v_1$; $v = 26$ км/ч. Направление движения лодки составляет с берегом угол $\alpha = \arctg \frac{v_2}{v_1} = 73^\circ$.

16. 76,5 м/сек; на северо-запад под углом $11^\circ 18'$ к меридиану.

17. Из рис. 7 видно, что составляющая скорости v_2 (скорость, сообщаемая двигателем катеру) будет наименьшей, если она перпендикулярна результирующей скорости ($v_2 \perp v$). Следовательно, $v_2 = v - \sqrt{v_1^2 - v^2}$, но так как $v = 0,5 v_1$, то $v_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} v_1$; $v_2 \approx 3,46$ м/сек.

18. Скорость лодки относительно берега можно определить по теореме косинусов (рис. 160):

$$v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + 2v_1 v_2 \cos \alpha}; \quad v = 7 \text{ км/ч.}$$

По теореме синусов имеем $\frac{\sin \alpha_1}{\sin (180^\circ - \alpha)} = \frac{v_1}{v}$, откуда $\sin \alpha_1 = 0,6186$, а $\alpha_1 = 38^\circ 13'$.

19. Средняя скорость движения автомобиля определяется по формуле $v = \frac{s}{t} = \frac{s}{t_1 + t_2}$, где s — путь, пройденный автомобилем, t_1 — время движения автомобиля со скоростью v_1 , оно равно $t_1 = \frac{s}{2v_1}$, а t_2 — время движения со скоростью v_2 , оно равно $t_2 = \frac{s}{2v_2}$. Подставляя значения времени t_1 и t_2 в равенство для средней скорости, получим $v = \frac{2v_1v_2}{v_1 + v_2}$; $v = 48$ км/ч.

20. Если s — протяженность всех подъемов, тогда $2s$ — путь велосипедиста за время движения t , а его средняя скорость $v = \frac{2s}{t}$, где $t = t_1 + t_2$; здесь t_1 — время прохождения подъема, а t_2 — время прохождения спуска. Следовательно, $t = \frac{s}{v_1} + \frac{s}{v_2}$. Формула средней скорости примет вид:

$$v = \frac{2v_1v_2}{v_1 + v_2}; \quad v = 8 \text{ км/ч.}$$

21. Путь равноускоренного движения с начальной скоростью состоит из двух частей: пути, пройденного телом при равномерном движении со скоростью v_0 , и пути, пройденного при равноускоренном движении без начальной скорости.

22. Пусть последовательными равными промежутками времени будет t сек; тогда пути, проходимые телом за t сек, $2t$ сек, $3t$ сек, ..., соответственно равны $s_1 = \frac{at^2}{2}$, $s_2 = \frac{a}{2} 4t^2$, $s_3 = \frac{a}{2} 9t^2$, ... Пути же, проходимые за первый, второй, третий промежутки времени и т. д., соответственно равны $s' = \frac{a}{2} t^2$, $s'' = s_2 - s_1 = \frac{a}{2} (4t^2 - t^2)$, $s''' = s_3 - s_2 = \frac{a}{2} (9t^2 - 4t^2)$, ... Отношение рассматриваемых путей будет $1 : 3 : 5 : \dots$

23. Путь при равноускоренном движении $s = v_0 t + \frac{at^2}{2}$, а время $t = \frac{v - v_0}{a}$. Подставляя значение времени в формулу пути, получим: $v^2 - v_0^2 = 2as$.

24. Ускорение поезда определяется из уравнения $l = s_{15} - s_{14}$, где $s_{15} = \frac{at^2}{2} - \frac{a(t-1)^2}{2}$, а $s_{14} = \frac{a(t-1)^2}{2} - \frac{a(t-2)^2}{2}$ — пути, пройденные поездом соответственно за 15-ую и 14-ую сек; отсюда $a = 2 \text{ м/сек}^2$. Путь поезда $s = \frac{at^2}{2}$; $s = 225 \text{ м}$, скорость $v = at$; $v = 30 \text{ м/сек}$.

25. 9,8 м/сек; 4,9 м.

26. Величина промежутков времени, через которые отрываются капли, равна 0,25 времени падения капли с высоты h . Следовательно, $t = 0,25 \sqrt{\frac{2h}{g}} = 0,32 \text{ сек}$. Расстояния между отдельными каплями в момент отрыва пятой капли равны расстояниям, пройденным первой каплей за четыре равных последовательных промежутка времени. Следовательно, $h^I : h^{II} : h^{III} : h^{IV} = 1 : 3 : 5 : 7$; и тогда $h^I = \frac{h}{1+3+5+7} = \frac{8 \text{ м}}{16} = 0,5 \text{ м}$, $h^{II} = 0,5 \text{ м} \cdot 3 = 1,5 \text{ м}$, $h^{III} = 2,5 \text{ м}$, $h^{IV} = 3,5 \text{ м}$.

27. Путь, пройденный первой каплей, $h_1 = \frac{gt_1^2}{2}$, а второй — $h_2 = \frac{gt_2^2}{2}$.

Вычитая из первого равенства второе, получим:

$$2(h_1 - h_2) = gt_1^2 - gt_2^2.$$

Отсюда $t_1 = 3 \text{ сек}$, а $t_1 - t_2 = 1 \text{ сек}$.

28. Тело, брошенное вертикально вверх, на высоте $h = 0,5 \text{ Н}$ будет иметь ту же скорость, которую оно приобрело бы, если б упало с высоты $(H - h) = 0,5 \text{ Н}$, т. е. $v^2 = 2gh$, но так как $H = \frac{v_0^2}{2g}$, то $v = \sqrt{2g \cdot 0,5 H} = 0,71 v_0$.

29. Если через t обозначить общее время падения, то за время $(t - 2) \text{ сек}$ путь, пройденный телом, $h - 0,25h = 0,75h$, или $0,75h = 0,5g(t - 2)^2$. Высота падения $h = \frac{gt^2}{2}$. Исключая высоту падения из последних двух равенств, имеем: $t^2 - 16t + 16 = 0$. Решая квадратное уравнение, получим $t = 14,93 \text{ сек}$; высота падения $h = 1090 \text{ м}$.

30. Время, за которое пройдет n -ый вагон мимо наблюдателя, равно разности времени, за которое пройдет n вагонов и $(n-1)$ вагон, т. е. $t = t_n - t_{n-1}$. Время равноускоренного движения $t = \sqrt{\frac{2s}{a}}$. Обозначая длину вагона через l , получим

$$t_n = \sqrt{\frac{2nl}{a}} \text{ и } t_{n-1} = \sqrt{\frac{2(n-1)l}{a}}.$$

Поскольку $\sqrt{\frac{2l}{a}} = t_1$, то искомое время $t = t_1 \sqrt{n} - t_1 \sqrt{n-1}$; $t = 0,64 \text{ сек.}$

31. Движение второй тарелки равнозамедленное, с начальной скоростью v_0 , а поэтому ее путь до встречи $h_1 = v_0 t - \frac{gt^2}{2}$. За это же время t первая тарелка опустилась на высоту $h_2 = \frac{gt^2}{2}$. Сложив эти равенства, получим: $h_1 + h_2 = v_0 t$. Но $h_1 + h_2 = h$, а $h = \frac{v_0^2}{2g}$ — максимальная высота, на которую поднимается тарелка. Следовательно, $v_0 = \sqrt{2gh}$. Поэтому $h = t \sqrt{2gh}$, откуда $t = \frac{h}{\sqrt{2gh}}$. Подставляя это значение времени в формулу высоты, на которой произошла встреча тарелок, получим $h_1 = 0,75h$; $h_1 = 4,5 \text{ м.}$

32. Пути, проходимые первым и вторым телом, соответственно равны $h_1 = v_0 t - \frac{gt^2}{2}$ и $h_2 = v_0 t + \frac{gt^2}{2}$. По условию задачи $h_1 + h_2 = \frac{v_0^2}{2g}$. Тогда

$$v_0 t + v_0 t = \frac{v_0^2}{2g}, \text{ а } t = \frac{v_0}{4g} = 2 \text{ сек.}$$

Встреча произойдет на высоте $h_1 = v_0 t - \frac{gt^2}{2}$; $h_1 = 140 \text{ м.}$ Скорости тел соответственно равны $v_1 = v_0 - gt$; $v_1 = 60 \text{ м/сек}$ и $v_2 = v_0 + gt$; $v_2 = 100 \text{ м/сек.}$

36. 125 м.

37. Тело I двигалось равномерно; тело II вышло из состояния покоя в момент времени, соответствующий началу отсчета времени, и двигалось некоторое время равноускоренно, а затем равномерно; тело III некоторое время покоилось, затем двигалось равноускоренно; тело IV двигалось равнозамедленно, причем в момент времени, соот-

ветствующий точке излома графика, его ускорение по абсолютному значению увеличилось. С наибольшим ускорением двигалось тело *III*.

39. Сцепки поезда имеют определенную прочность. Если паровоз резко трогается с места, то в сцепках возникает напряжение растяжения, иногда превышающее предел прочности. Вероятнее всего, разрыв произойдет в сцепках, ближайших к паровозу, где сила натяжения сцепок наибольшая.

40. Молоток насаживают ударами рукоятки о массивный предмет или ударами какого-либо предмета по торцу рукоятки. В первом случае используется инерция движущегося молотка, а втором — инерция покоящегося молотка.

41. Для этого нужно резким движением выдернуть лист из-под чернильницы.

42. Чтобы груз резко не трогался с места, так как может произойти разрыв каната.

43. Можно. Один конец веревки следует привязать к автомобилю, а другой — к дереву близ дороги так, чтобы веревка была туго натянута, и затем тянуть за середину веревки под прямым углом к ее направлению.

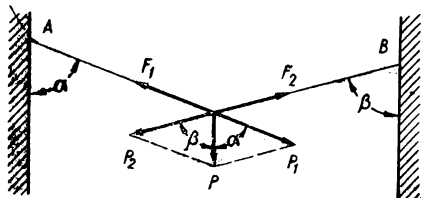


Рис. 161.

44. Когда провод почти не имеет прогиба.

45. 1000 н; 1730 н.

46. Сила сопротивления воды уравнивается равнодействующей сил тяги буксиров, которая определяется по теореме косинусов; она равна 81 кн.

47. Силы натяжения проволок F_1 и F_2 (рис. 161) численно равны соответствующим составляющим веса фонаря (P_1 и P_2) по направлениям проволок, которые определяются по теореме синусов:

$$\frac{P_2}{\sin \alpha} = \frac{P}{\sin(\alpha + \beta)}; \quad \frac{P_1}{\sin \beta} = \frac{P}{\sin(\alpha + \beta)},$$

откуда $P_2 = 394$ н; $P_1 = 376$ н.

48. Чтобы мачта не изгибалась, равнодействующая F сил F_1 и F_2 должна быть направлена вдоль мачты, т. е. по линии OB . По теореме синусов имеем $\frac{F_1}{F_2} = \frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2}$, а $\sin \varphi_1 = \frac{AB}{AO} = \frac{AB}{\sqrt{AB^2 + OB^2}} = \frac{3}{5}$;

$\sin \varphi_2 = \frac{BC}{OC} = \frac{BC}{\sqrt{BC^2 + OB^2}} = \frac{5}{13}$; следовательно, $\frac{F_1}{F_2} = 1,56$.

49. а) Ускоренно; б) замедленно; в) равномерно.

50. Прямолинейно равноускоренно, если равнодействующая совпадает с направлением скорости; или равнозамедленно, если направление равнодействующей противоположно направлению скорости.

51. Во время приседания прогиб доски уменьшится, при выпрямлении — увеличится.

52. Величина ускорения книги относительно лифта зависит не от направления движения лифта (направления скорости), а от направления ускорения лифта. Если ускорение лифта направлено вверх, то ускорение книги будет равно $g + a$. Если же ускорение лифта направлено вниз, то ускорение книги будет равно $g - a$.

53. 60 н.

55. Коэффициент трения $k = \frac{F}{P}$. Сила трения F в данном случае является силой, замедляющей движение, и в соответствии со вторым законом Ньютона она равна $F = ma$. Так как конечная скорость автомобиля равна нулю, то $a = \frac{v^2}{2s}$. Отсюда $k = \frac{v^2}{2gs}$; $k = 0,041$.

56. На движущееся вверх тело действуют две силы: сила натяжения веревки $F - P = ma$, или $F = P + ma = m(g + a)$; для второго случая $F_1 - P = ma_1$, или $F_1 = P + ma_1 = m(g + a_1)$. Разделив первое равенство на второе и решив относительно искомой силы, имеем:

$$F_1 = F \frac{g + a_1}{g + a}; F_1 = 168 \text{ н.}$$

57. Показание динамометра равно удвоенной силе натяжения шнура, которая с обеих сторон блока одинакова. Уравнения движения для каждого груза следующие:

$$P - F_{\text{н}} = \frac{P}{g} a; P_1 - F_{\text{н}} = -\frac{P_1}{g} a.$$

Исключив из этих равенств ускорение a и решив уравнение относительно силы натяжения нити, получим:

$$F_{\text{н}} = \frac{2PP_1}{P + P_1}; \text{ тогда } F = 2F_{\text{н}} = \frac{4PP_1}{P + P_1}; F = 4,8 \text{ н.}$$

58. Уравнения движения грузов будут $ma = F_{\text{н}} - F_{\text{т}}$ и $m_1a = P_1 - F_{\text{н}}$. Отсюда $F_{\text{т}} = P_1 - a(m + m_1)$. Ускорение a определяется по формуле $a = \frac{2s}{t^2}$. Следовательно, $F_{\text{т}} = P_1 - \frac{2s}{t^2}(m + m_1)$. Коэффициент трения

$$k = \frac{m_1g - \frac{2s}{t^2}\left(\frac{P}{g} + m_1\right)}{P}; k = 0,46.$$

59. Составляющая F_1 силы тяги F численно равна сумме двух сил: ускоряющей F_y и трения F_T , т. е. $F_1 = F_y + F_T$. Из рис. 162 и условия задачи следует: $F_1 = F_2 = \frac{F}{\sqrt{2}}$; $F_y = 2ma = 2 \frac{P}{g} a$; $F_T = k[P + (P - F_2)] = k\left(2P - \frac{F}{\sqrt{2}}\right)$. Тогда $\frac{F}{\sqrt{2}} = 2 \frac{P}{g} a + k\left(2P - \frac{F}{\sqrt{2}}\right)$, откуда

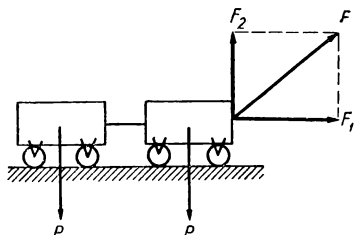


Рис. 162.

$$F = \frac{2P\left(\frac{a}{g} + k\right)\sqrt{2}}{1 + k}; F = 420 \text{ н.}$$

Сила натяжения веревки, связывающей тележки,

$$F' = kP + \frac{P}{g} a; F' = 196 \text{ н.}$$

60. Натяжение веревки по обе стороны от блока одинаковое, массы учащих, согласно условию задачи, также одинаковы, поэтому относительно блока их скорости и ускорения будут одинаковыми. Отсюда следует: а) что оба учащих достигают блока одновременно через время $t = \frac{l}{v_1 + v_2} = 12 \text{ сек}$; б) что, начиная подниматься одновременно, учащие поднимутся на одну и ту же высоту относительно земли. Время поднятия определяется из формул путей их равноускоренного движения без начальной скорости: $l = \frac{a_1 t^2}{2} + \frac{a_2 t^2}{2}$, откуда $t = 4,9 \text{ сек}$.

61. Груз массой m на высоту h_1 поднимается равноускоренно, а затем до остановки на пути h_2 будет двигаться равнозамедленно. Таким образом, высота поднятия груза массой m равна $h = h_1 + h_2 = h_1 + \frac{v^2}{2g}$, где v — скорость свободного падения с высоты h_2 , равная скорости равноускоренного движения в конце пути h_1 . Скорость на высоте h_1 определяется по формуле $v^2 = 2ah_1$. Ускорение грузов определяется из второго закона Ньютона: $a = \frac{F}{m_1 + m} =$

$= \frac{P_1 - P}{m_1 + m}$; $a = \frac{m_1 - m}{m_1 + m} g$. Так как по условию задачи $m_1 = 2m$, то

$$a = \frac{g}{3}. \text{ Тогда высота } h = h_1 + \frac{2 \frac{1}{3} g h_1}{2g}; h = 40 \text{ см.}$$

62. Путь, пройденный лодкой, будет одинаковым, так как на лодку в обоих случаях действует одинаковая сила.

63. Сила сопротивления грунта $F = (m + m_1) a$. Движение сваи и бойка копра равнозамедленное с ускорением $a = \frac{v^2}{2h}$, где v — скорость бойка и сваи после удара; ее определяем из закона сохранения количества движения: $(m + m_1) v = m_1 v_1$; здесь $v_1 = \sqrt{2gH}$ — скорость бойка до удара; $v = \frac{m_1 \sqrt{2gH}}{m + m_1}$; а ускорение $a = \frac{m_1^2 2gH}{2h (m + m_1)^2}$.

Тогда сила

$$F = \frac{m_1^2 g H}{h (m + m_1)}; F = 12 \cdot 10^5 \text{ н.}$$

64. Необходимо создать подобие реактивного двигателя, с силой бросая какие-либо предметы. Бросать их нужно с таким расчетом, чтобы сила реакции отталкивала вас к какому-либо краю катка.

65. Начальная скорость ракеты определяется из закона сохранения количества движения: $m_1 v_1 + m_2 v_2 = 0$, $v_1 = -246 \text{ м/сек.}$ Если не учитывать сопротивление воздуха, то ракета поднимается на высоту $h_1 = \frac{v_1^2}{2g}$. С учетом сопротивления воздуха высота подъема равна

$$h = \frac{h_1}{5} = \frac{v_1^2}{10g}; h = 620 \text{ м.}$$

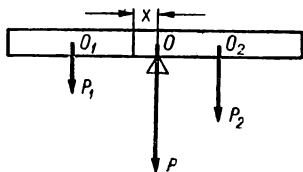


Рис. 163.

66. Прогиб доски увеличится.

67. Решение задачи сводится к определению точки приложения силы тяжести стержня. Относительно центра тяжести O (рис. 163) стержня моменты сил P_1 и P_2 равны между собой, т. е.

$$P_1 \left(\frac{l}{4} + x \right) = P_2 \left(\frac{l}{4} - x \right), \text{ или } \rho_1 g S \frac{l}{2} \left(\frac{l}{4} + x \right) = \rho_2 g S \frac{l}{2} \left(\frac{l}{4} - x \right),$$

где S — площадь поперечного сечения стержня. Отсюда расстояние от середины стержня до центра тяжести

$$x = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \cdot \frac{l}{4}; \quad x = 1,375 \text{ см.}$$

68. При равновесии тела алгебраическая сумма моментов сил относительно оси, проходящей через твердое тело, равна нулю.

69. Нет. Согнутый конец поднимается, так как его центр тяжести переместится ближе к точке опоры.

70. 1,5 м от середины.

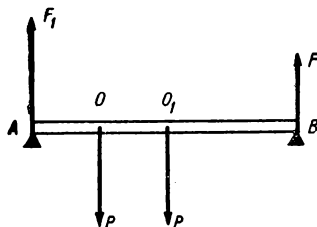


Рис. 164.

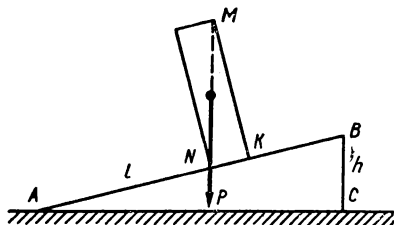


Рис. 165.

71. Так как балка находится в покое, то к ней можно применить условия равновесия твердого тела, имеющего ось вращения. За ось вращения можно принять прямую, проходящую через любую точку тела, например через конец A (рис. 164). Тогда $P \cdot 0,25l + P \cdot 0,5l = Fl$, или $F = 0,25P + 0,5P = 750 \text{ н}$. Принимая за ось вращения прямую, проходящую через точку опоры B , получим $F_1 l = P \cdot 0,75l + P \cdot 0,5l$, или $F_1 = 0,75P + 0,5P = 1250 \text{ н}$. Следовательно, давление на опоры (по третьему закону Ньютона) будет 750 и 1250 н.

72. Вертикаль, проведенная через центр тяжести крана, всегда проходит через площадь его опоры.

73. До тех пор, пока вертикальная прямая, проведенная из центра тяжести цилиндра, проходит через площадь его опоры, цилиндр не опрокидывается, и при наибольшем поднятии доски она проходит через крайнюю точку площади опоры. Из рис. 165 видно, что $\triangle ABC \sim \triangle MNK$, поэтому $\frac{h}{l} = \frac{NK}{MN}$, откуда $h = 12 \text{ см}$.

75. При падении шеста на землю его потенциальная энергия уменьшится на величину Ph , где h — высота, на которой находился центр тяжести; поэтому $A = Ph = 0,5 Pl$; $A = 1000 \text{ Дж}$.

76. На основании закона сохранения количества движения и закона сохранения энергии имеем:

$$m_1 v_1 - m_2 v_2 = m_1 u_1 + m_2 u_2; \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2};$$

$$m_1(v_1 - u_1) = m_2(u_2 - v_2); m_1(v_1^2 - u_1^2) = m_2(u_2^2 - v_2^2);$$

разделив одно равенство на другое, получим:

$$v_1 + u_1 = u_2 + v_2.$$

Определяя из этого равенства u_2 и подставляя его значение в закон сохранения количества движения, после решения относительно u_1 получим:

$$u_1 = \frac{(m_1 - m_2)v_1 + 2m_2 v_2}{m_1 + m_2}.$$

Аналогично находим

$$u_2 = \frac{(m_2 - m_1)v_2 + 2m_1 v_1}{m_1 + m_2}.$$

Так как $v_2 = 0$, а $v_1 = \sqrt{2gh}$, то $u_1 = -1,04$ м/сек, а $u_2 = 2,08$ м/сек.

77. Пуля, попавшая в ящик с песком, начинает двигаться вместе с ящиком с общей скоростью v , определяемой из закона сохранения количества движения $v = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$.

Максимальная кинетическая энергия ящика вместе с пулей равна их потенциальной энергии в крайнем, отклоненном положении $\frac{(m_1 + m_2)v^2}{2} = (m_1 + m_2)gh$. Отсюда $h = \frac{v^2}{2g}$. Подставляя значение скорости v и учитывая, что $v_2 = 0$, получим

$$h = \frac{m_1^2 v_1^2}{2(m_1 + m_2)^2 g}; h = 0,13 \text{ м.}$$

Так как $\cos \alpha = \frac{l - h}{l} = 0,967$, то угол $\alpha = 14^\circ 40'$.

78. Работа, совершаемая конькобежцем при бросании гири, равна сумме кинетической энергии гири и кинетической энергии конькобежца:

$$A = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2}.$$

Скорость гири находим из закона сохранения количества движения:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = 0, v_1 = -\frac{m_2 v_2}{m_1} = -12 \text{ м/сек}; \text{ тогда } A = 810 \text{ Дж.}$$

79. Если пассажир поднимается (опускается) по лестнице эскалатора с постоянной скоростью, то среднее давление его на лестницу остается неизменным. Следовательно, сила, с которой мотор тянет лестницу, остается неизменной, поэтому и потребляемая мотором мощность остается неизменной ($N = Fv$). Время же поднятия (или опускания) человека будет меньше, когда он движется по лестнице эскалатора, поэтому и величина работы, совершаемой мотором, в этом случае будет меньше, чем при подъеме стоящего человека.

80. Работа по поднятию груза вдоль наклонной плоскости равна работе против силы трения, кинетической и потенциальной энергии груза в верхней точке наклонной плоскости, т. е.

$$A = Fl + \frac{mv^2}{2} + Ph, \text{ или } A = kP_2l + \frac{m2al}{2} + Pl\sin\alpha = kPl\cos\alpha + Pl\frac{a}{g} + Pl\sin\alpha; A = 1380 \text{ дж.}$$

81. Автомобиль будет равномерно подниматься в гору, если сила тяги F , развиваемая мотором, равна сумме скатывающей силы P_1 и силы трения F_T , т. е. $F = P_1 + F_T$, или $\frac{N}{v} = P(\sin\alpha + k\cos\alpha)$, откуда $v = 4,1 \text{ м/сек.}$

82. Так как уклон малый, то $P_n \approx P$. Сила трения $F_T = F - P\frac{h}{l}$, где F — сила тяги автомобиля; она равна $F = \frac{N}{v}$. Тогда

$$k = \frac{F_T}{P_n} = \frac{N}{vP} - \frac{h}{l}; k = 0,19.$$

83. Тележка будет скатываться с ускорением $a = g\sin\alpha$, где α — угол, образуемый наклонной плоскостью с горизонтом. Для того чтобы шарик имел такое же ускорение, необходимо, чтобы равнодействующая сил тяжести и натяжения нити, приложенных к шарiku, была направлена параллельно наклонной плоскости и равна $F = ma = mg\sin\alpha$, где m — масса шарика. Это возможно только тогда, когда нить перпендикулярна к наклонной плоскости. Поэтому во время скольжения нить будет перпендикулярна к наклонной плоскости.

84. Шарик отклонится вперед, и нить будет перпендикулярна к наклонной плоскости. При въезде на наклонную плоскость тележка приобретает ускорение a , направленное в сторону, противоположную движению. Точка подвеса, двигаясь замедленно, отстает от шарика. Ускорение шарика станет равным ускорению тележки в тот момент, когда нить, удерживающая шарик, будет направлена по нормали к наклонной плоскости.

85. Уравнения движения будут: $m_1 a = m_1 g - F_H$; $m_2 a = F_H - (F_T + F_1)$, но $F_1 = P_2 \sin \alpha$; $F_T = k F_2 = k P_2 \cos \alpha$. Подставляя эти значения составляющих F_1 и F_2 в уравнение движения второго тела и складывая почленно первое уравнение со вторым, получим: $a(m_1 + m_2) = m_1 g - P_2(k \cos \alpha + \sin \alpha)$, откуда ускорение при $m_1 = m_2$ равно $a = \frac{g(1 - k \cos \alpha - \sin \alpha)}{2}$; $a = 1,98 \text{ м/сек}^2$. Натяжение веревки $F_H = m_1(g - a)$; $F_H = 15,6 \text{ н}$.

86. Сила, приложенная к рукоятке винта, равна

$$F = P \frac{h}{2\pi r}; F = 200 \text{ н}.$$

87. 1300 н; 1050 н.

88. Если считать направление вниз положительным, уравнения движения грузов будут $ma = mg - F$; $-m_1 a_1 = m_1 g - 2F$, где F — сила натяжения веревки. Умножая первое равенство на 2 и вычитая из него второе равенство, получим: $2ma + m_1 a_1 = (2m - m_1)g$. Учитывая, что ускорение второго груза в два раза меньше, чем первого (так как второй груз прошел за то же время в два раза меньший путь, чем первый), и заменяя m_1 на m , получим: $4ma_1 + ma_1 = (2m - m)g$. Отсюда $a = 0,4g$, $a_1 = 0,2g$.

89. Время падения тел одинаково.

90. Скорость камня в любой момент времени выражается через ее горизонтальную v_1 и вертикальную v_2 составляющие по формуле $v^2 = v_1^2 + v_2^2$. Поскольку $v = 1,5 v_1$, а $v_2 = gt$, то $2,25 v_1^2 = v_1^2 + g^2 t^2$. Отсюда $v_1 = 4,4 \text{ м/сек}$.

91. Скорость камня, вылетевшего из пращи, находим как скорость тела, брошенного горизонтально: $v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$, где $v_1 = 2\pi vl$ — горизонтальная составляющая, а $v_2 = \sqrt{2gh}$ — вертикальная составляющая. Тогда $v = \sqrt{4\pi^2 v^2 l^2 + 2gh}$, $v = 28,9 \text{ м/сек}$.

92. В наивысшей точке, так как вертикальная составляющая скорости равна нулю. Скорость снаряда в этой точке равна ее горизонтальной составляющей, которая во всех точках траектории одинакова.

93. Работа, затраченная хоккеистом, равна кинетической энергии шайбы $A = \frac{mv^2}{2}$, где m — масса шайбы, а v — ее скорость, которая выражается через горизонтальную составляющую $v_1 = \frac{s}{t}$ и вертикальную составляющую $v_2 = g \frac{t}{2}$; тогда $A = \frac{m}{2} \left(\frac{s^2}{t^2} + \frac{g^2 t^2}{4} \right)$; $A = 20,1 \text{ Дж}$.

94. Дальность полета определяется по формуле $s = \frac{v^2}{g} \sin 2\alpha$.

Отсюда находим угол $\alpha = 15'$.

95. Движение тела в верхней точке траектории можно рассматривать как движение по окружности радиуса R с линейной скоростью v , равной горизонтальной составляющей скорости $v = v_0 \cos \alpha$. Эта составляющая скорость определяется из формулы центростремительного ускорения: $a = g = \frac{v^2}{R}$; $v = \sqrt{gR} = v_0 \cos \alpha$, или $gR = v_0^2 \cos^2 \alpha$. Из формулы для высоты подъема тела имеем: $2gh = v_0^2 \sin^2 \alpha$. Сложив полученное равенство с предыдущим, имеем:

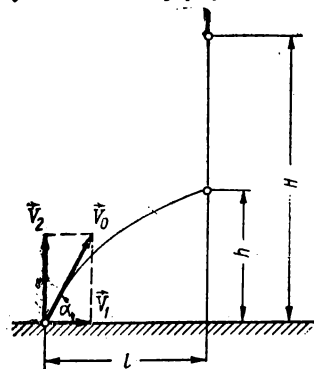


Рис. 166.

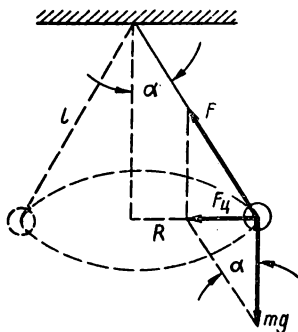


Рис. 167.

$gR + 2gh = v_0^2 (\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha)$, или $v_0 = \sqrt{gR + 2gh}$; так как $R = h$, то $v_0 = \sqrt{3gR}$; $v_0 = 9,4$ м/сек, $\cos \alpha = \frac{\sqrt{gR}}{\sqrt{3gR}} = 0,578$, а $\alpha = 54^\circ 42'$.

96. Разложим начальную скорость v_0 тела, брошенного под углом α к горизонту, на горизонтальную v_1 и вертикальную v_2 составляющие: $v_1 = v_0 \cos \alpha$ и $v_2 = v_0 \sin \alpha$ (рис. 166). От начала движения до момента встречи пройдет время $t = \frac{l}{v_1} = \frac{l}{v_0 \cos \alpha}$. За это время первое тело опустится на расстояние $H - h = \frac{gt^2}{2}$, а второе поднимется на высоту $h = v_2 t - \frac{gt^2}{2} = v_0 t \sin \alpha - \frac{gt^2}{2}$. Сложив почленно последние два уравнения, находим $H = v_0 t \sin \alpha$. Подставив в это уравнение

значение времени, получим $H = v_0 \frac{l \sin \alpha}{v_0 \cos \alpha}$; отсюда $\frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \frac{H}{l}$, или $\operatorname{tg} \alpha = \sqrt{3}$. Следовательно, $\alpha = 60^\circ$.

97. Полная энергия камня равна его кинетической энергии в момент бросания $W = \frac{mv^2}{2} = 45 \text{ дж}$. В наивысшей точке траектории кинетическая энергия $W_k = \frac{mv^2 \cos^2 \alpha}{2} = 11,25 \text{ дж}$. Потенциальная энергия $W_n = W - W_k = 33,75 \text{ дж}$.

98. Из рис. 167 видно, что $F = \frac{mg}{\cos \alpha}$, $\sin \alpha = \frac{R}{l} = 0,6$, а угол $\alpha = 36^\circ 52'$. Следовательно, $F = 2,45 \text{ н}$. Из формулы центростремительной силы $F_{\text{ц}} = m\omega^2 R$ и соотношения $F_{\text{ц}} = F \sin \alpha$ находим угловую скорость $\omega = \sqrt{\frac{F \sin \alpha}{mR}} = \sqrt{\frac{g \operatorname{tg} \alpha}{R}}$; $\omega = 3,5 \text{ рад/сек}$, а по

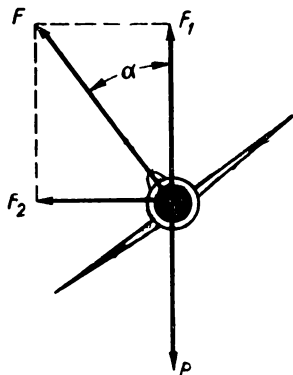


Рис. 168.

ней и период вращения $T = 1,8 \text{ сек}$.

99. К Земле.

100. Если равнодействующая всех сил, действующих на тело, является центростремительной силой.

101. Летчик при помощи рулевого управления наклоняет самолет для того, чтобы за счет наклона возникла необходимая центростремительная сила. С кораблем этого сделать нельзя; поэтому при повороте корабль отклоняется вследствие инерции в противоположную сторону.

102. Подъемная сила F (рис. 168) всегда направлена перпендикулярно плоскости крыльев. При развороте самолета в горизонтальной плоскости вертикальная составляющая F_1 подъемной силы равна его весу P , а горизонтальная составляющая F_2 является центростре-

мительной силой. Из рисунка находим $\operatorname{tg} \alpha = \frac{F_2}{F_1} = \frac{v^2}{gR} = 0,8165$, а угол $\alpha = 39^\circ$.

103. Тот же, так как период вращения тела по орбите не зависит от массы тела.

104. Будет казаться, что вагон наклонен наружу кривой.

105. В самой низкой точке петли на летчика действует центростремительная сила, определяемая как разность реакции сиденья и веса летчика, т. е. $\frac{mv^2}{R} = F - P$; отсюда $v = 140$ м/сек.

106. $g_C = \gamma \frac{M}{R^2} = 274$ м/сек².

107. Пренебрегая вращением Земли вокруг своей оси, имеем:

$$mg = \gamma \frac{Mm}{R^2}, \text{ или } g = \gamma \frac{M}{R^2}.$$

108. На поверхности Земли $P = \gamma \frac{mM}{R^2}$, а на высоте h $P_1 = \gamma \frac{mM}{(R+h)^2}$. Тогда $\frac{P}{P_1} = \frac{(R+h)^2}{R^2}$, или $\sqrt{\frac{P}{P_1}} = \frac{R+h}{R}$. Так как $\sqrt{\frac{P}{P_1}} = \sqrt{2}$, то $\frac{R+h}{R} = 1,41$, откуда $h = 0,41 R$.

109. При снижении контейнера его потенциальная энергия убывает на величину работы, совершаемой силами тяготения. За счет убыли потенциальной энергии увеличивается кинетическая энергия контейнера. По закону сохранения энергии имеем:

$$\gamma Mm \left(\frac{1}{R+h_1} - \frac{1}{R+h} \right) = \frac{mv^2}{2},$$

где R — радиус Земли. Отсюда $v = 3,57 \cdot 10^3$ м/сек.

110. На экваторе.

111. 35 740 км; 3070 м/сек.

113. Для этого достаточно поднять руку и двигать ее по окружности над головой в сторону, противоположную желательному повороту.

114. Не будет.

115. Уменьшится. Увеличится.

116. Часы будут спешить; отставать.

117. Для уменьшения сопротивления воздуха движению маятника.

118. Часы будут спешить. Надо удлинить маятник.

119. Часы будут отставать.

120. Период колебания возрастает в $\sqrt{2}$, $\sqrt{3}$ раз.

121. 0,06 гц.

122. Период колебания маятника на Луне $T_L = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g_L}}$,

а на Земле $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$. Разделим первое уравнение на второе:

$$\frac{T_L}{T} = \sqrt{\frac{g}{g_L}}. \text{ По закону всемирного тяготения } \frac{g}{g_L} = \frac{MR_L^2}{M_L R^3}. \text{ Тогда}$$

$$T_L = T \frac{R_L}{R} \sqrt{\frac{M}{M_L}}; T_L = 2,4 \text{ сек.}$$

123. Так как ускорение на Луне меньше, чем на Земле, то часы отстают. Число колебаний маятника за сутки на Луне равно $N = \frac{t}{T_1}$, где t — продолжительность суток, T_1 — период колебания маятника на Луне. Следовательно, на Луне часы отстают на время $\Delta t = N(T_1 - T) = t \left(1 - \frac{T}{T_1}\right)$. Выражая периоды через радиусы и массы Земли и Луны (см. предыдущую задачу), определим $\Delta t = 13,87$ ч.

124. Нет, так как ускорение маятника изменяется.

125. $A = 5$ см; $T = 12$ сек; $\nu = 0,083$ сек⁻¹. Скорость имеет максимальное значение при условии $x = 0$. Тогда $\sin \frac{\pi}{6} t = 0$, т. е. $\frac{\pi}{6} t = n\pi$, где $n = 0, 1, 2, \dots$. Таким образом, максимальная скорость достигается в моменты времени $t = 6n = 0; 6; 12$ сек, ... Ускорение будет максимальным при $x = A$. Тогда $\sin \frac{\pi}{6} t = 1$, т. е. $\frac{\pi}{6} t = (2n + 1) \frac{\pi}{2}$. Отсюда $t = 3(2n + 1) = 3; 9; 15$ сек, ... Для момента $t = \frac{T}{6}$; $x = 5$ см $\sin \left(\frac{\pi}{6} \cdot \frac{T}{6}\right) = 4,33$ см, а $\varphi = 60^\circ$.

129. 3625 м.

130. 6800 м.

131. В воде, так как отношение длин волн пропорционально их скоростям распространения.

132. Скорость звука в воде $v_1 = \frac{s}{t - 4}$, где $t = \frac{s}{v}$ — время распространения звука в воздухе. Тогда $v_1 = 1450$ м/сек.

133. $\lambda = \frac{v}{\nu}$; $\lambda = 2,8$ см.

134. Не может, так как на струю воды действует сила сопротивления воздуха.

135. Керосин.

136. Так как жидкости взяты в одинаковом количестве по весу и налиты в цилиндрический сосуд, то давление их на дно сосуда

одинаково, т. е. $\rho gh = \rho_1 g h_1$, отсюда $h_1 = \frac{\rho h}{\rho_1}$. По условию задачи

$H = h + h_1 = h + \frac{\rho h}{\rho_1}$, откуда $h = \frac{H}{1 + \frac{\rho}{\rho_1}}$. Давление на дно сосуда

$$p = \rho gh + \rho_1 g h_1 = 2\rho gh = 2\rho g \frac{H}{1 + \frac{\rho}{\rho_1}}; p = 5,3 \cdot 10^3 \text{ н/м}^2.$$

137. Уровень воды в сосуде с вертикальными стенками ниже, поэтому давление жидкости на дно в этом сосуде меньше, чем во втором. Оба сосуда давят на стол с одинаковой силой, равной весу сосуда и жидкости. На первый взгляд может показаться, что сосуд с наклонными внутрь стенками давит на стол с большей силой, так как давление жидкости на дно в нем больше. В этом сосуде давление на стенки направлено под углом ко дну сосуда вверх — вертикальная составляющая силы давления стремится поднять сосуд вверх, а поэтому не вся сила давления на дно полностью передается столу.

138. Полезная работа $A_1 = Ph = \rho h_1 \frac{S_1}{S_2} n$, так как за один ход малого поршня большой поршень поднимается на высоту $h_2 = h_1 \frac{S_1}{S_2}$, а за n ходов — на $h = h_1 \frac{S_1}{S_2} n$. Затраченная работа $A = Nt$. Тогда $\eta = \frac{Ph_1 S_1 n}{Nt S_2}$. Отсюда $n = 90$.

139. На мелком месте на нас действует меньшая выталкивающая сила воды.

140. Гири должны быть из того же вещества, что и взвешиваемое тело.

141. Можно, если сжимаемость жидкости больше сжимаемости тела, погруженного в нее.

142. При полном погружении льда в воду вес человека и льдины равен выталкивающей силе, т. е. $P + \rho g Sh = \rho_1 g Sh$. Отсюда $S = 1,53 \text{ м}^2$.

143. Баржа будет плавать на воде, если вес баржи с грузом равен выталкивающей силе, действующей на нее со стороны воды, т. е. $P_1 = Sh_1 \rho_1 g$ и $P_1 = Sh_2 \rho_2 g$, где ρ_1 и ρ_2 — соответственно плотность пресной и морской воды, а h_1 и h_2 — глубина погружения груженной баржи в пресной и в морской воде. Изменение глубины погружения баржи при переходе из пресной воды в морскую $h = h_1 - h_2 = \frac{P_1}{Sg} \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \right)$. Из этой формулы определяется вес гру-

женой баржи $P_1 = \frac{S\rho_1\rho_2g}{\rho_2 - \rho_1} h$. Аналогичное выражение находим для веса P_2 пустой баржи. Вес оставленного груза $P = P_1 - P_2 = \frac{S\rho_2\rho_1g}{\rho_2 - \rho_1} (h - h_0) = 20,2 \cdot 10^6 \text{ н}$.

144. 31,5 м.

145. Водяной.

146. Ртуть откачать нельзя.

147. Будет входить воздух, а ртуть будет опускаться до тех пор, пока ее уровень не сравняется с уровнем ртути в чашке.

149. Работа силы F по перемещению поршня на расстояние l расходуется на увеличение кинетической энергии струи, т. е. имеет место равенство $A = \frac{mv^2}{2}$. Но $m = \rho Sl$, где ρ — плотность жидкости,

а $S = \frac{\pi d^2}{4}$; тогда $Fl = \frac{\rho Slv^2}{2}$. Отсюда $v = 16 \text{ м/сек}$.

150. Мощность воздушного потока численно равна кинетической энергии воздуха, прошедшего через площадь поперечного сечения S аэродинамической трубы за 1 сек: $N = \frac{mv^2}{2t}$. Так как $m = \rho vtS$, где ρ — плотность воздуха, v — его скорость, а t — время его движения, то $N = \frac{\rho Sv^3}{2}$; $N = 5,2 \text{ квт}$.

151. Дополнительная сила тяги $F = ma = m \frac{v}{\Delta t}$, где m — масса микрочастиц, v — их скорость, а Δt — время действия корабля на микрометеор, в течение которого микрометеор приобретает скорость v . Масса микрочастиц, с которыми встречается корабль за время Δt , равна $m = v\Delta tSn_0m_1$, где n_0 — концентрация микрочастиц. Тогда $F = v^2Sn_0m_1$; $F = 40 \text{ н}$.

156. 1,3 м.

157. Зазор между рельсами равен абсолютному удлинению, которое находится из относительного удлинения, выраженного формулой

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{l_1 - l}{l} = \frac{l_0(1 + \alpha t_1) - l_0(1 + \alpha t)}{l_0(1 + \alpha t)} = \alpha \frac{t_1 - t}{1 + \alpha t}.$$

Откуда $\Delta l = 3,7 \text{ мм}$.

158. Площадь отверстия увеличивается; она равна

$$S = \pi r^2 = \pi r_0^2(1 + \alpha t)^2; S = 1990 \text{ см}^2.$$

159. При правильном ходе часов маятник в течение суток совершает $N = 24 \cdot 60 \cdot 60 \frac{1}{T_0}$ колебаний, где T_0 — период колебания маят-

ника при 0°C . При нагревании длина маятника увеличивается, и часы за сутки отстанут на время $\Delta t = N(T - T_0) = 24 \cdot 60 \cdot 60 \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right)$.

Период колебания маятника при 0°C $T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{l_0}{g}}$, а при температуре t $T = 2\pi \sqrt{\frac{l_0(1 + \alpha t)}{g}}$. Отношение периодов $\frac{T}{T_0} = \sqrt{1 + \alpha t}$. Тогда $\Delta t = 16 \text{ сек.}$

160. Стакан из обычного стекла лопается потому, что из-за плохой теплопроводности стекла он нагревается неравномерно. Стакан из кварцевого стекла не лопается потому, что кварцевое стекло имеет незначительный коэффициент линейного расширения.

161. Однородная жидкость различной температуры в сообщающихся сосудах будет в равновесии, если выполняется равенство $\frac{h_2}{h_1} = \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{1 + \beta t_2}{1 + \beta t_1}$. Отсюда $\beta = \frac{h_2 - h_1}{h_1 t_2 - h_2 t_1}$; $\beta = 0,0005 \text{ град}^{-1}$.

162. Объем ртути V при температуре t равен сумме объемов колбы V' при этой температуре и вытекшей ртути V_1 , т. е. $V = V' + V_1 = V_0(1 + 3\alpha t) + V_1$. Тогда коэффициент объемного расширения ртути

$$\beta = \frac{V - V_0}{V_0 t} = \frac{3\alpha V_0 t + V_1}{V_0 t}; \quad \beta = 0,00018 \text{ град}^{-1}.$$

165. Допустим, что второй баллон пустой; тогда по закону Бойля — Мариотта $p_1 V_1 = p'(V_1 + V_2)$, где p' — давление в баллонах после открывания крана. Аналогично $p_2 V_2 = p''(V_1 + V_2)$. В соответствии с законом Дальтона

$$p = p' + p'' = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2}{V_1 + V_2}; \quad p = 13 \text{ ат.}$$

166. По закону Бойля — Мариотта $pV = p_0 3V$, где p_0 — атмосферное давление, p — давление воздуха в пузырьке на дне озера, V — объем воздуха. Давление p равно сумме давлений атмосферного и гидростатического, т. е. $p = p_0 + \rho gh$, где ρ — плотность воды, а h — глубина озера. Тогда $p_0 + \rho gh = 3p_0$, откуда $h = 20,7 \text{ м.}$

167. В первом положении трубки давление столбика воздуха равно сумме атмосферного давления H и давления столбика ртути h , т. е. $p = H + h$, а его объем при этом $V = lS$, где S — площадь сечения трубки. При втором положении трубки $p_1 = H - h$ и $V_1 = l_1 S$. По закону Бойля — Мариотта имеем: $pV = p_1 V_1$ или $(H + h)lS = (H - h)l_1 S$, откуда $H = 750 \text{ мм рт. ст.}$

168. Перемещение поршня $\Delta h = h - h_1$, где h_1 — расстояние от дна цилиндра до поршня при температуре t_1 . При охлаждении газ сжимался при постоянном (атмосферном) давлении, а поэтому объем

газа V_1 при температуре t_1 равен $V_1 = V_0(1 + \beta t_1)$, а при температуре t : $V = V_0(1 + \beta t)$. Тогда $\frac{V_1}{V} = \frac{1 + \beta t_1}{1 + \beta t}$. Так как $V_1 = Sh_1$ и $V = Sh$, то $\frac{h_1}{h} = \frac{1 + \beta t_1}{1 + \beta t}$, откуда $h_1 = 20$ см, а $\Delta h = 25$ см.

169. При температуре t давление газа в цилиндре $p_1 = \frac{P}{S} + p$,

а так как объем постоянный, то давление при 0°C $p_0 = \frac{p_1}{1 + \gamma t}$,

или $p_0 = \frac{\frac{P}{S} + p}{1 + \gamma t}$. Чтобы поршень при охлаждении газа остался на месте, нужно снять груз весом $P_1 = (p_1 - p_0)S$; $P_1 = 27$ н.

170. Давление в баллоне при температуре t_2 будет $p_2 = p_0(1 + \gamma t_2)$. Давление газа при 0°C определяется из равенства $p_1 = p + p' = p_0(1 + \gamma t_1)$. Тогда

$$p_2 = \frac{p + p'}{1 + \gamma t_1}(1 + \gamma t_2); \quad p_2 = 5 \text{ ат},$$

а показание манометра будет 4 ат.

176. Уравнение состояния углекислого газа

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{p_0 m}{T_0 \rho_0}, \text{ откуда } V = \frac{p_0 T m}{p T_0 \rho_0}.$$

Аналогично для водорода $V = \frac{p_0 T_1 m_1}{\rho_1 T_0 \rho'_0}$. Приравнявая различные выражения для одного и того же объема V и учитывая, что $p_1 = \frac{1}{5} p$, получим

$$m_1 = \frac{T_0 \rho'_0 m}{5 T_1 \rho_0}; \quad m_1 = 0,4 \text{ кг}.$$

177. Масса израсходованного кислорода равна разности масс кислорода в начальном и конечном состояниях, т. е. $\Delta m = m - m_1$. Пользуясь уравнением состояния газа, находим массы m и m_1 (см. решение задачи 176). Тогда

$$\Delta m = \frac{p_0 V T_0}{p_0} \left(\frac{p}{T} - \frac{p_1}{T_1} \right); \quad \Delta m = 0,39 \text{ кг}.$$

178. Плотность паров ртути выражается через их массу и объем по формуле $\rho = \frac{m}{V}$. Объем паров V находим из уравнения состояния

газа, написанного для одного киломоля: $\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0}$, где $V_0 = 22,4 \text{ м}^3$.

Тогда $\rho = \frac{pmT_0}{p_0 V_0 T}$; $\rho = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ кг/м}^3$.

179. Искомое число молекул можно выразить через число молекул в единице объема $n_0 = 2,69 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ и объем газа при нормальных условиях, т. е. $n = n_0 V_0$. Объем V_0 определим из уравнения состояния газа: $\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0}$. Тогда $n = \frac{pVT_0}{p_0 T} n_0$; $n = 2,4 \cdot 10^{20}$.

182. $19,6 \cdot 10^5 \text{ т}$.

183. Расход топлива за сутки турбиной мощностью N равен $m = \frac{Q}{q}$. Так как не вся выделявшаяся теплота при сгорании топлива пошла на совершение работы, то $m = \frac{Nt}{\eta q}$. Расход топлива за сутки другими турбинами такой же общей мощности $m_1 = \frac{Nt}{\eta_1 q}$. Экономия топлива за сутки

$$\Delta m = m_1 - m = \frac{Nt}{q} \left(\frac{1}{\eta_1} - \frac{1}{\eta} \right) = 1840 \text{ т}.$$

184. 50% кинетической энергии пули при ударе о препятствие идет на нагревание пули до температуры плавления и на частичное ее расплавление, т. е. $\eta \frac{mv^2}{2} = cm(t_0 - t) + \lambda m_1$. Отсюда находим $\frac{m_1}{m} = 0,59$.

185. Температура печи равна температуре железной гири t , которая определяется из уравнения теплового баланса:

$$cm(t - \theta) = cm_1(\theta - t_1) + c_2 m_2(\theta - t_1); \quad t = 355^\circ \text{С}.$$

186. Согласно закону сохранения энергии, изменение кинетической энергии пули равно теплоте, которая затрачена на ее нагревание до температуры плавления t_0 и на частичное плавление:

$$\frac{m}{2}(v^2 - v_1^2) = cm(t_0 - t) + \lambda m_1; \text{ отсюда } \frac{m_1}{m} = 0,097.$$

187. Образование инея препятствует охлаждению растений.

188. На нагревание комнаты.

189. Пренебрегая потенциальной энергией спутника по сравнению с его кинетической энергией, имеем:

$$Q = \frac{1}{2} m v^2; \quad Q = 1,6 \cdot 10^9 \text{ Дж.}$$

190. 6,1 Мдж.

191. К. п. д. примуса $\eta = \frac{Q_1}{Q}$. Полезным количеством теплоты является теплота, затраченная на плавление льда и нагревание воды. Израсходованная теплота $Q = qm$, где q — теплотворность топлива. Тогда

$$m = \frac{\lambda m_1 + c(m + m_1)(t - t_0)}{r q}; \quad m = 0,15 \text{ кг.}$$

192. 64%.

193. Давление насыщающего пара возрастает не только вследствие повышения температуры, но также и потому, что при повышении температуры возрастает количество молекул пара.

194. Сухой воздух является смесью молекул кислорода и азота, а влажный воздух состоит из молекул кислорода, азота и водяного пара. При одинаковых условиях количество молекул в единице объема сухого и влажного воздуха одинаково, но так как масса молекул в единице объема (плотность) влажного воздуха меньшая, то влажный воздух легче сухого.

196. При повышении температуры.

197. Давление насыщающего пара при нагревании изменяется иначе, чем давление газа.

198. Количество пара в 1 м³ воздуха $f = FB = 5,66 \text{ г/м}^3$. В 0,2 м³ воздуха при 10°С максимальное количество пара $F : 5 = 1,89 \text{ г}$. Выпадет росы $(5,66 - 1,89) \text{ г} = 3,77 \text{ г}$.

199. С повышением температуры коэффициент поверхностного натяжения воды уменьшается. Вследствие этого сила поверхностного натяжения у холодного конца больше, чем у горячего, и столбик воды будет перемещаться в сторону холодного конца.

203. Уровень воды в трубке будет совпадать с уровнем воды в сосуде до тех пор, пока не дойдет до более узкого места. Затем уровень воды в трубке будет подниматься вместе с трубкой до высоты $h = \frac{2\alpha}{\rho g r} = 15 \text{ см}$, после чего упадет до следующего узкого места, и т. д.

204. Непосредственно перед отрывом вес капли равен силе поверхностного натяжения. Выражая вес капли через плотность спирта и ее объем, а силу поверхностного натяжения — через коэффициент

поверхностного натяжения и диаметр шейки, получим $\rho g \frac{V}{n} = \alpha \pi d$,

где $\frac{V}{n}$ — объем одной капли. Тогда

$$\alpha = \frac{\rho g V}{\pi d n}; \quad \alpha = 0,022 \text{ н/м.}$$

205. Работа, затраченная на растяжение мыльной пленки с границей l на расстояние x , равна

$$A = Fx = \alpha l x = \alpha \Delta S,$$

где ΔS — величина, на которую увеличилась площадь пленки. При выдувании мыльного пузыря площадь поверхности его увеличивается на πd^2 . Следовательно, $A = \alpha \pi d^2$; $A = 2,26 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}$.

206. Из определения давления следует: $p = \frac{F}{S}$, где F — сила давления балки на стену, S — площадь поперечного сечения балки. Сила давления балки на стену равна по величине силе, сжимающей балку на ту величину удлинения, какую она приобретает при нагревании на 20°C . По закону Гука

$$F = \frac{\Delta l SE}{l_0}.$$

Отношение $\frac{\Delta l}{l_0}$ находим из формулы $l = l_0 (1 + \alpha t)$, откуда $\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha t$.

Тогда $F = \alpha t SE$;

$$p = \frac{\alpha t SE}{S} = \alpha t E; \quad p = 47 \text{ н/мм}^2.$$

207. В нижней точке траектории груз движется по дуге окружности под действием центростремительной силы, которая является равнодействующей веса груза и силы натяжения проволоки F , т. е. $F_{\text{ц}} = F - P$, откуда $F = P + F_{\text{ц}}$.

Центростремительная сила определяется по формуле $F_{\text{ц}} = \frac{mv^2}{l + \Delta l}$,

а абсолютное удлинение Δl находим из закона Гука: $\Delta l = \frac{Fl}{ES}$. Скорость груза найдем из равенства кинетической энергии груза в ниж-

ней точке его потенциальной энергии при опускании с высоты $l + \Delta l$: $\frac{mv^2}{2} = mg(l + \Delta l)$; тогда

$$F_{\text{ц}} = \frac{2mg(l + \Delta l)}{l + \Delta l} = 2mg = 2P; \quad F = P + 2P = 3P.$$

$$\Delta l = \frac{3Pl}{ES}; \quad \Delta l = 0,003 \text{ м.}$$

208. При остывании стержня возникает сила, сжимающая стержень, которая в соответствии с законом Гука равна $F = \frac{\Delta l}{l} ES$. Так как сила изменяется пропорционально удлинению стержня, то при вычислении работы нужно брать среднюю силу $F_{\text{с}} = 0,5F$; $A = F_{\text{с}} \Delta l = 0,5 \frac{\Delta l^2}{l} ES$. Удлинение Δl находим из формулы длины стержня при температуре t , а именно, $\Delta l = l \alpha \Delta t$. Следовательно, $A = 0,5 l \alpha^2 \Delta t^2 ES$; $A = 705,6 \text{ дж}$.

209. 140 кн.

217. При равновесии шариков выполняется равенство

$$F_{\text{эл}} = P \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}, \quad (1)$$

где α — угол, на который разошлись шарики. По закону Кулона

$$F_{\text{эл}} = \frac{q^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}. \quad (2)$$

Очевидно, имеет место соотношение

$$\frac{r}{2} = l \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (3)$$

Из формул (1), (2) и (3) находим

$$q = 4l \sin \frac{\alpha}{2} \sqrt{\pi\epsilon\epsilon_0 P \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}; \quad q = 3,4 \cdot 10^{-9} \text{ К.}$$

218. При движении электрона вокруг ядра сила кулоновского взаимодействия между ядром и электроном является центростремительной; поэтому выполняется равенство

$$\frac{e \cdot q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} = \frac{mv^2}{r},$$

откуда

$$r = \frac{eq}{4\pi\epsilon_0 m v^2}; \quad r = 5 \cdot 10^{-11} \text{ м.}$$

219. На расстоянии $r = 8,94 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 8,94 \text{ см.}$

220. Результирующая напряженность электрического поля в точке A определится по правилу сложения векторов: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$. Так как в рассматриваемом случае векторы \vec{E}_1 и \vec{E}_2 взаимно перпендикулярны, то численное значение вектора напряженности результирующего поля E будет, $E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$:

$$E = \sqrt{\left(\frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1^2}\right)^2 + \left(\frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r_2^2}\right)^2}; \quad E = \sqrt{2} \cdot 3 \cdot 10^4 \text{ в/м.}$$

221. $E = 3,6 \cdot 10^{10} \text{ в/м.}$

222. $E = 4,2 \cdot 10^3 \text{ в/м.}$

223. При равновесии пылинки

$$P = F_{\text{эл}}. \quad (1)$$

До освещения выполняется равенство

$$F_{\text{эл}} = Eq = \frac{U}{d} q. \quad (2)$$

После освещения:

$$F_{\text{эл}} = E_1 q_1 = \frac{U_1}{d} q_1.$$

Поскольку $U_1 = U + \Delta U$; $q_1 = q - \Delta q$, то

$$F_{\text{эл}} = \frac{U + \Delta U}{d} (q - \Delta q). \quad (3)$$

Из формул (1), (2) и (3) следует, что

$$\Delta q = Pd \left(\frac{1}{U} - \frac{1}{U + \Delta U} \right); \quad \Delta q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ К.}$$

224. При равновесии

$$P = F, \quad (1)$$

где

$$F = \frac{U}{l} q. \quad (2)$$

После уменьшения напряжения сила уменьшается:

$$F_1 = \frac{U - \Delta U}{d} q.$$

Разность сил $F - F_1$ создает ускорение a пылинки:

$$F - F_1 = \frac{\Delta U}{d} q; \quad a = \frac{F - F_1}{m}.$$

Массу пылинки находим из равенств (1) и (2):

$$m = \frac{P}{g} = \frac{Uq}{dg}.$$

Тогда

$$a = \frac{\Delta U}{U} g.$$

Время падения t находим из формулы $d_1 = \frac{at^2}{2}$,

$$t = \sqrt{\frac{2d_1}{a}} = \sqrt{\frac{2d_1 \cdot U}{\Delta U \cdot g}}; \quad t = 0,09 \text{ сек.}$$

225. Скорость определим из соотношения:

$$eU = \frac{mv^2}{2},$$

откуда

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}; \quad v = 1,88 \cdot 10^7 \text{ м/сек.}$$

226. Емкость конденсатора, разность потенциалов между пластинами и заряд на пластинах связаны формулой

$$C = \frac{q}{\Delta\varphi}; \tag{1}$$

с другой стороны,

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}. \tag{2}$$

Из формул (1) и (2) находим:

$$d = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{q} \Delta\varphi; \quad d = 4,8 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

227. $\Delta\varphi = 22 \text{ кв.}$

228. $R = 0,17 \text{ ом.}$

229. $R_0 = \rho_0 \frac{l}{S}$; $R_t = R_0 (1 + \alpha t)$. Отсюда находим

$$R_t = \rho_0 \frac{l}{S} (1 + \alpha t); \quad R_t = 0,91 \text{ ом.}$$

230. Общее сопротивление соединения

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = \rho l \left(\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} \right);$$

$$U_1 = R_1 I; \quad U_2 = R_2 I; \quad U_3 = R_3 I.$$

$$I = \frac{\Delta\varphi}{R}; \quad U_1 = \frac{\Delta\varphi}{\left(\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} \right) \cdot S_1};$$

$$U_2 = \frac{\Delta\varphi}{\left(\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} \right) \cdot S_2}; \quad U_3 = \frac{\Delta\varphi}{\left(\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} \right) \cdot S_3};$$

$$U_1 = \frac{72}{11} \text{ в}; \quad U_2 = \frac{36}{11} \text{ в}; \quad U_3 = \frac{24}{11} \text{ в.}$$

231. $R = \frac{5}{11} R_1.$

232. $R = 12 \text{ ом}; \quad I_1 = 1,2 \text{ а}; \quad I_2 = 0,8 \text{ а}; \quad U = 24 \text{ в.}$

233. Приведенная схема эквивалентна схеме, изображенной на рис. 169, так как в точках a , c и в точках b , d потенциалы одинаковы. Следовательно,

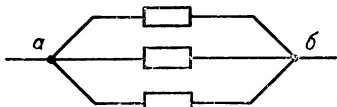


Рис. 169.

$$R_{\text{общ}} = \frac{R}{3} = 1 \text{ ом.}$$

234. Для замкнутой цепи $abcd$ элементы включены последовательно, поэтому сила тока в цепи будет

$$I = \frac{E_1 + E_2}{r_1 + r_2} = 0,75 \text{ а}; \quad U'_{\text{вн}} = U''_{\text{вн}} = Ir = 1,5 \text{ в.}$$

Вольтметр покажет 0, так как падение напряжения внутри каждого элемента равно э. д. с. элемента.

235. Сила тока в цепи будет

$$I = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{r_1 + r_2 + r_3 + R} = 3 \text{ а.}$$

Показания вольтметров определим так:

$$\begin{aligned} U_1 &= E_1 - Ir_1; & U_1 &= 5 \text{ в;} \\ U_2 &= E_2 - Ir_2; & U_2 &= -1 \text{ в;} \\ U_3 &= E_3 - Ir_3; & U_3 &= 0,5 \text{ в.} \end{aligned}$$

236. Исходя из закона Ома, можно написать

$$U_1 = I_1 R_1; \quad U_2 = I_2 R,$$

где R — сопротивление одного проводника; R_1 — сопротивление параллельно соединенных проводников; I_1 и I_2 — сила тока в цепи в первом и во втором случаях. Для э. д. с. батарей находим:

$$E = U_1 + \frac{U_1}{R_1} r = U_1 + \frac{U_2}{\frac{R}{2}} r;$$

$$E = U_2 + \frac{U_2}{R} r.$$

Отсюда получим

$$r = \frac{U_2 - U_1}{2U_1 - U_2} R; \quad r = 2 \text{ ом}; \quad E = 12 \text{ в.}$$

237. При последовательном включении вольтметра получим

$$I_1 = \frac{E}{R + R_1 + r}.$$

Падение напряжения на вольтметре будет равно

$$U_1 = \frac{E}{R + R_1 + r} R_1.$$

При параллельном включении

$$I_2 = \frac{E}{\frac{R \cdot R_1}{R + R_1} + r}; \quad U_2 = \frac{E}{\frac{R \cdot R_1}{R + R_1} + r} \cdot \frac{R \cdot R_1}{R + R_1}.$$

Так как $U_1 = U_2$, то

$$\frac{E}{R + R_1 + r} R = \frac{E}{\frac{R \cdot R_1}{R + R_1} + r} \cdot \frac{R \cdot R_1}{R + R_1}.$$

Отсюда находим

$$r = \frac{R^2}{R_1}; \quad r = 0,1 \text{ ом.}$$

238. $R = 300 \text{ ом}; \quad l = 21,2 \text{ м.}$

239. $\frac{Q_m}{Q_c} = \frac{U_m}{U_c} = 0,17.$

240. $Q = 2,5 \cdot 10^5 \text{ дж.}$

241. 1) 45 мин; 2) 10 мин.

242. $\eta = 80\%.$

243. Через 22 мин.

244. $m = 14,26 \text{ г.}$

245. $t = 1,79 \cdot 10^6 \text{ сек.}$

246. 1) 10 мин; 2) $4,6 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$

247. Не исправен. Амперметр показывает меньше на 0,04 а.

248. 1) 149 ч; 2) $1,49 \cdot 10^4 \text{ квт} \cdot \text{ч.}$

249. Проводник будет находиться в поле во взвешенном состоянии, пока сила веса проводника уравновешивается силой, действующей на проводник с током со стороны магнитного поля, т. е. при условии

$$F = P; \quad F = BIl \sin \alpha; \quad \sin \alpha = 1,$$

поэтому

$$B = \frac{P}{eI}; \quad B = 0,05 \text{ вб/м}^2.$$

250. Мощность

$$N = \frac{A}{t} = F \cdot v; \quad (1)$$

с другой стороны,

$$F = \mu \mu_0 H I l. \quad (2)$$

Для вакуума $\mu = 1$. Из формул (1) и (2) находим

$$N = 5 \text{ вт.}$$

251. Для магнитного потока имеем $\Phi = BS$. Площадь, пересекаемая силовыми линиями поля, $S = S_1 \cdot n$, где S_1 — площадь, которую описывает радиус диска при одном обороте, n — полное число оборотов. Очевидно, $S_1 = \pi r^2$; поэтому

$$\Phi = \pi r^2 \cdot nB; \quad \Phi = 1 \text{ вб.}$$

252. $B = 0,06 \text{ вб/м}^2.$

253. $F = 4,9 \text{ н.}$

254. $\Phi = 1,13 \cdot 10^{-4} \text{ вб.}$

255. Индуцируемый заряд q найдем по формуле $q = I \Delta t$. Сила тока I в обмотке будет:

$$I = \frac{|E_{\text{инд}}|}{R}; \quad |E_{\text{инд}}| = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{\Delta \Phi_1 \cdot n}{\Delta t},$$

где $\Delta \Phi_1$ — изменение магнитного потока при повороте одного витка. При повороте витка поток изменяется от 0 до $\Phi_1 = BS_1$, поэтому $\Delta \Phi_1 = BS_1$. Окончательно получим:

$$q = \frac{BS_1 n}{R}; \quad q = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ К.}$$

256. $E_{\text{инд}} = 4800 \text{ В.}$

259. Источник света будет виден в зрительную трубу непрерывно, если за время $t = \frac{2nl}{c}$ призма успеет повернуться на угол $\varphi = \frac{k}{8} \times \times 2\pi$, где $k = 1, 2, 3, \dots$. Так как $\varphi = 2\pi \nu t$, то $t = \frac{k}{8\nu}$. Следовательно, $\frac{2nl}{c} = \frac{k}{8\nu}$, отсюда $\nu = \frac{kc}{16nl} = 1170 \text{ К.}$

260. Освещенность равна $E = \frac{I}{r^2}$; отсюда $r = 3,16 \text{ м.}$

261. Освещенность одной грани фотометра $E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha$, а второй $E_1 = \frac{I_1}{r_1^2} \cos \alpha_1$. По условию задачи $E = E_1$, $r + r_1 = l$ и $\alpha = \alpha_1$. Следовательно, $\frac{I}{r^2} = \frac{I_1}{(l-r)^2}$, отсюда $r = \frac{l \pm \sqrt{l^2 - I_1}}{l - I_1} l$; $r_1 = 0,83 \text{ м;}$
 $r = 0,37 \text{ м.}$

262. Освещенность края стола от первой лампы

$$E = \frac{Ih}{\left(h^2 + \frac{d^2}{4}\right)^{\frac{3}{2}}},$$

от второй лампы

$$E_1 = \frac{I_1 h_1}{\left(h_1^2 + \frac{d^2}{4}\right)^{\frac{3}{2}}}.$$

Разделив первое равенство на второе и учитывая, что по условию задачи освещенность середины стола от первой и второй ламп одинакова, т. е. $\frac{I}{h^2} = \frac{I_1}{h_1^2}$, получим:

$$\frac{E}{E_1} = \left(\frac{4I_1 h^2 + I d^2}{4I_1 h_1^2 + I_1 d^2} \right)^{\frac{3}{2}}; \quad \frac{E}{E_1} = 3.$$

263. Нужно расположить зеркало под углом 75° к горизонту. В этом случае лучи света упадут на зеркало под углом 75° и угол между падающими и отраженными лучами будет равен 150° , т. е. отраженный луч будет направлен вертикально вниз ($150^\circ - 60^\circ = 90^\circ$).

264. 25 или 65° .

265. Высота зеркала должна быть равна половине роста человека.

266. Число изображений бесконечно; однако практически число изображений будет конечным, так как при каждом последующем отражении яркость изображения ослабляется.

267. Изображения точки S в двух зеркалах будут S' и S_1' (рис. 170), которые, в свою очередь, дадут изображения S'' и S_1'' . Изображения же точек S'' и S_1'' совпадут (S'''). Всего будет 5 изображений.

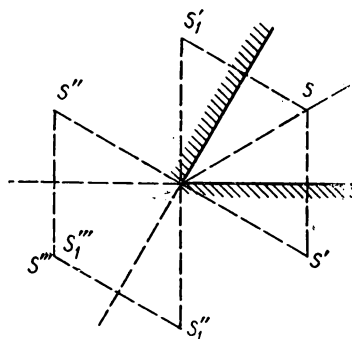


Рис. 170.

268. Изображение возникает на поверхности роговицы глаза, как в выпуклом зеркале.

269. Пусть AB — положение плоскости зеркала до поворота (рис. 171); A_1B_1 — положение плоскости зеркала после поворота на угол φ ; NO — перпендикуляр к зеркалу в точке падения луча SO , до поворота зеркала; $n'O$ — перпендикуляр в той же точке после поворота зеркала; α и α' — соответственно угол падения и отражения луча SO и OS' до поворота зеркала; α_1 и α'_1 — угол падения и угол отражения луча после поворота зеркала. Из рисунка видно, что искомым углом γ равен $\gamma = \alpha'_1 + \varphi - \alpha'$, но $\alpha'_1 = \alpha_1 = \alpha + \varphi$ и $\alpha' = \alpha$, следовательно, $\gamma = \alpha + \varphi + \varphi - \alpha = 2\varphi$; $\gamma = 34^\circ$.

270. 50 см.

271. 15 см.

272. Так как в разных средах скорость света неодинакова.

273. Из рис. 172 видно, что искомое расстояние $BC = AC - AB$, $AC = AO \operatorname{tg} \alpha$, $AB = AO \operatorname{tg} \beta$. Угол β определяется по закону преломления света $\sin \beta = \frac{\sin \alpha}{n} = 0,471$, а $\beta = 28^\circ$. Следовательно, $BC =$

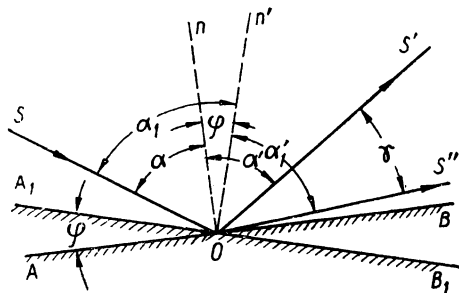


Рис. 171.

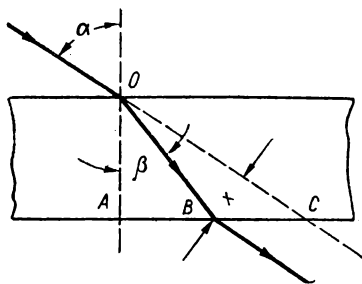


Рис. 172.

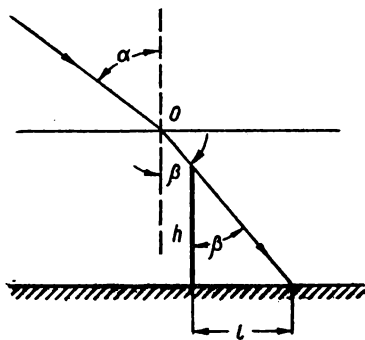


Рис. 173.

$= AO (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta) = 2,3 \text{ см.}$ Смещение луча $x = \frac{d \sin (\alpha - \beta)}{\cos \beta}$;
 $x = 1,6 \text{ см.}$

274. $x = \frac{d \sin (\alpha - \beta)}{\cos \beta} = d \sin \alpha \left(1 - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right)$. Максимальное смещение d будет равно при $\alpha \rightarrow 90^\circ$.

275. Может, так как стекло — среда оптически более плотная, чем вода.

276. Из рис. 173 видно, что длина тени равна $l = h \operatorname{tg} \beta$, где β — угол преломления света. Угол β определяется из закона преломле-

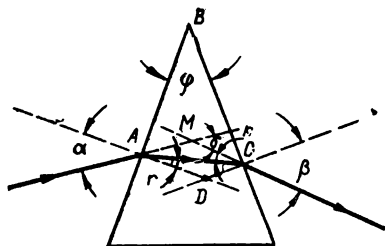


Рис. 174.

ния света: $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$, откуда

$\sin \beta = 0,6511$, а угол $\beta = 40^\circ 37'$. Следовательно, $l = 0,86$ м.

277. 18,6 см.

278. Из треугольников ABC , AMC и ADC (рис. 174) находим $r + r_1 = \varphi$; $\delta = \alpha + \beta - \varphi$. По закону преломления света

$\frac{\sin \alpha}{\sin r} = n$, $\frac{\sin r_1}{\sin \beta} = \frac{1}{n}$; $\varphi = \alpha + \beta - \delta$;

$$n = \sin \beta \sqrt{\left[\frac{\sin \alpha}{\sin \beta \sin (\alpha + \beta - \delta)} + \frac{1}{\operatorname{tg} (\alpha + \beta - \delta)} \right]^2 + 1}.$$

279. По закону преломления света $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{1}{n}$, где α — угол падения света на вторую грань призмы. Из условия задачи следует, что $\alpha = 60^\circ$; поэтому луч от второй грани полностью отразится, так как для $\sin \beta$ получается значение больше единицы, что невозможно.

280. Очевидно, пластинка будет иметь наименьший радиус r в том случае, если она плавает на поверхности воды таким образом, что ее центр находится над источником света S и лучи падают на край пластинки под углом α_0 (рис. 175), равным предельному углу, который определяется по показателю преломления воды. Следовательно,

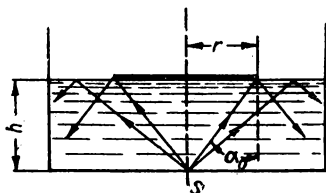


Рис. 175.

$r = h \operatorname{tg} \alpha_0$; но $\frac{\sin \alpha_0}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{n}$, или $\sin \alpha_0 = \frac{1}{n} = 0,7519$, $\alpha_0 = 48^\circ 45'$ и $h = 22,8$ см.

281. Из рис. 176 находим $\alpha' + \varphi + \beta = 180^\circ$. Так как по условию задачи $\varphi = 90^\circ$, то $\alpha' + \beta = 90^\circ$, или $\beta = 90^\circ - \alpha$, по закону

преломления света $n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin \alpha}{\sin (90^\circ - \alpha)} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \operatorname{tg} \alpha$. Следовательно, $\alpha = \operatorname{arctg} n$.

282. Каждый участок линзы создает полное изображение независимо от других. Поэтому никаких полос на изображении не получится: оно просто будет менее ярким.

283. Линзы нужно расположить так, чтобы совпадали их оптические оси и фокус первой линзы (лежащий справа) совпадал с фокусом второй линзы (лежащим слева).

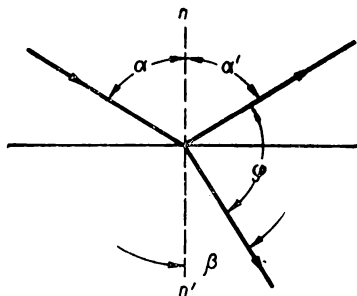


Рис. 176.

284. Это возможно, если фокусное расстояние собирающей линзы больше фокусного расстояния рассеивающей линзы. Линзы нужно расположить так, чтобы совпадали их оптические оси и фокусы, лежащие с одной и той же стороны линз.

285. 0,14 м.

286. Оптическая сила линзы в воздухе

$$\frac{1}{F} = (n_c - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right),$$

в воде

$$\frac{1}{F_1} = \left(\frac{n_c}{n_b} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right).$$

Разделив первое равенство на второе, получим:

$$\frac{F_1}{F} = \frac{n_c - 1}{\frac{n_c}{n_b} - 1}; \quad F_1 = \frac{F (n_c - 1)}{\frac{n_c}{n_b} - 1}; \quad F_1 = 40 \text{ см.}$$

287. Показатель преломления жидкости внутри глаза очень близок к показателю преломления воды. Поэтому в воде роговица почти не преломляет свет, и глаз становится очень дальновзорким. В маске преломляющие свойства роговицы сохраняются.

288. Приняв в формуле оптической силы линзы, в соответствии с условием задачи, $R_1 = R_2 = F$, находим $\frac{1}{F} = \frac{(n - 1) 2}{F}$. Отсюда $n = 1,5$.

289. Скорость распространения красных лучей $v = \frac{c}{n}$, а фиолетовых $v_1 = \frac{c}{n_1}$, следовательно, $v - v_1 = \frac{c}{n} - \frac{c}{n_1}$; $v - v_1 = 2160 \text{ км/сек.}$

290. $\lambda = cT$ и $\lambda_1 = vT$, а отношение $\frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{cT}{vT} = n$, отсюда $n = \frac{\lambda}{\lambda_1} = 1,335$.

291. При рассматривании через красное стекло красная надпись не будет видна на красном фоне бумаги, поэтому надпись надо рассматривать через зеленое стекло. При этом надпись будет видна черной на зеленом фоне бумаги, так как красный свет от надписи плохо проходит сквозь зеленое стекло.

292. Синяя ниже, а красная выше.

293. Нельзя.

294. Нет. Наличие минимумов освещенности в интерференционной картине означает, что световая энергия не поступает в данные участки пространства.

295. Длинноволновая граница фотоэффекта λ_0 — это та максимальная длина волны, при которой еще наблюдается фотоэффект. Для λ_0 уравнение Эйнштейна принимает вид: $h\nu_0 = A$, где A — работа выхода электрона, h — постоянная Планка. Выражая частоту ν_0 через длину волны λ_0 , получим:

$$A = \frac{hc}{\lambda_0}; \quad A = 3,7 \cdot 10^{-19} \text{ дж.}$$

296. Максимальную длину волны находим из уравнения $h\nu_0 = A$, или $\frac{hc}{\lambda_0} = A$; $\lambda_0 = \frac{hc}{A}$; $\lambda_0 = 310 \text{ нм.}$

297. Длина волны определяется из уравнения Эйнштейна:

$$h\nu = \frac{mv^2}{2} + A, \text{ или } \frac{ch}{\lambda} = \frac{mv^2}{2} + A;$$

отсюда находим $\lambda = 1,81 \text{ нм.}$

298. Запишем формулу Эйнштейна для обоих случаев фотоэффекта:

$$\frac{ch}{\lambda} = \frac{mv^2}{2} + A; \quad \frac{ch}{\lambda_1} = \frac{mv_1^2}{2} + A.$$

Вычитая из первого выражения второе, получим

$$ch \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_1} \right) = \frac{m}{2} (v^2 - v_1^2),$$

откуда $h = 6,7 \cdot 10^{-34} \text{ дж} \cdot \text{сек.}$

299. Запишем уравнение Эйнштейна для обоих случаев:

$$\frac{hc}{\lambda} = A + \frac{mv^2}{2}; \quad \frac{hc}{\lambda_1} = A + \frac{mv_1^2}{2}.$$

По условию задачи $\frac{mv^2}{2} = eU$ и $\frac{mv_1^2}{2} = eU_1$. Подставляя значение кинетических энергий электрона в уравнения Эйнштейна и учитывая, что $\lambda_1 = \lambda - \Delta\lambda$ и $U_1 = U + \Delta U$, получим:

$$\frac{hc}{\lambda} = A + eU; \quad \frac{hc}{\lambda - \Delta\lambda} = A + e(U + \Delta U).$$

Из этих уравнений исключим работу A и решим их относительно заряда электрона:

$$e = \frac{hc \Delta\lambda}{\Delta U (\lambda - \Delta\lambda) \lambda}; \quad e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ к.}$$

300. $2,3 \cdot 10^4$ кат · ч.

302. 8 и 6.

303. ${}_4\text{Be}^9 + {}_1\text{H}^2 \rightarrow {}_5\text{B}^{10} + {}_0n^1$. Выбрасывается нейтрон.

304. ${}_5\text{B}^{10} + {}_2\text{He}^4 \rightarrow {}_7\text{N}^{13} + {}_0n^1$; ${}_7\text{N}^{13} \rightarrow \beta^+ + {}_6\text{C}^{13}$.

305. ${}_7\text{N}^{13} \rightarrow \beta^+ + {}_6\text{C}^{13}$. Излучается позитрон.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абсолютная шкала температур 122
 Абсолютный нуль 122
 Абсцисса 14
 Адиабатический процесс 136
 Аккомодация 286
 Акустика 88
 Альтиметр 101
 Аморфное тело 145
 Ампер А. М. 212
 Амплитуда 81
 Анеронд 101
 Анизотропия 145
 Антенна 246
 Апогей 75
 Аргумент 13
 Архимед 97
 Атмосфера техническая 101
 — физическая 100
 Атом 108, 309
 Атомная единица массы 111
 Атомный вес 111
 Баллистическая кривая 65
 Барограф 101
 Барометр металлический 101
 — ртутный 101
 Беккерель А. А. 309
 Больцман Л. 108
 Бор Н. 314
 Ватт 51
 Вектор, векторная величина 16
 Вес 33, 73
 Винт 59
 Влажность абсолютная 137
 — относительная 137
 Возгонка 131
 Волна звуковая 88
 — поперечная 87
 — продольная 87
 — ударная 88
 — электромагнитная 245, 246
 Ворот 56
 Выпрямитель ламповый 238
 Высота тона 89
 Высотомер 101
 Гагарин Ю. А. 37
 Гальванопластика 196
 Гальваностегия 196
 Гей-Люссак Ж. 120
 Геометрическая оптика 255
 Генератор переменного тока 231
 — постоянного тока 232
 Герц Г. 246, 291
 Гигрометр 137
 Гидравлический пресс 95
 Глаз 285
 Гравитационная постоянная 70
 График пути 15
 — скорости 14
 Громкоговоритель 216
 Громкость 89
 Гюйгенс Х. 83, 291
 Давление атмосферное 94, 100
 — гидростатическое 95
 — динамическое 103
 — света 291
 — статическое 103
 — полное 103
 Двигатель внутреннего сгорания 155
 Движение броуновское 109
 — вихревое 103
 — волновое 87
 — вращательное 10
 — жидкости и газа 102
 — колебательное 80
 — криволинейное 11, 63
 — ламинарное 102
 — неравномерное 19
 — поступательное 10
 — равномерное по окружности 67
 — равномерное прямолинейное 11
 — слоистое 102
 — турбулентное 103
 Детектор кристаллический 249
 Деформация остаточная 145
 — растяжения 145
 — упругая 145
 Джоуль Дж. 108
 Джоуль (единица) 50
 Дина 33
 Динамика поступательного движе-
 ния 29
 Диод 238
 Диоптрия 275
 Дисперсионная кривая 293
 Дисперсия света 292
 Диссоциация 194

- Дифракция света 300
 Диффузия 109
 Диэлектрик 157
 Длина волны 87
 Дьюара — Линде метод сжижения газов 136
 Дэви Г. 150
 Закон Архимеда 97
 — Бернулли 103
 — Бойля — Мариотта 118
 — всемирного тяготения 70
 — Гей-Люссака 119
 — Гука 146
 — Джоуля — Ленца 192
 — инерции 30
 — Кирхгофа 294
 — Кулона 158
 — Ньютона (первый, второй, третий) 29, 30, 32, 34
 — Ома 178
 — Паскаля 94
 — равенства работ 57
 — Содди — Фаянса 310
 — сообщающихся сосудов 96
 — сохранения количества движения 36
 — сохранения энергии 54
 — Шарля 121
 Законы идеальных газов 118
 — освещенности 259
 — отражения света 261
 — преломления света 269
 — Фарадея 193
 Затвердевание 129
 Звук 88
 Изобара 120
 Изображение в линзах, зеркалах 265, 276
 Изолятор 157
 Изотерма 119
 Изотропия 145
 Изохора 121
 Индуктивность 223
 Индукция магнитная 210
 — электростатическая 163
 Инертность 31
 Инерция 30
 Интерференция света 298
 Ионизация газов 198
 Ионосфера 100
 Испарение 130
 Калория 151
 Камера Вильсона 312
 Камертон 90
 Канинц П. Л. 136
 Карно С. 152
 Квант света 292
 Кепотрон 240
 Кибальчич Н. И. 37
 Килограмм 31, 33
 Килокалория 151
 Кинематика 11
 Кипение 133
 Кирхгоф Г. 294
 Клапейрон Б. П. Э. 123
 Клаузиус 108
 Клиш 57
 Когерентные волны 298
 Колебания вынужденные 86
 — гармонические 81
 — затухающие 85
 — свободные 85
 — собственные 85
 — электрические 243
 Количество движения 36
 — теплоты 127
 Конденсатор 171
 Конденсация 131
 Контур колебательный 241
 Королев С. П. 37
 Коэффициент возвращающей силы 81
 — линейного расширения 114
 — объемного расширения 114
 — поверхностного натяжения жидкости 143
 — полезного действия 50, 152
 — трансформации трансформатора 235
 — трения скольжения 35
 — упругости 51
 Красная граница фотоэффекта 302
 Кристаллическое тело 144
 Критическая температура 136
 Кулон Ш. 158
 Кулон (единица) 159
 Курчатов И. В. 315
 Кэвендиш Г. 71
 Лавина электронная 190
 Лебедев П. Н. 292
 Ленин В. И. 7
 Ленц Э. Х. 191
 Линза рассеивающая 274
 — собирающая 274
 Ломоносов М. В. 8, 108, 150, 291
 Лупа 282
 Лучи α -, β -, γ - 310
 — инфракрасные 294
 — катодные 201
 — рентгеновские 296
 — ультрафиолетовые 294
 Люкс 260
 Люмен 259
 Люминесценция 132
 Магнитная постоянная 211
 — проницаемость 211
 — сила 208
 Магнитное поле кругового тока 209
 — прямого тока 208
 Магнитный поток 211

- Майкельсон А. 255
 Максвелл Дж. 108, 208, 291
 Манометр 101
 Масса 30, 73
 Массовое число 310
 Материальная точка 11
 Материя 7
 Маятник математический 82
 — пружинный 80
 — физический 82
 Механика 10
 — жидкостей и газов 94
 Механическое движение 10
 Микроскоп 283
 Микрофон 215
 Модуль Юнга 146
 Модуляция колебаний 247
 Молекула 108
 Молекулярно-кинетическая теория 108
 Момент силы 40
 Монохроматический свет 254
 Мощность 50
 Наклонная плоскость 56
 Напряжение 178
 Напряженность магнитного поля 211
 — электрического поля 165
 Невесомость 75
 Нейтрон 310
 Неравномерное движение 19
 Нит 259
 Нуклон 315
 Ньютон И. 29, 70, 291
 Ньютон (единица) 32
 Обертон 90
 Ом Г. 178
 Оптическая ось зеркала 264
 — линзы 274
 Оптический центр зеркала 263
 Ордината 14
 Освещенность 258
 — электрическая проницаемость 158
 Относительная магнитная проницаемость 211
 Относительное движение 10
 Пар насыщающий 132
 — ненасыщающий 132
 Паровые двигатели 153
 Парообразование 130
 Паскаль Б. 94
 Патон Е. О. 203
 Патон Б. Е. 203
 Петров В. В. 202
 Перигей 75
 Период 80
 Планк М. 292
 Плавление тел 57
 Плечо силы 40
 Плотность вещества 31
 — заряда поверхностная 162
 Побочная оптическая ось 265, 274
 Поверхностное натяжение 142
 Показатель преломления абсолютный 270
 — относительный 270
 Поле магнитное 208
 — электрическое 164
 — электромагнитное 245
 Ползунов И. И. 150
 Полное отражение 272
 Полупроводник 157
 Попов А. С. 246
 Постоянная Планка 292
 Потенциал 169
 Правило буравчика 208
 — левой руки 210
 — Ленца 219
 — правой руки 219
 Предельный угол 272
 Приборы магнитоэлектрические 217
 — электродинамические 218
 — электромагнитные 217
 Принцип независимости движений 64
 Проекционный аппарат 281
 Проектор 269
 Проницаемость диэлектрическая 158
 — магнитная 211
 Простые механизмы 56
 Протон 310
 Прочность 147
 Работа 49
 — выхода электрона 302
 — расширения газа 152
 Равновесие безразличное 43
 — неустойчивое 43
 — устойчивое 42
 Равнодействующая сила 39
 Радио 246
 Радиоактивность 309
 Радиолокация 251
 Радиопередатчик 247
 Радиоприемник 247
 Разложение сил 38, 41
 — скоростей 18
 Размерность 12
 Разряд дуговой 209
 — тлеющий 200
 Расширение тел 113, 114
 Рафинирование 195
 Резерфорд Э. 309, 313
 Резонанс 86, 90
 Реле 214, 304
 Рентгеновские лучи 295
 Реостат 181
 Рихман Г. В. 161
 Румфорд Б. 150
 Рычаг 40
 Самоиндукция 223
 Светимость 257
 Световод 273

- Свеча 259
- Сжижение газов 136
- Сила внутреннего трения 102
 - вязкости 102
 - квазиупругая 82
 - кулоновская 159
 - магнитная 208
 - поверхностного натяжения 143
 - света 257
 - сопротивления 35, 102
 - уравнивающая 39
 - центробежная 68
 - центростремительная 68
- Система единиц СИ 9
- СГСЭ 9
- Система отсчета 10
- Скаляр, скалярные величины 16
- Скорость вторая космическая 76
 - криволинейного движения 63
 - линейная 11, 67
 - мгновенная 20
 - первая космическая 75
 - света 255
 - средняя 19
 - угловая 67
- Славянов Н. Г. 203
- Смачивание 143
- Смещение 82
- Соколов С. Я. 91
- Сообщающиеся сосуды 96
- Сопротивление удельное 178, 179
- Спектральный анализ 296
- Спектр 294, 295
- Стерadian 257
- Столетов А. Г. 301
- Стратосфера 100
- Сублимация 131
- Сцинтилляция 311
- Счетчик Гейгера 311
- Текучесть 113, 142
- Телескоп 285
- Телефон 215
- Тембр 90
- Температурный коэффициент сопротивления 180
- Теплоемкость удельная 127
- Теплота парообразования 133
 - плавления 129
- Теплотворность топлива 128
- Течение стационарное 103
- Ток индукционный 219
 - электрический 176
 - переменный 227, 228
- Томсон Дж. 243
- Торричелли Э. 100
- Точечный источник света 254
- Точка росы 137
- Траектория 11
- Трансформатор 233
- Трение 35
- Триод 240
- Тропосфера 99
- Уатт Дж. 150
- Угол отражения 262
 - падения 262
 - преломления 270
- Удлинение 146
- Ультразвук 90, 91
- Уравнение равномерного движения 12
 - состояния газа 124
 - Эйнштейна 302
- Усагин И. Ф. 234
- Усилитель колебаний 249
- Ускорение 20
 - центростремительное 68
- Фаза 83
- Фарадей М. 194
- Флотация 143
- Фокальная плоскость 265, 274
- Фокус 265, 274
- Фосфоресценция 306
- Фотоаппарат 281
- Фотометр 260
- Фотон 292
- Фотоэлемент 304
- Фотоэффект 301
- Фраунгоферовы линии 295
- Френель О. 291
- Френкель Я. И. 141
- Функция 13
- Хренов К. К. 203
- Центр тяжести 41, 42
- Циолковский К. Э. 37
- Частота 67, 81
- Число Авогадро 110
- Шарль Ж. А. С. 121
- Шумы 88
- Емкость 171, 172
- Электролиз 193
- Электромагнит 214
- Электроннолучевая трубка 250
- Электрохимический эквивалент 194
- Эмиссия термоэлектронная 238
- Энергия кинетическая 53
 - механическая 51, 53
 - световая 257
- Эрг 50
- Эхо 90
- Юнг Т. 291
- Яблочков П. Н. 202, 234
- Ядро атома 309, 310, 315
- Якоби Б. С. 196
- Яркость 258

75 коп.