

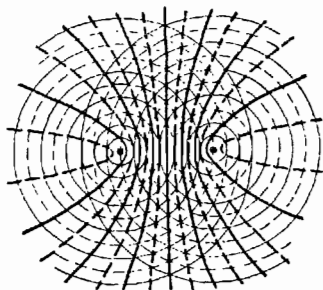
ФИЗИКА в ГРАФИКАХ



МИНСК
1964

М. С. ЦЕДРИК, Е. В. БИРИЧ,
Г. П. МАКЕЕВА, И. Ф. САВИЦКАЯ

ФИЗИКА В ГРАФИКАХ



ИЗДАТЕЛЬСТВО
«ВЫСШАЯ ШКОЛА»
МИНСК 1964

Под редакцией
дидата физико-математических н
доцента **М. С. Цедрика**

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	7
-----------------------	---

I. МЕХАНИКА

§ 1. Перемещение-вектор	10
§ 2. Основные виды механического движения абсолютно твердого тела	—
§ 3. Различные виды механического движения материальной точки	12
§ 4. Графики ускорений	—
§ 5. Свободное падение тел	—
§ 6. Годографы скорости различных видов движения	14
§ 7. Траектории движения точек катящихся кругов	18
§ 8. Движение тела, брошенного под углом к горизонту	20
§ 9. Второй закон Ньютона	—
§ 10. Напряженность поля тяготения	—
§ 11. Равномерное движение по окружности	—
§ 12. Работа	22
§ 13. Мощность	—
§ 14. Энергия тел	24
§ 15. Удар тел	—

§ 16.	Трение	26
§ 17.	Деформация тел	—
§ 18.	Гидростатика	34
§ 19.	Гидродинамика и аэродинамика	36
§ 20.	Колебательное движение	42
§ 21.	Вынужденные колебания	44
§ 22.	Сложение колебаний	—
§ 23.	Спектры незатухающих колебаний	54
§ 24.	Автоколебания	56
§ 25.	Волны	—

II. АКУСТИКА

§ 26.	Распространение звука	60
§ 27.	Гидроакустика	66
§ 28.	Графики звуковых колебаний	68
§ 29.	Физиологическая акустика	72
§ 30.	Архитектурная акустика	80

III. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕПЛОТА

§ 31.	Молекулярное движение	84
§ 32.	Тепловое расширение тел	—
§ 33.	О движении тепловой энергии	88
§ 34.	Теплоемкость	90
§ 35.	Идеальный газ	94
§ 36.	Газ в поле тяготения	98
§ 37.	Закон распределения молекул по скоростям	100
§ 38.	Реальные газы и пары	102
§ 39.	Жидкости	106
§ 40.	Твердое состояние вещества	114
§ 41.	Технические циклы	126

IV. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

§ 42.	Примеры применения теоремы Остроградского—Гаусса к расчету электрических полей	132
§ 43.	Проводники в электрическом поле	—
§ 44.	Диэлектрики в электрическом поле	—
§ 45.	Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики	136

		0
§ 46.	Законы постоянного тока	14 ²
§ 47.	Ток в металлах и сплавах	14 ²
§ 48.	Сверхпроводимость	144
§ 49.	Термоэлектричество	146
§ 50.	Ток в диэлектриках	148
§ 51.	Ток в полупроводниках	150
§ 52.	Ток в электролитах	156
§ 53.	Ток в газах	158

V. МАГНЕТИЗМ

§ 54.	Магнитное поле токов	16 ²
§ 55.	Магнитные свойства веществ	—
§ 56.	Электромагнитная индукция	17 ¹
§ 57.	Переменный ток	17 ¹
§ 58.	Электрические колебания	17 ¹
§ 59.	Электронные лампы	17 ¹
§ 60.	Электромагнитные волны	18

VI. ОПТИКА

§ 61.	Отражение света	18
§ 62.	Преломление света	—
§ 63.	Сферическая аберрация	19
§ 64.	Дисперсия света	—
§ 65.	Глаз и его свойства	19
§ 66.	Дифракция света	19
§ 67.	Интерференция света	20
§ 68.	Поляризация света	—
§ 69.	Излучение света	2
§ 70.	Поглощение света	2
§ 71.	Люминесценция	2
§ 72.	Фотоэффект	2
§ 73.	Фотоэлементы	—
§ 74.	Фотосопротивления	2
§ 75.	Рентгеновское излучение	—

VII. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

§ 76.	Строение атома	;
§ 77.	Радиоактивное излучение	;

§ 78. Взаимодействие радиоактивных излучений с веществом	221
§ 79. Ядерные реакции и атомная энергия	227
§ 80. Использование атомной энергии	228
§ 81. Космические лучи	—
Литература	234
Приложение	237

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга представляет собой справочник по графическому материалу. В него включено большое количество графиков и чертежей, иллюстрирующих отдельные вопросы курса физики. При составлении справочника особое внимание было обращено на подбор графиков по новейшим областям физики (пластмассы, сегнетоэлектрики, полупроводники, физика ядра и т. п.).

Справочник рассчитан на студентов техникумов и первых двух курсов вузов, на студентов-заочников. Он явится также ценным пособием для преподавателей физики в средних школах, техникумах.

Справочник состоит из семи разделов: механика, акустика (составитель Е. В. Бирич), молекулярная физика и тепло (составитель М. С. Цедрик), электричество, магнетизм (составитель И. Ф. Савицкая), оптика, ядерная физика (составитель Г. П. Макеева).

I. МЕХАНИКА

- A — амплитуда
 a — ускорение
 a_n — ударная вязкость
 C_x — коэффициент лобового сопротивления
 C_y — коэффициент подъемной силы
 d — диаметр
 E — напряженность поля тяготения
 E — модуль упругости
 F — сила
 h — высота; глубина
 l — длина
 m — масса
 p — давление
 q — нагрузка
 R — радиус
 S — площадь сечения
 s — путь; расстояние
 T — период
 T — температура, °K
 t — температура, °C
 V — объем
 v — скорость
 W — энергия
 x — смещение
 γ — удельный вес
 Δl — абсолютное удлинение
 δ — коэффициент затухания
 ϵ — относительное удлинение
 η — коэффициент полезного действия
 λ — длина волны
 λ — коэффициент гидродинамического сопротивления
 μ — проницаемость
 ν — частота
 σ — напряжение
 $\sigma_{пр}$ — предел прочности
 τ — время
 ω — угловая скорость

§ 1. ПЕРЕМЕЩЕНИЕ-ВЕКТОР

Рис. 1. Разница между перемещением и длиной пути.

Одно и то же перемещение может быть получено в результате самых разнообразных движений (B , B' , B''), отличающихся как траекторией, так и длиной пути и временем прохождения. Если указано перемещение, то еще ничего нельзя сказать о том, каким образом оно было осуществлено (A — начальная точка, C — конечная точка движения).

§ 2. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ МЕХАНИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ АБСОЛЮТНО ТВЕРДОГО ТЕЛА

Рис. 2. Поступательное движение спаррика.

Механизм состоит из кривошипов AB и CD одинаковой длины, посаженных на валы A и D и соединенных спарником BC , длина которого равна расстоянию между осями валов AD (подобным образом соединяются между собой ведущие колеса паровоза).

Ясно, что при всех положениях механизма фигура $ABCD$ будет параллелограммом. Значит, спарник BC остается параллельным прямой AD и, следовательно, совершает поступательное движение.

Рис. 3. Поступательное движение компаса.

Пунктирная линия изображает траекторию, описываемую осью стрелки компаса. Стрелки на рисунке показывают ряд последовательных положений стрелки компаса.

Рис. 4. Поступательное движение тела, имеющего форму стержня.

Средняя точка C при движении описывает окружность с центром O . Траекториями движения точек A и B являются две одинаковые окружности с различными центрами (O' , O'').

Рис. 5. Вращательное движение тела, имеющего форму стержня.

Средняя точка C при движении описывает окружность с центром O , остальные точки двигаются по концентрическим окружностям.

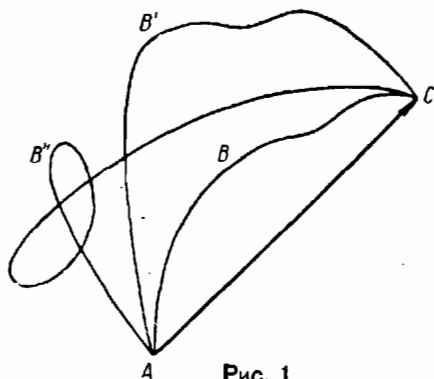


Рис. 1

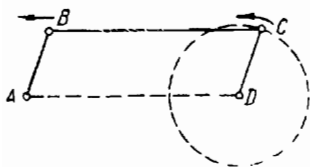


Рис. 2



Рис. 3

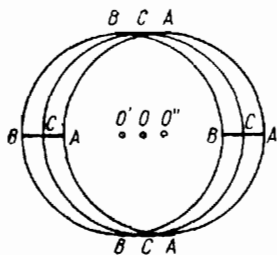


Рис. 4

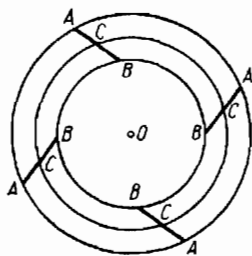


Рис. 5

§ 3. РАЗЛИЧНЫЕ ВИДЫ МЕХАНИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

Р и с. 6. Графики пути (а) и графики скорости (б).

§ 4. ГРАФИКИ УСКОРЕНИЙ

Р и с. 7. Ускорение равноускоренного (а) и переменнo-ускоренного движения (б).

§ 5. СВОБОДНОЕ ПАДЕНИЕ ТЕЛ

Р и с. 8. Зависимость пути и скорости при свободном падении от времени при различном значении начальной скорости:

v_0 — начальная скорость, v_∞ — предельная.

При свободном падении тел существенное значение (еще большее, чем изменение ускорения g с высотой) имеет сопротивление воздуха.

Для очень малых частиц (пыль) это сопротивление, как при движении в вязкой среде, считают пропорциональным первой степени скорости.

Уравнение движения для этого случая следующее:

$$\frac{dv}{dt} = g - kv,$$

первый и второй интегралы которого будут:

$$v = v_\infty + (v_0 - v_\infty) e^{-kt},$$

$$s = v_\infty t + \frac{v_0 - v_\infty}{k} (1 - e^{-kt}).$$

Если скорость падения приближается к величине скорости звука, то сопротивление воздуха подчиняется значительно более сложному закону и дифференциальное уравнение движения будет

$$\frac{dv}{dt} = g - f(v).$$

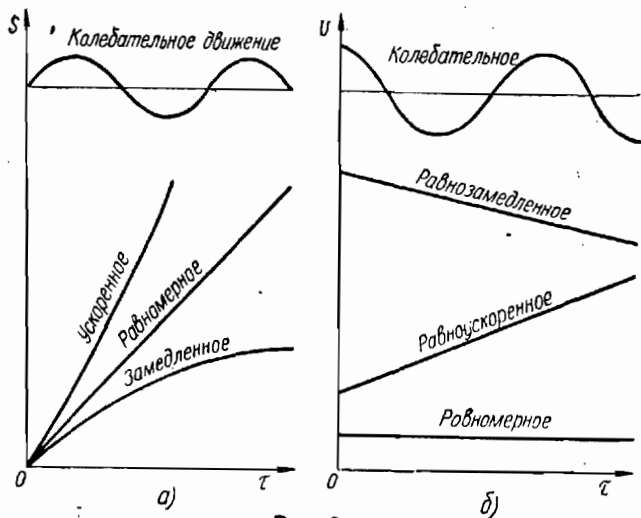


Рис. 6

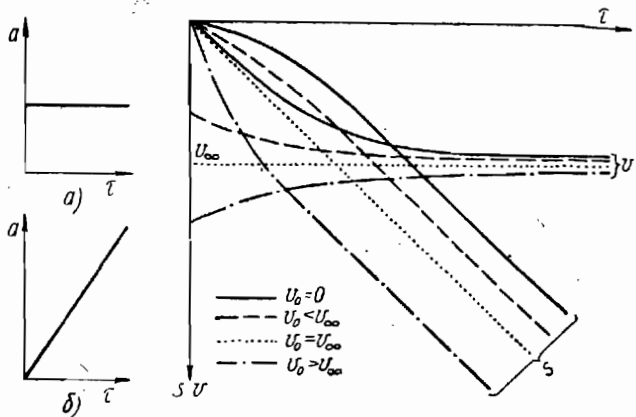


Рис. 7

Рис. 8

§ 6. ГОДОГРАФЫ СКОРОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ДВИЖЕНИЯ

Рис. 9. Равномерное движение по окружности (а). Годограф (б).

Уравнение траектории при произвольном движении материальной точки следующее:

$$\bar{r}(t) = \bar{r}_1(s),$$

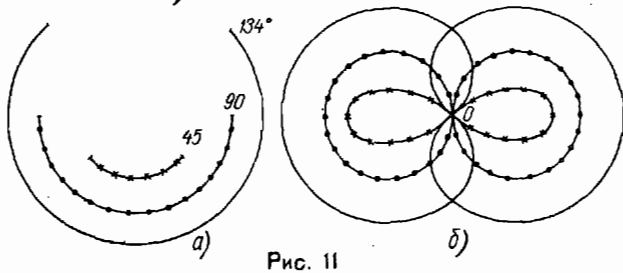
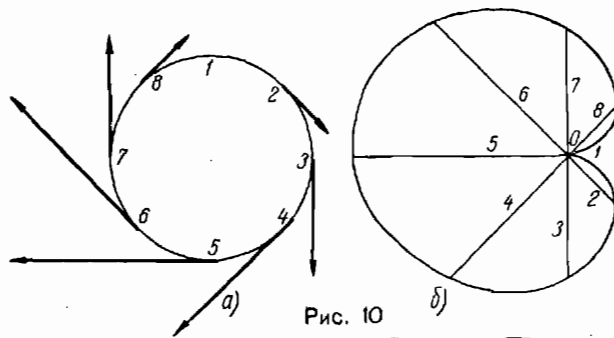
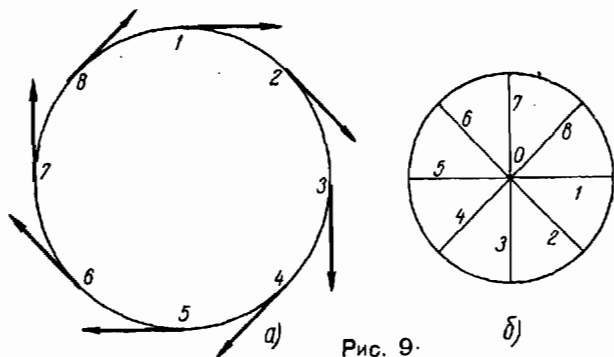
где s — длина дуги или какой-либо другой параметр, определяющий положение отдельных точек траектории, \bar{r} — радиус-вектор материальной точки в момент t .

Откладывая векторы скорости \bar{v} для всех точек траектории из одной точки O , получаем наглядную картину изменения скорости движения.

В то время как материальная точка пробегает траекторию $\bar{r} = \bar{r}(t)$, конец вектора \bar{v} описывает некоторую пространственную кривую, которая и носит название годографа.

Рис. 10. Движение тела по окружности в вертикальной плоскости (а). Годограф (б).

Рис. 11. Математический маятник с амплитудами 45, 90, 134° (а). Годограф (б).



Р и с. 12. Движение тела, брошенного под углом к горизонту (а). Годограф (б).

Р и с. 13. Кривая брошенного тела (а), кривая скорости, или годограф (б), кривая ускорений, или годограф годографа (в).

При плоском движении годограф есть плоская кривая, например для эллиптического движения планет — это окружность.

Уравнение годографа имеет вид

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}.$$

Откладывая все векторы ускорения

$$\vec{a} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2}$$

из одной точки O , получаем годограф второго порядка.

Годографом в сейсмологии называется кривая, выражающая зависимость между временем пробега сейсмического луча от эпицентра до точки наблюдения и эпицентральной дистанцией, т. е. расстоянием от эпицентра до точки наблюдения, измеренным по дуге большого круга на поверхности Земли.

Вид кривой годографа зависит от распределения скоростей сейсмических волн внутри Земли. Так как закон изменения скоростей в толще Земли неизвестен, то в сейсмологии обычно поступают наоборот: зная вид годографа, определяют скорости сейсмических волн.

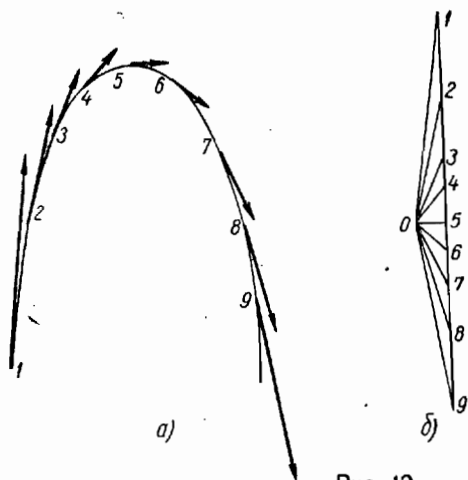


Рис. 12

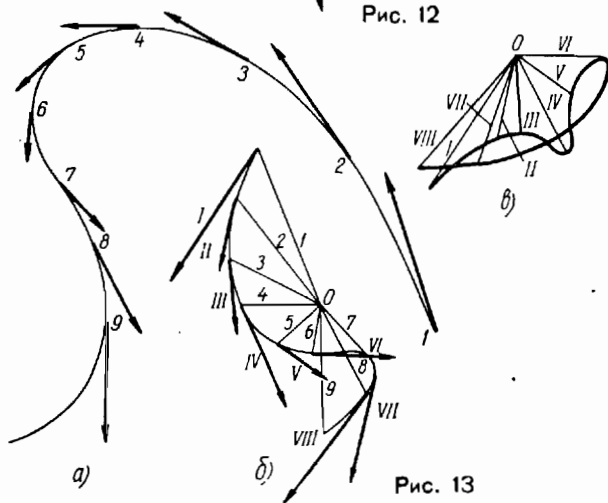


Рис. 13

§ 7. ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ТОЧЕК КАТЯЩИХСЯ КРУГОВ

Рис. 14. Циклоида.

Циклоида — траектория, описываемая точкой окружности, катящейся без скольжения по прямой (*a*). Если эту прямую принять за ось *x*, то координаты точек циклоиды, проходящей через начало координат, можно представить в виде функции φ -угла поворота окружности относительно ее начального положения (при котором точка касания окружности с осью *x* находилась в начале координат):

$$x = R(\varphi - \sin \varphi), \quad y = R(1 - \cos \varphi),$$

где *R* — радиус окружности. Значения $\varphi = 0; \pm 2\pi; \pm 4\pi$ и т. д. отвечают точкам возврата циклоиды.

Длина дуги между двумя соседними точками возврата циклоиды равна $8R$; площадь, ограниченная этой дугой и осью *x*, равна $3\pi R^2$.

Точки, неподвижно связанные с катящейся окружностью, описывают трохойды — удлиненные циклоиды (*b*), если они лежат вне окружности, и укороченные циклоиды (*в*), если они лежат внутри ее.

Уравнение трохойды имеет вид:

$$x = R(\varphi - k \sin \varphi), \quad y = R(1 - k \cos \varphi).$$

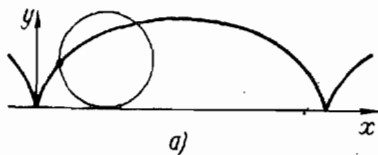
Значениям $k < 1$ соответствуют укороченные циклоиды, при $k > 1$ получаются удлиненные циклоиды.

Рис. 15. Качение одного круга по внешней стороне другого, одинаковой величины (*a*) и в два раза большего (*б*).

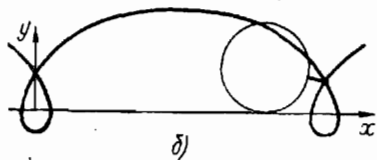
Рис. 16. Качение одной окружности внутри другой с радиусом, в четыре раза большим.

Рис. 17. Качение одной окружности внутри другой с радиусом, в два раза большим:

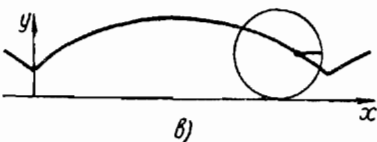
1 — путь первой точки горизонтального диаметра в начальном положении, 2 — второй, 3 — третьей, 4 — четвертой, 5 — пятой.



a)

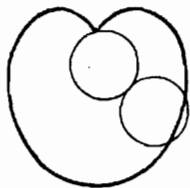


б)

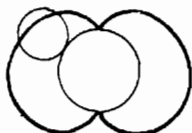


в)

Рис 14



a)



б)

Рис 15

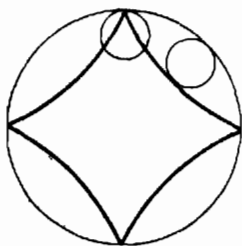
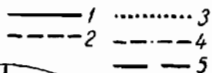


Рис. 16

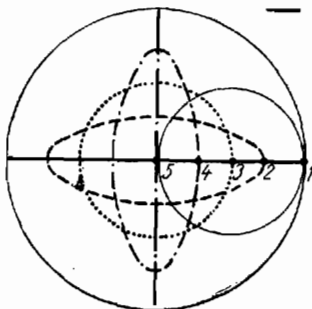


Рис. 17

§ 8. ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ПОД УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ

Рис. 18. Графический способ определения дальности полета (l) и наибольшей высоты подъема (h_1, h_2, h_3) для тел, брошенных под углами $30^\circ, 45^\circ$ и 60° .

Графическое решение данной задачи может быть такое. Из начала координатных осей проводим лучи под данными углами, на которых в установленном масштабе откладываем отрезки, равные скорости. Из точек отложения опускаем пунктирные вертикальные лучи, на которых в том же масштабе откладываем пути, проходимые свободно падающим телом за 1, 2, 3 сек, т. е. 4,9 м, 19,6 м, 44,1 м. По полученным точкам строим параболы — траектории движения.

§ 9. ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Рис. 19. Зависимость между силой и ускорением при постоянной массе.

§ 10. НАПРЯЖЕННОСТЬ ПОЛЯ ТЯГОТЕНИЯ

Рис. 20. Величина напряженности поля тяготения на различных расстояниях от центра однородного сплошного шара.

§ 11. РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ

Рис. 21. Зависимость центростремительной силы от линейной скорости.

Рис. 22. Зависимость центростремительной силы от радиуса обращения.

Рис. 23. Зависимость линейной скорости точек диска от радиуса обращения:
 n — число оборотов.

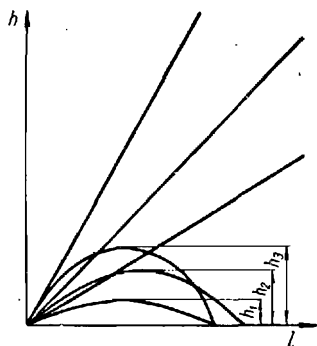


Рис. 18

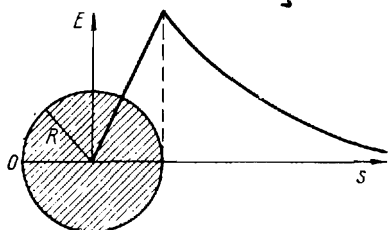


Рис. 20

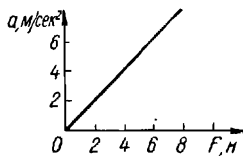


Рис. 19

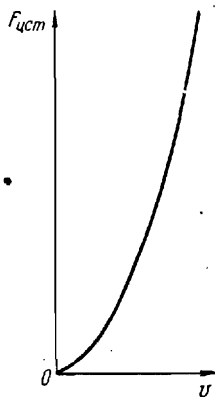


Рис. 21

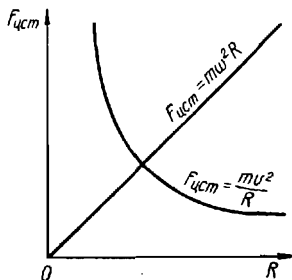


Рис. 22

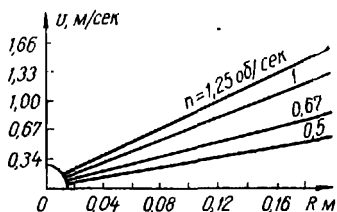


Рис. 23

Р и с. 24. «Мертвая петля», начерченная Н. Е. Жуковским.

Н. Е. Жуковский в работе «О парении птиц» (1891) анализировал проблему динамики полета птиц. Для движения центра тяжести птицы при различных условиях он нашел ряд возможных фугоид — криволинейных траекторий полета (A, B, C, D), среди которых была замечательная траектория в виде «мертвой петли» (A).

§ 12. РАБОТА

Р и с. 25. Работа постоянной (a), возрастающей (b) и уменьшающейся силы (c).

Р и с. 26. Работа брошенного тела в поле тяготения.

При бросании тела в поле тяготения под углом к горизонту совершается определенная работа, которая по отношению к телу будет отрицательной; на графике она изображается под осью x -ов.

При падении по второй половине параболы тело совершает такой же величины положительную работу, которая на графике показана над осью x -ов.

§ 13. МОЩНОСТЬ

Р и с. 27. Зависимость силы тяги ($F_{\text{тяги}}$) от скорости движения машины при одной и той же мощности.

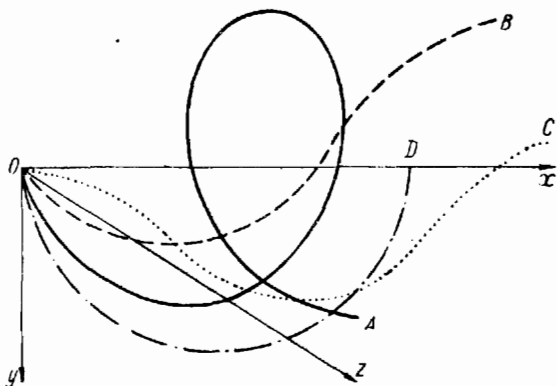


Рис. 24

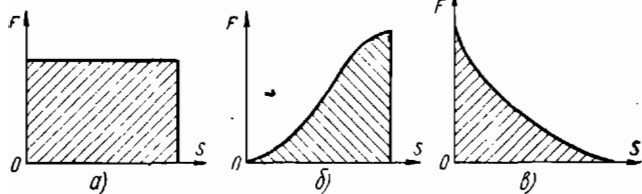


Рис. 25

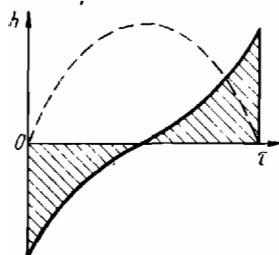


Рис. 26

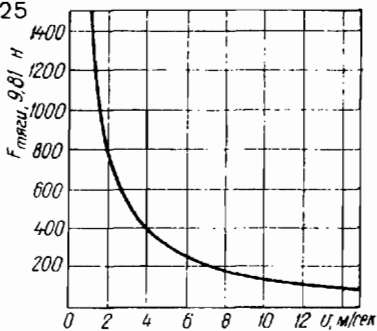


Рис. 27

§ 14. ЭНЕРГИЯ ТЕЛ

Р и с. 28. Зависимость потенциальной энергии ($W_{\text{потенц}}$) брошенного вертикально вверх тела от высоты подъема.

Р и с. 29. Потенциальная (1), кинетическая (2) и полная (3) энергия маятника, совершающего незатухающие колебания.

Р и с. 30. Зависимость между скоростью и массой для различных значений кинетической энергии ($W_{\text{кинет}}$).

§ 15. УДАР ТЕЛ

Р и с. 31. Изменение силы взаимодействия при ударе упругих тел.

Процесс удара можно разделить на две фазы. В течение первой фазы происходит сближение тел. Оба тела производят работу против сил реакции, их общая кинетическая энергия уменьшается, относительная скорость также уменьшается до нуля. Вслед за этим наступает вторая фаза: тела начинают удаляться друг от друга, восстанавливая свою форму, при этом силы реакции совершают положительную работу, кинетическая энергия системы растет, относительная скорость, переменяв знак, увеличивается по абсолютной величине, наконец, тела отдаляются, и этим заканчивается процесс удара. Длительность взаимодействия измеряется тысячными долями секунды. За это время сила доходит до своего максимального значения, затем падает до нуля.

Р и с. 32. Зависимость кинетической энергии ударившего шара от отношения $\frac{m_1}{m_2} = x$.

$$W_{\text{кинет}} = \frac{(x-1)^2}{(x+1)^2} W_0.$$

где W_0 — начальная энергия ударившего шара.

При $m_2 = 2m_1$ энергия ударившего шара составляет всего 6% от начальной энергии, при $m_2 = m_1$ она обращается в нуль, а затем с уменьшением m_2 опять медленно возрастает.

Р и с. 33. Продолжительность удара (τ) стального шара радиусом $1,475 \cdot 10^{-2}$ м о такой же покоящийся шар.

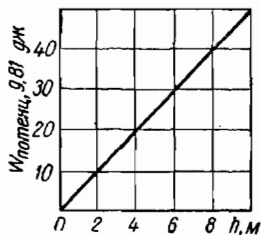


Рис. 28

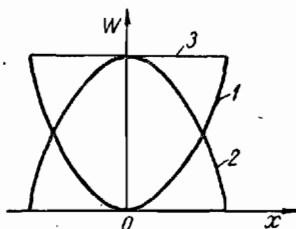


Рис. 29

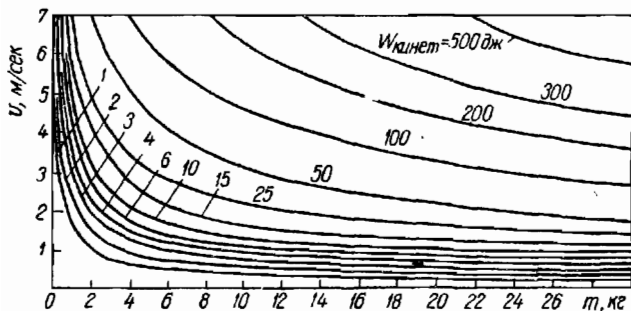


Рис. 30



Рис. 31

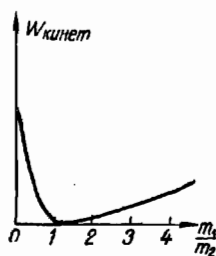


Рис. 32

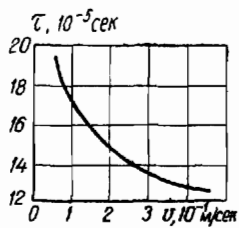


Рис. 33

Р и с. 34. Продолжительность удара стального стержня ($0,2 \times 0,01$ м) о покоящийся стержень ($0,3 \times 0,01$ м).

Р и с. 35. Удар одного цилиндра о другой, покоящийся; длинный (2) толкает, короткий (1) в покое (а), короткий толкает, длинный в покое (б):

v_n — начальная скорость, v_k — конечная.

Отношение длин цилиндров 2 : 1.

§ 16. ТРЕНИЕ

Р и с. 36. Зависимость между силой трения ($F_{тр}$) (силой тяги при равномерном движении) и силой нормального давления (F_p).

Р и с. 37. Зависимость силы трения от скорости:

1 — силы жидкого трения возникают при движении твердого тела в жидкости или газе, 2 — зависимость силы трения от скорости скольжения для разнородных материалов, 3 — сила трения скольжения для однородных твердых материалов или при специальной обработке соприкасающихся поверхностей.

§ 17. ДЕФОРМАЦИЯ ТЕЛ

Р и с. 38. Зависимость относительного удлинения от нагрузки.

Р и с. 39. Диаграмма растяжения мягкого железа.

Р и с. 40. Диаграмма растяжения:

1 — твердая сталь, 2 — мягкая сталь, 3 — сварное железо.

Все три кривые имеют прямолинейный участок, круто наклоненный к оси абсцисс, в пределах которого материалы вполне подчиняются закону Гука. Точка А на всех кривых соответствует пределу пропорциональности, с которым практически совпадает предел упругости. За пределом пропорциональности удлинения начинают увеличиваться быстрее нагрузок, и после так называемой «критической» точки (точка В) удлинение может возрастать без увеличения нагрузки.

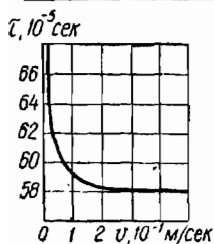
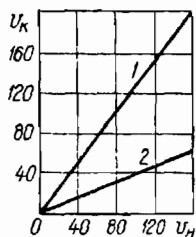
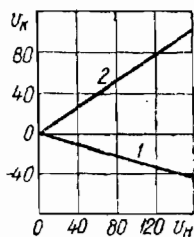


Рис. 34



а)



б)

Рис. 35

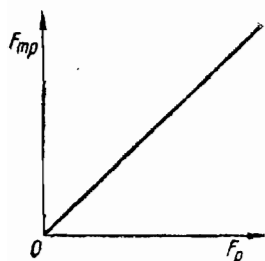


Рис. 36

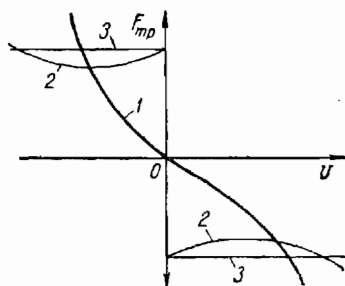


Рис. 37

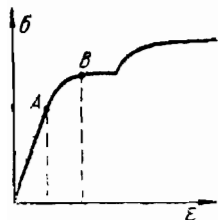


Рис. 38

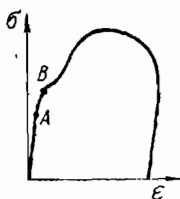


Рис. 39

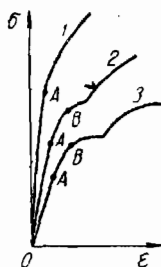


Рис. 40

Р и с. 41. Диаграмма растяжения, поясняющая явление наклепа.

В результате первого растяжения брусок удлинится на величину остаточной деформации OE , сохраняющейся неопределенно долго при полном устранении нагрузки. Если теперь повторить испытание механических свойств бруска, т. е. снова начать его растягивать, то предел пропорциональности будет достигнут при значительно большем напряжении, чем при первоначальном испытании (точка F), так как упругость бруска увеличилась. Предварительный переход за предел пропорциональности «закаляет» материал. Это явление называется наклепом.

Р и с. 42. Зависимость прочности от площади поперечного сечения.

Постоянство прочности тела наблюдается только в том случае, если тело не имеет слишком малого сечения и если оно однородно по своей структуре: При очень малом поперечном сечении для хрупких тел может наблюдаться увеличение прочности.

Р и с. 43. Зависимость предела прочности полиэтилена от температуры при растяжении:

1 — полиэтилен I, 2 — полиэтилен II.

Р и с. 44. Зависимость относительного удлинения полиэтилена от температуры при растяжении:

1 — полиэтилен I, 2 — полиэтилен II.

Р и с. 45. Изменение модуля упругости при растяжении стеклотекстолита ЗМД-130 с повышением температуры.

Р и с. 46. Зависимость прочности стеклопластов от содержания стеклянного волокна (%):

1 — при статическом изгибе, 2 — при растяжении.

Р и с. 47. Зависимость прочности стеклопластов от длины волокон:

1 — при статическом изгибе, 2 — при растяжении.

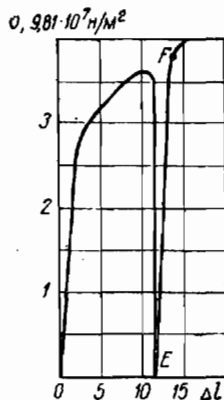


Рис. 41

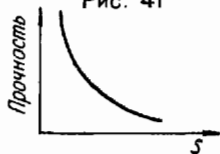


Рис. 42

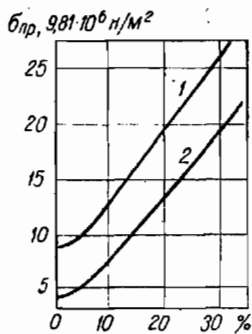


Рис. 46

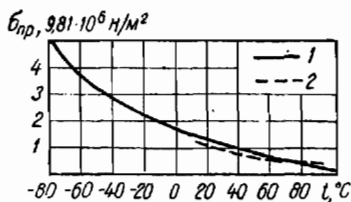


Рис. 43

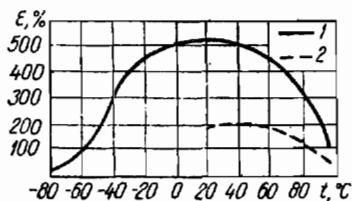


Рис. 44

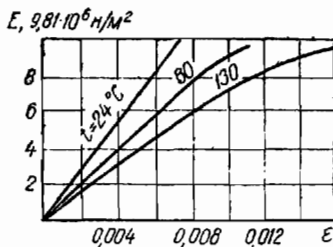


Рис. 45

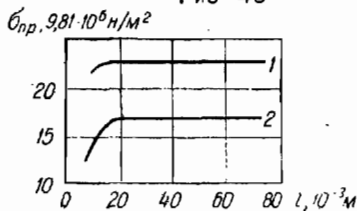


Рис. 47

Р и с. 48. Изменение свойств нестабилизированного полиэтилена в условиях атмосферного старения:

1 — удлинение (%), 2 — прочность (σ), 3 — пластичность (h_1), 4 — эластическая деформация ($h_2 - h_1$).

В зависимости от области использования полиэтилены I, II применяются в стабилизированном и нестабилизированном виде.

В полиэтилен в процессе его изготовления вводят небольшие количества противостарителей, которые снижают скорость старения полиэтилена и его композиции с полиизобутиленом. Полиэтилены, в которые введены противостарители, называются стабилизированными.

Р и с. 49. Изменение свойств нестабилизированного полиэтилена при ускоренном старении на вальцах при температуре 160° С:

1 — удлинение (%), 2 — прочность (σ), 3 — пластичность (h_1), 4 — эластическая деформация ($h_2 - h_1$).

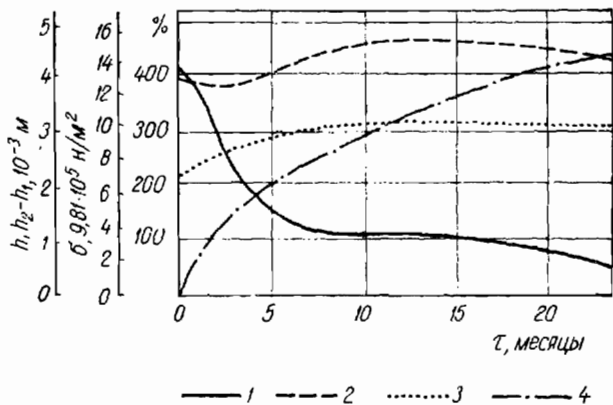


Рис 48

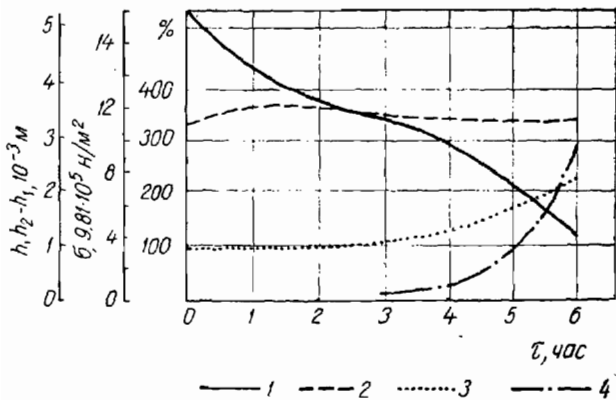


Рис. 49

Р и с. 50. Зависимость тягучести от проницаемости для одного из асфальтов при температуре 25°C :

1 — до прогрева, 2 — после прогрева при 177°C .

Тягучесть — способность растягиваться в направлении растягивающего усилия, приложенного вдоль прямой, в разные стороны. Проницаемость — свойство полужидких и полутвердых тел оказывать сопротивление внедрению в них тел стандартной формы при определенных условиях.

Проницаемость измеряется или временем, выраженным в секундах, в течение которого при данной нагрузке и температуре стандартное острие (или конус) внедряется в испытуемый продукт, или силой, выраженной в ньютонах, которую требуется приложить к острию (или конусу) для внедрения его в течение 1 мин на глубину 1 см.

Опытным путем установлено, что с возрастанием проницаемости увеличивается и тягучесть, сначала медленно, а затем очень резко.

Р и с. 51. Зависимость тягучести от температуры для одной из марок тринидадского асфальта:

1 — до прогрева, 2 — после прогрева до 177°C .

После прогрева зависимость тягучести от температуры становится менее заметной.

Р и с. 52. Диаграмма растяжения стеклотекстолита ВФТ-С при различной температуре:

1 — комнатная, 2 — 300°C , 3 — 250°C , 4 — 200°C , 5 — 350°C .

Р и с. 53. Зависимость предела прочности различных марок стеклотекстолита от температуры:

1 — ЭФ-32-301, 2 — ВФТ-С, 3 — ВФТ, 4 — КАСТ-В, 5 — ФН, 6 — 911-1 а, 7 — ЗМД-130, 8 — СТ-39, 9 — СКМ-1.

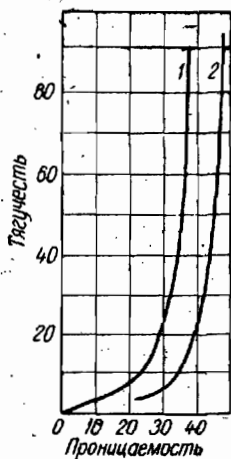


Рис. 50

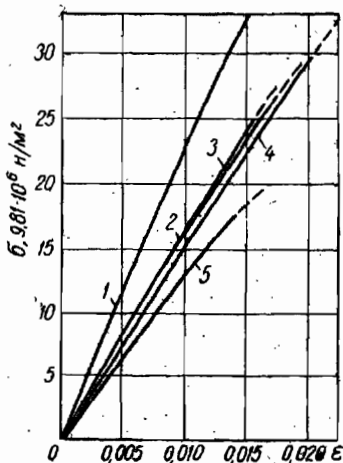


Рис. 52

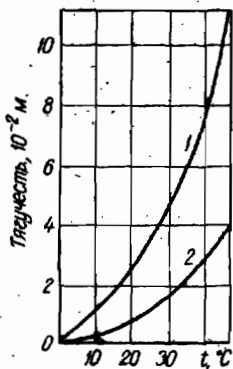


Рис. 51

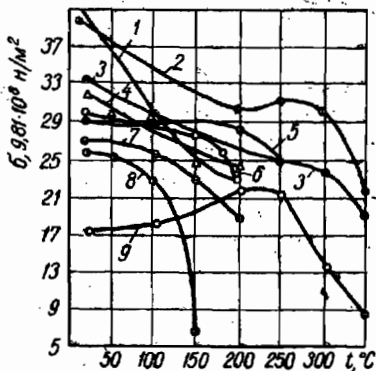


Рис. 53

Рис. 54. Длительная прочность стеклотекстолита ВФТ-С при различной температуре.

Рис. 55. Изменение объема жидкости при увеличении давления.

Начальный объем жидкости при атмосферном давлении условно принят за 100.

Слабее всех жидкостей сжимается ртуть. При больших давлениях ртуть при 0°C затвердевает. Очень малым коэффициентом сжатия обладает глицерин: при давлении $12,9,81 \cdot 10^7 \text{ н/м}^2$ его объем уменьшается лишь на 13%. Остальные жидкости сжимаются значительно сильнее: объем уменьшается на 20—30% при таком же давлении. Очень многие жидкости, так же как вода и ртуть, затвердевают при давлениях, значительно меньших $12,9,81 \cdot 10^7 \text{ н/м}^2$.

Вода принадлежит к сравнительно легко сжимаемым жидкостям.

§ 18. ГИДРОСТАТИКА

Рис. 56. Зависимость давления жидкости от глубины.

Рис. 57. Зависимость погружающейся части объема тела в различных тяжелых жидкостях от удельного веса жидкостей.

Рис. 58. Зависимость погружающейся части объема тел в воде от удельного веса тел.

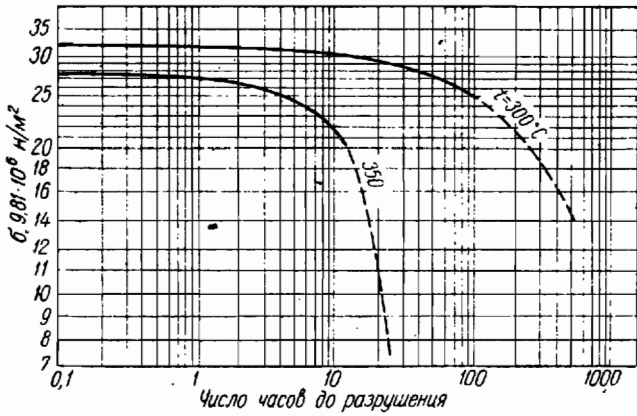


Рис 54

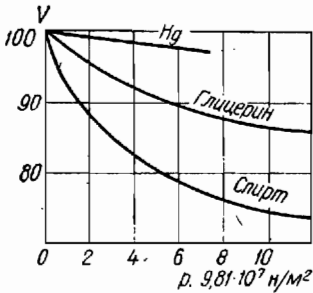


Рис. 55

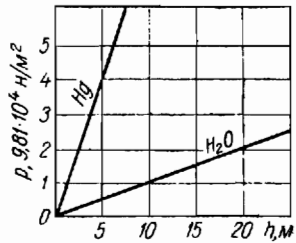


Рис. 56

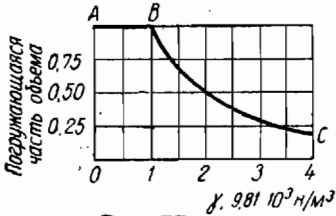


Рис. 57

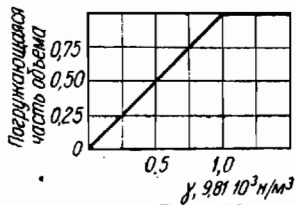


Рис. 58

§ 19. ГИДРОДИНАМИКА И АЭРОДИНАМИКА

Рис. 59. Зависимость предельного числа M , ограничиваемого конденсацией воздуха, от давления и температуры заторможенного потока.

Одной из основных особенностей аэродинамических труб является скорость потока в рабочей части, которую в аэродинамике больших скоростей характеризуют безразмерным числом M , представляющим отношение скорости газового потока v к скорости звука c : $M = v : c$.

В соответствии с величиной числа M аэродинамические трубы делятся на две основные группы: дозвуковые (при $M < 1$) и сверхзвуковые (при $M > 1$).

Особенностью аэродинамических труб больших чисел M ($M > 5$) является необходимость подогрева воздуха во избежание его конденсации в результате быстрого понижения температуры с ростом числа M .

Конденсация воздуха существенно изменяет параметры струи, вытекающей из сопла, и делает его (воздух) практически непригодным для аэродинамического эксперимента. Предельное число M , соответствующее началу конденсации воздуха, является функцией полного давления и начальной температуры T_0 газа, расширяющегося в сопле.

Рис. 60. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от числа M .

На графике показано влияние сжимаемости среды, характеризуемое числом M . Резкое увеличение C_x в околозвуковой области (волновой кризис) можно приостановить, если заострить конец тела и уменьшить его толщину.

Рис. 61. Лобовое сопротивление (Q) шара ($d = 1/4$ м) как функция скорости движения в воздухе.

Рис. 62. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от чисел Рейнольдса для диска, цилиндра и шара.

Рис. 63. Зависимость коэффициента лобового сопротивления (a) и коэффициента подъемной силы (b) от угла атаки (α).

Если тело имеет одну плоскость симметрии (самолет) и движется параллельно этой плоскости, то силовое воздействие среды характеризуется аэродинамическими коэффициентами (C_x , C_y), каждый из которых зависит от угла атаки.

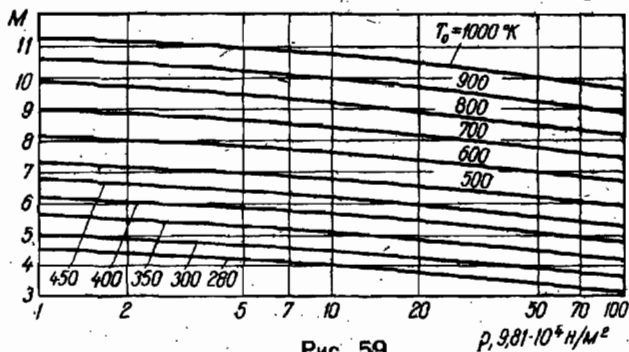


Рис. 59

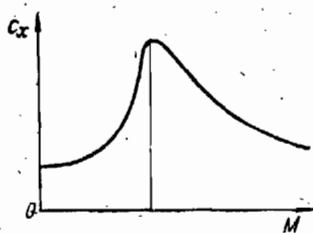


Рис. 60

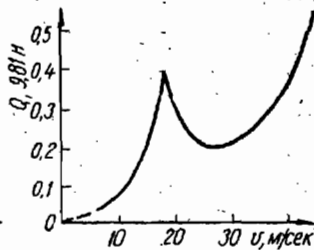


Рис. 61

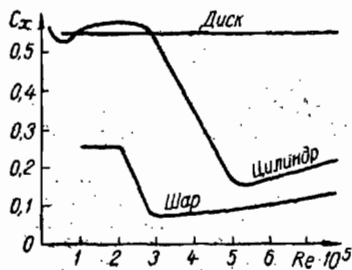


Рис. 62

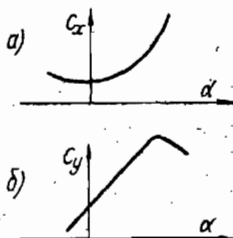


Рис. 63

Р и с. 64. Полярная диаграмма.

Зависимость коэффициента подъемной силы от коэффициента лобового сопротивления называется полярной диаграммой или полярой.

Р и с. 65. Зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления от чисел Рейнольдса.

При установившемся движении гидродинамическое сопротивление на единицу длины трубы определяется по формуле

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho v_{\text{ср}}^2}{2},$$

где l — длина рассматриваемого участка трубы, d — диаметр трубы, $v_{\text{ср}}$ — средняя расходная скорость жидкости в трубе, λ — гидродинамический коэффициент сопротивления, ρ — удельная плотность.

Для ламинарного движения в гладкой круглой трубе, т. е. при малых числах $Re = \frac{v_{\text{ср}} d}{\nu}$ (ν — коэффициент кинематической вязкости), коэффициент гидродинамического сопротивления $\lambda = \frac{64}{Re}$.

Для турбулентного движения в гладкой круглой трубе существует ряд эмпирических и полуэмпирических формул. Простейшие из них:

формула Блязиуса $\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$, справедливая при $Re \geq 10^5$,

и формула Никурадзе $\lambda = 0,0032 + \frac{0,221}{Re^{0,237}}$, совпадающая с экспериментом и при $Re > 5$.

Р и с. 66. Зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления от чисел Рейнольдса при различной относительной шероховатости.

В трубах с шероховатой поверхностью гидродинамическое сопротивление зависит как от чисел Рейнольдса, так и от относительной шероховатости (k — средняя высота бугорка шероховатости, r — радиус трубы). При больших числах Рейнольдса λ зависит только от относительной шероховатости,

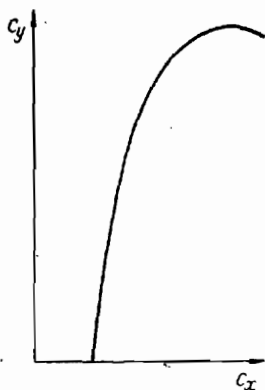


Рис. 64

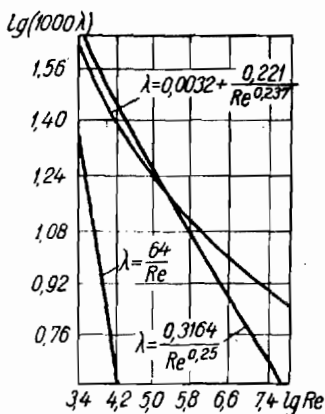


Рис. 65

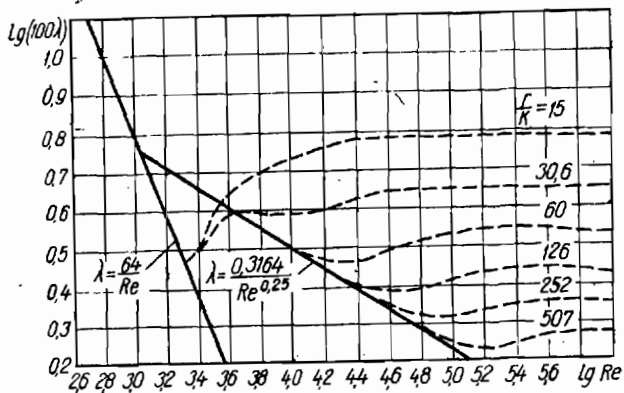


Рис. 66

Рис. 67. Зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления любой жидкости при течении в трубке от чисел Рейнольдса:

1 — шероховатые стенки, 2 — гладкие стенки.

Рис. 68. Кривые действия винта.

Тяга гребного винта P и его мощность N зависят от плотности жидкости ρ , диаметра винта d числа оборотов в секунду n и могут быть представлены формулами:

$$\begin{aligned} P &= k_1 \rho n^2 d^4, \\ N &= k_2 \rho n^3 d^5, \end{aligned}$$

где k_1 и k_2 — безразмерные коэффициенты, зависящие от формы лопастей, их числа, кинематического параметра λ , равного $\frac{v}{nd}$, а также от чисел M , Re и др. Значения k_1 и k_2 могут быть определены испытанием моделей, а также теоретическим путем. Параметр λ — один из основных параметров, характеризующих работу винта. В функции этого параметра даются значения k_1 и k_2 , а также значения к. п. д.:

$$\eta = \lambda \frac{k_1}{k_2}$$

Рис. 69. Зависимость скорости горения пороха от давления.

Скорость горения пороха определяется по формуле

$$u = u_1 p^\nu,$$

где u_1 — величина, зависящая от природы пороха, p — давление. Параметр $\nu = 1$ при $p > 6 \cdot 9,81 \cdot 10^6$ н/м², $\nu < 1$ при $p \leq 6 \cdot 9,81 \cdot 10^6$. Быстрота газообразования зависит как от состава пороха, так и от его формы.

Рис. 70. Изменение давления газов и скорости снаряда в зависимости от времени (а) и пути снаряда (б):

O — момент начала движения снаряда, m — момент достижения максимального давления, k — конец горения пороха, d — момент прохождения дна снаряда через дульный срез орудия; I период — от начала движения снаряда до конца горения пороха, II — от момента сгорания всего заряда до момента вылета снаряда, III — последствие газов, выходящих за снарядом после его вылета и еще ускоряющих движение снаряда.

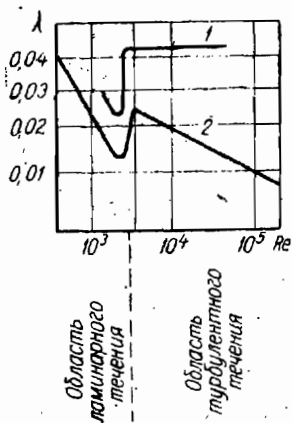


Рис. 67

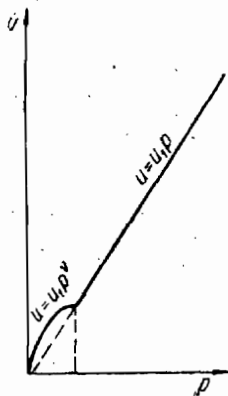


Рис. 69

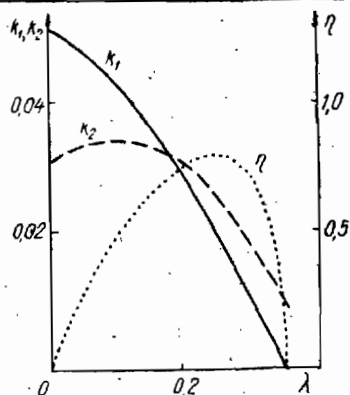


Рис. 68

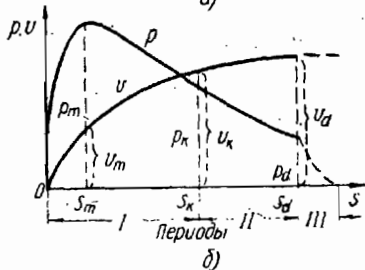
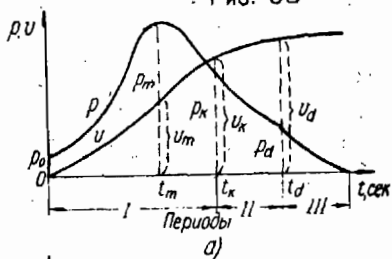


Рис. 70

§ 20. КОЛЕБАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Р и с. 71. Гармонические колебательные движения различной частоты:

1 — колебания наименьшей частоты, 2 — частота, в два раза большая, 3 — частота, в три раза большая, 4 — частота, в четыре раза большая, 5 — частота, в пять раз большая, 6 — частота, в шесть раз большая.

Р и с. 72. Гармонические колебательные движения с разностью фаз $\frac{\pi}{4} \left(\frac{1}{8} T \right)$ между двумя последовательными колебаниями:

1 — первое колебание, 2 — разность периодов между первым и вторым колебаниями $\frac{1}{8}T$, 3 — разность периодов $\frac{2}{8}T$, 4 — $\frac{3}{8}T$, 5 — $\frac{4}{8}T$, 6 — $\frac{5}{8}T$, 7 — $\frac{6}{8}T$, 8 — $\frac{7}{8}T$.

Р и с. 73. Гармонические колебательные движения с различной амплитудой, но с одной и той же частотой и фазой.

Р и с. 74. Зависимость периода простого колебания маятника от длины.

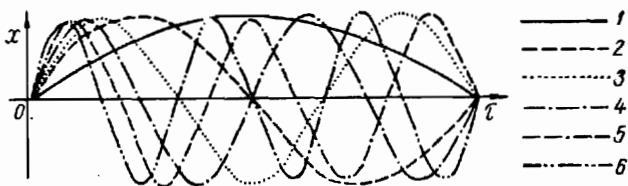


Рис. 71

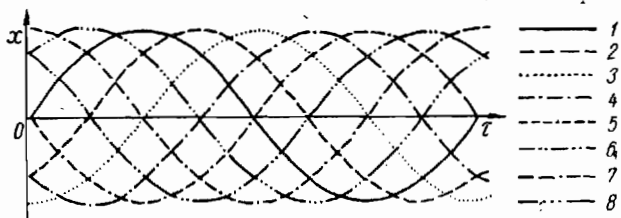


Рис. 72

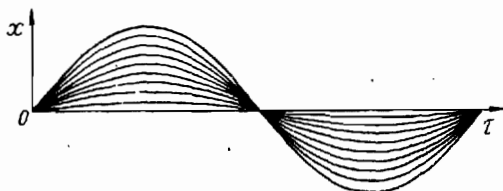


Рис. 73

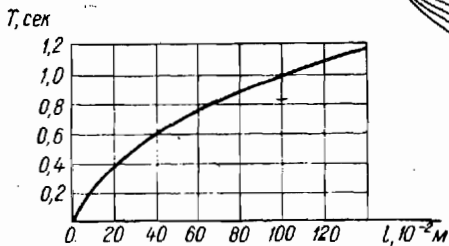


Рис. 74

§ 21. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Рис. 75. Зависимость амплитуды вынужденных колебаний от отношения вынужденной частоты к собственной $\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)$ для систем, отличающихся трением.

Коэффициент затухания $\delta = \frac{r}{2m}$, где r — коэффициент сопротивления.

Рис. 76. Зависимость величины сдвига фаз ($\Delta\varphi$) от отношения внешней и собственной частот $\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)$, а также от затухания.

График показывает, что при резонансной частоте вне зависимости от затухания сдвиг фазы равен 90° . Если несколько отойти от резонанса, то влияние затухания станет очевидным. Когда затухание слабое (малые значения логарифмического декремента), при частотах, несколько меньших резонансной, сдвиг фаз близок к нулю, при несколько больших частотах — к 180° .

§ 22. СЛОЖЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ

Рис. 77. Зависимость амплитуды результирующего колебания от разности фаз ($\Delta\varphi$).

Рис. 78. Сложение двух колебаний с частотами 5 и 15 гц:

1 — разность фаз равна 0; 2 — разность фаз 90° ; 3 — разность фаз 180° .

Основная частота результирующего колебания (жирная линия) во всех случаях равна 5 гц.

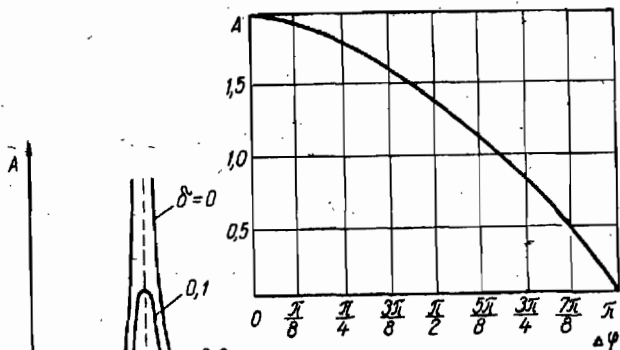


Рис. 77

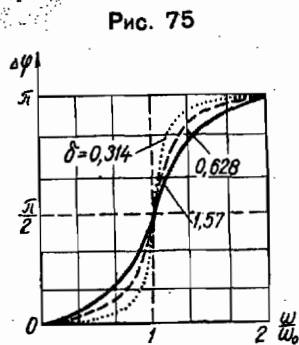


Рис. 76

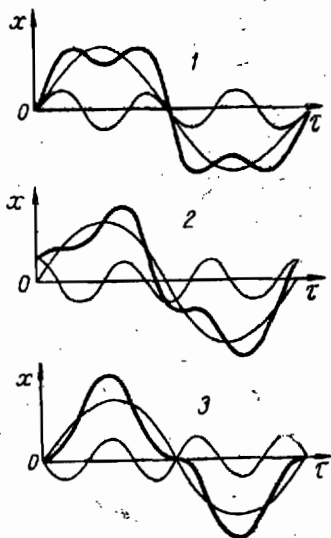


Рис. 78

Р и с. 79. Сложение двух колебаний различной частоты и амплитуды:

- 1 — первое колебание частотой 45 гц (период $1/45$ сек),
- 2 — второе колебание частотой 10 гц (период $1/10$ сек),
- 3 — третье результирующее колебание (период $1/5$ сек).

Р и с. 80. Биения.

Число биений в 1 сек равно разности частот обоих колебаний ($\nu_1 = 70$ гц, $\nu_2 = 60$ гц).

При сложении двух колебаний с одинаковыми амплитудами, мало отличающихся по частоте, результирующая кривая похожа на синусоиду с периодически меняющейся амплитудой. Получаются так называемые биения.

Объяснить биения можно следующим образом. Вначале фазы обоих колебаний совпадают и их амплитуды складываются. Затем второе колебание начинает отставать по фазе и составная амплитуда убывает. Когда разность фаз станет равна π , то составная амплитуда будет равна разности амплитуд, т. е. нулю. При дальнейшем увеличении разности фаз амплитуда колебаний снова возрастает и при разности фаз, равной 2π , вновь становится равной сумме амплитуд и т. д. Словом, отставанию второго колебания на один период будет соответствовать одно биение.

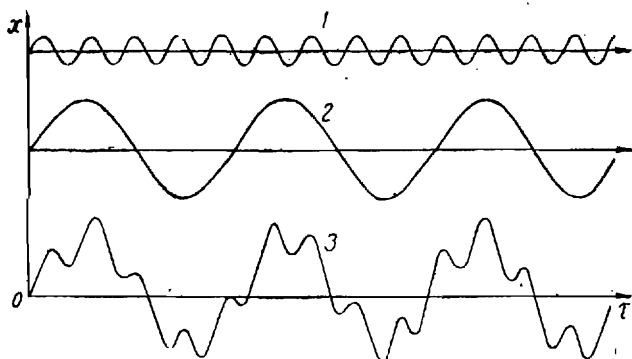


Рис. 79

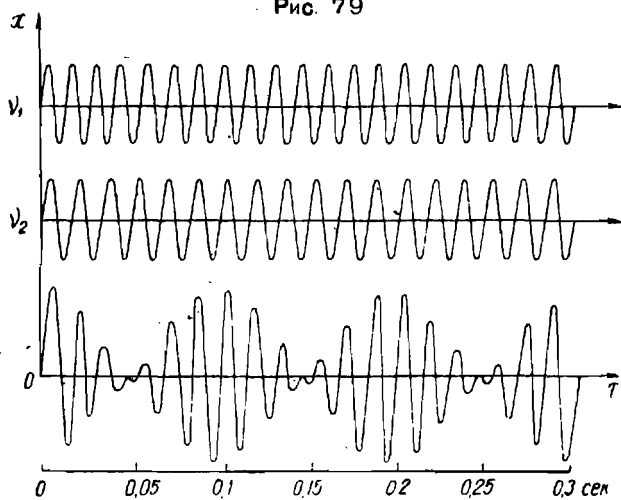


Рис. 80

Р и с. 81. Сложение трех колебаний с различными частотами ($\nu_1 = 70$, $\nu_2 = 60$, $\nu_3 = 10$ гц):

1 — результирующее колебание первых двух колебаний, 2 — третье колебание, 3 — результирующее колебание (кривая, ассиметричная относительно оси времени).

Третье колебание сдвинуто по фазе на 90° по отношению к первым двум, находящимся в одинаковых фазах.

Р и с. 82. Сложение нескольких колебаний и разложение данного сложного колебания на простые гармонические:

Г — колебание тела при движении с постоянной по величине скоростью в прямом и обратном направлении. Амплитуда равна 10 мм, основной период 0,1 сек, основная угловая частота $2\pi \cdot 10 = 20\pi$; 2, 3, 4, 5 — составляющие колебания с угловыми частотами 7ω , 5ω , 3ω и $\omega = 20\pi$, полученными на основании теоремы Фурье; 6 — результирующая кривая, достаточно точно воспроизводящая график колебания.

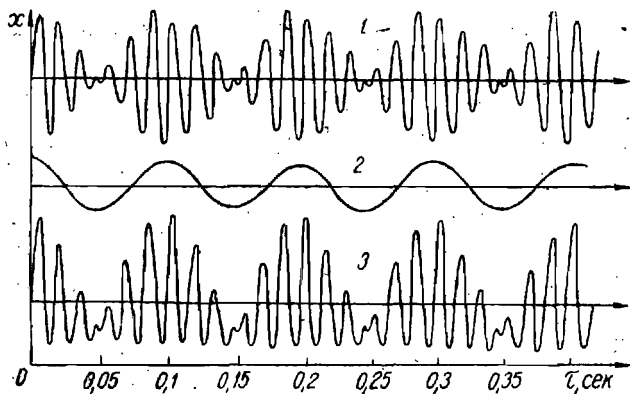


Рис. 81

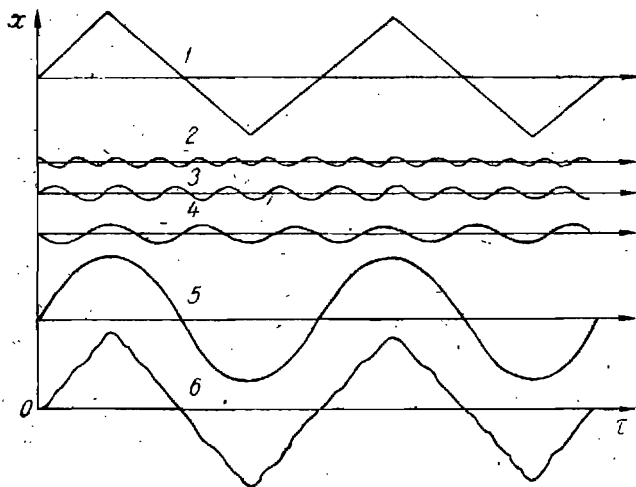


Рис. 82

Р и с. 83. Результирующие колебания двух простых одинаковой амплитуды и фазы, но разной частоты.

Р и с. 84. Результирующие колебания двух простых одинаковой амплитуды, но разных фаз $\left(0, \frac{\pi}{2}, \pi\right)$ при соотношении частот 1 : 2.

Р и с. 85. Результирующие колебания двух простых одинакового периода и амплитуды, но разных фаз $\left(0, \frac{\pi}{2}, \frac{3}{4}\pi, \frac{7}{8}\pi, \pi\right)$.

Р и с. 86. Результирующие колебания двух простых с соотношением частот 1 : 2 при различных амплитудах и разности фаз.

Отношение амплитуд 2 : 1 (а, в) и 4 : 1 (б, г): результирующая кривая 1 — фазы одинаковые и разность фаз $\frac{\pi}{2}$; результирующая кривая 2 — фазы противоположные и разность фаз $\frac{3}{2}\pi$.

Р и с. 87. Результирующие колебания трех простых одинаковой амплитуды и разности фаз (полпериода) при различном соотношении частот.

Р и с. 88. Фигуры Лиссажу в случае сложения взаимно перпендикулярных колебаний с различным соотношением частот и разностью фаз.

Р и с. 89. Фигуры Лиссажу в случае сложения двух взаимно перпендикулярных колебаний одинаковой частоты и амплитуды с разностью фаз $0, \frac{\pi}{8}, \frac{\pi}{4}, \frac{3}{8}\pi, \frac{\pi}{2}$ (1, 2, 3, 4, 5).

Р и с. 90. Спектр сложного колебания.

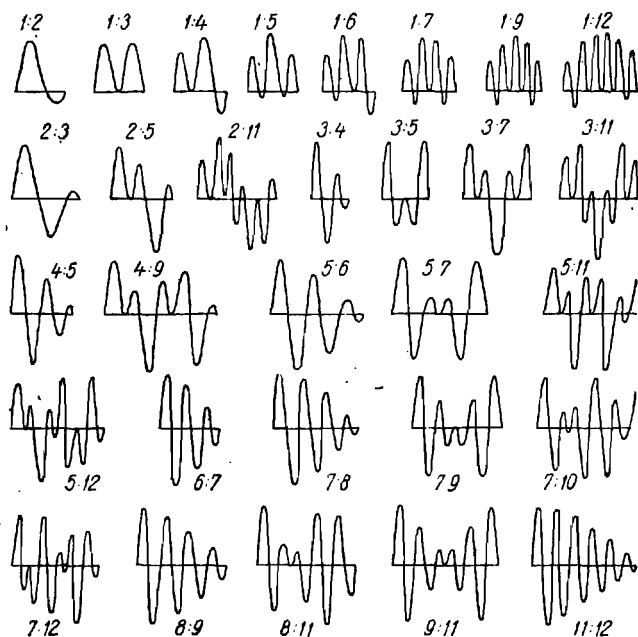


Рис. 83 .

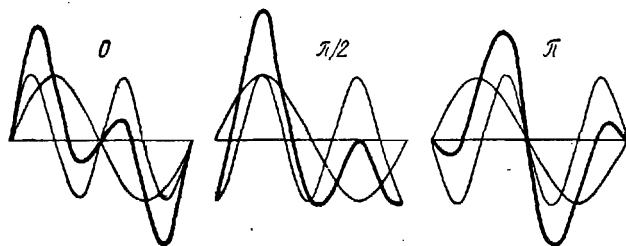


Рис. 84

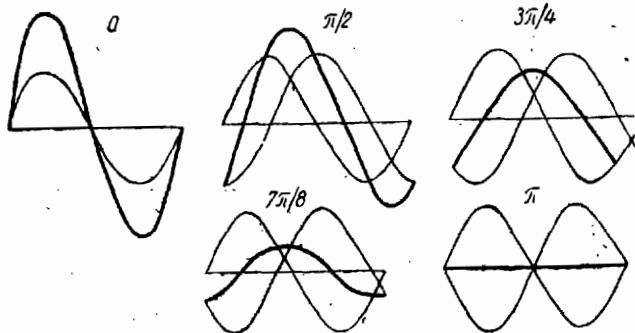


Рис. 85

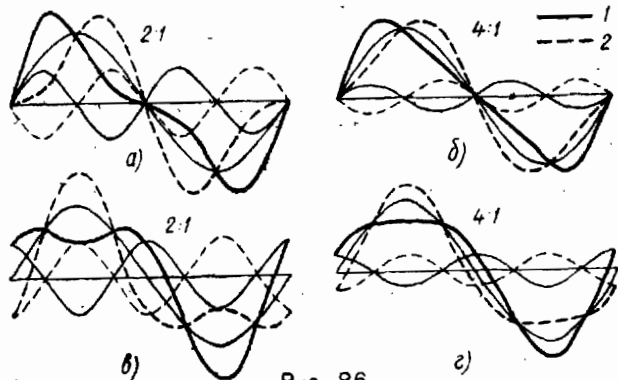


Рис. 86

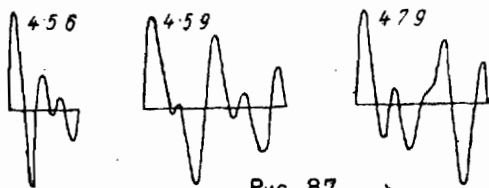


Рис. 87

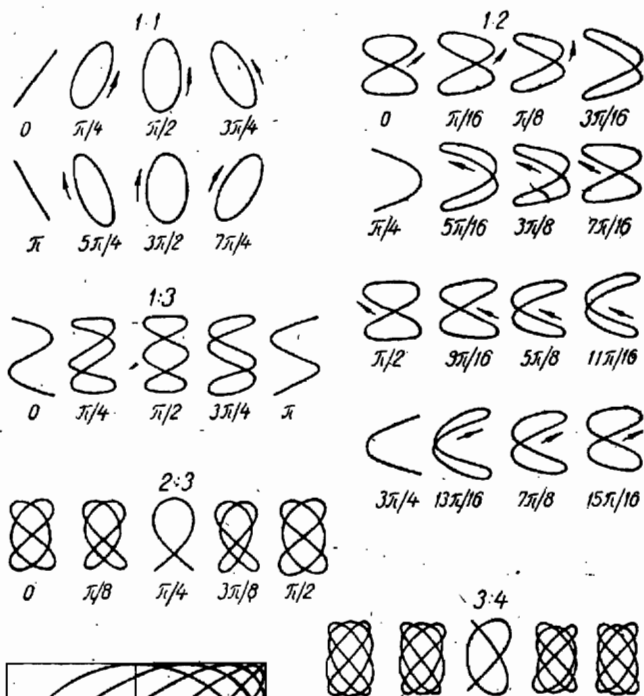


Рис. 88

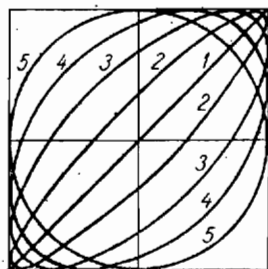


Рис. 89

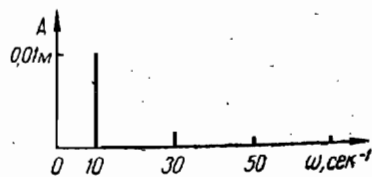


Рис. 90

§ 23. СПЕКТРЫ НЕЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ

Рис. 91. Колебания, при которых тело получает толчки каждые два периода (*a*).

На графике показаны колебания тела с частотой 400 *гц*, поддерживаемые кратковременными толчками.

Возникает сложное колебание с основной частотой 200 *гц*. По теореме Фурье получены составляющие — гармоники, изображенные на спектре (*b*). Вторая линия спектра, соответствующая частоте затухающих колебаний, изображает второй член разложения Фурье, или вторую гармонику. Первая линия соответствует основной частоте; заметную амплитуду имеют еще третья и четвертая гармоники с частотами 600 и 800 *гц*. Остальные гармоники можно не принимать во внимание, так как их амплитуды чрезвычайно малы.

Рис. 92. Колебание, поддерживаемое толчками, сообщаемыми телу через каждые 8 периодов (*a*).

Такое колебание отличается от простого гармонического, его спектр (*b*) становится гораздо сложнее, амплитуды составляющих колебаний уменьшаются. Основная частота равна 50 *гц*. Частота затухающего колебания соответствует теперь восьмой гармонике.

Рис. 93. Затухающее колебание (*a*), возбужденное единичным толчком, и его спектр (*b*).

Спектральных линий становится бесконечно много. Это значит, что в ряду Фурье появляется бесконечно много членов, причем соседние бесконечно мало отличаются друг от друга по величине. В данном случае ряд Фурье переходит в интеграл Фурье.

Любое колебание может быть разложено в спектр, т. е. представлено как сумма простых гармонических колебаний. Если колебание периодическое, то получается линейчатый спектр (ряд Фурье), если колебание не периодическое, то получается сплошной спектр (интеграл Фурье).

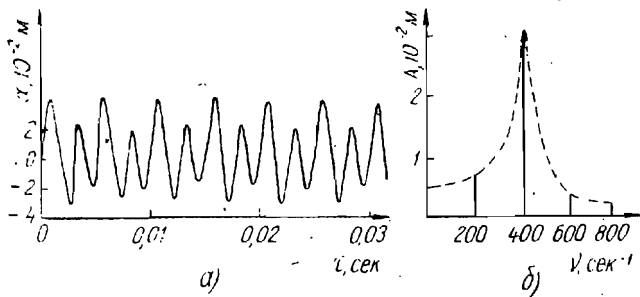


Рис. 91

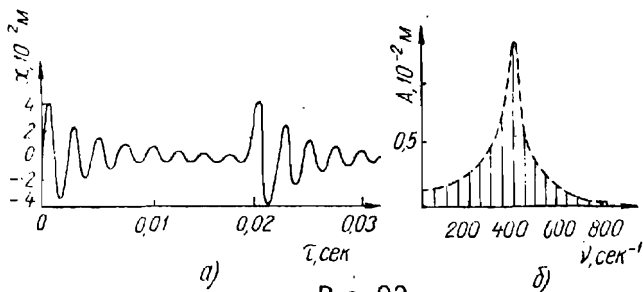


Рис. 92

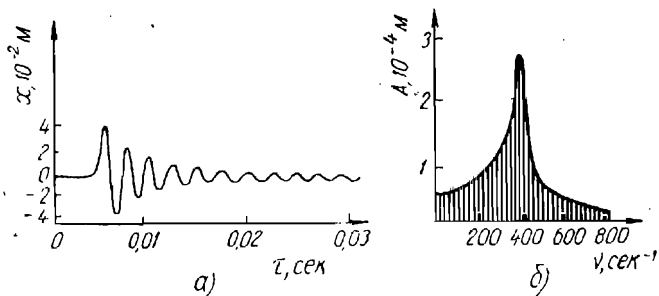


Рис. 93

§ 24. АВТОКОЛЕБАНИЯ

Рис. 94. «Мягкий режим» автоколебаний.

Внешние и внутренние кривые ведут к предельному циклу, следовательно, если при смещении x_1 скорость точки оказалась не равной v_1 (v_1 — ордината предельного цикла при абсциссе x_1), то после некоторого числа колебаний скорость при смещении становится равной v_1 . Как видно из рисунка, даже ничтожный толчок является достаточным, чтобы после произвольного нарастания колебаний установилось стационарное колебательное движение, характеризующее предельным циклом. В таком случае говорят о самовозбуждении, или автоколебании.

Рис. 95. «Жесткий режим» автоколебаний.

Диаграмма показывает, что в данном случае самовозбуждение отсутствует. Для возбуждения автоколебаний необходимо сообщить материальной точке толчок, выводящий ее за пределы неустойчивого цикла, изображенного пунктиром.

§ 25. ВОЛНЫ

Рис. 96. Зависимость между длиной волны и частотой при одной и той же скорости распространения волны (5000 м/сек).

Рис. 97. Интерференция волн.

Сплошными окружностями обозначены гребни кольцевых волн, распространяющихся по поверхности воды от источников, а пунктирными — впадины. Точки, где встречаются волны обеих систем в одинаковых фазах — впадина с впадиной и гребень с гребнем, — т. е. точки усиленных колебаний (максимумы), расположены на сплошных линиях. Точки же ослабленных колебаний (минимумы), в которых встречается впадина одной волны с гребнем другой, расположены вдоль пунктирных линий.

Рис. 98. Плоские (а), цилиндрические (б) и шаровые (в) волны.

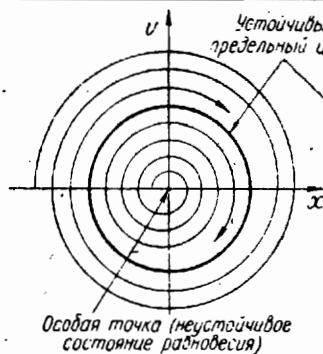


Рис. 94

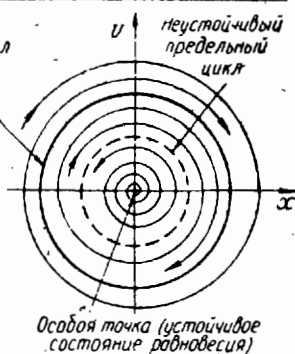


Рис. 95

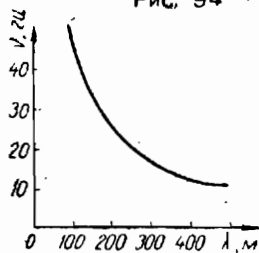


Рис. 96

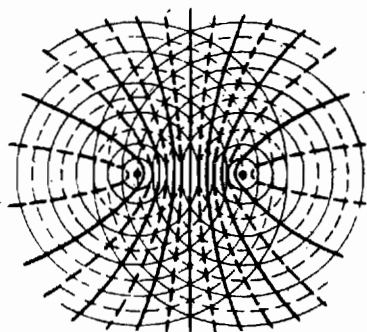


Рис. 97

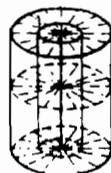
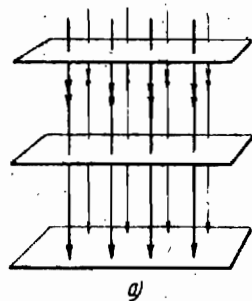


Рис. 98

II. АКУСТИКА

- A — амплитуда
- G — вес
- h — высота; глубина
- I — сила звука
- p — давление
- s — расстояние
- t — температура, °C
- V — объем
- v — скорость
- α — коэффициент поглощения
- ν — частота
- τ — время
- φ — относительная влажность

§ 26. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА

Рис. 99. Зависимость скорости звука в воздухе от температуры.

Рис. 100. Зависимость коэффициента поглощения звука от относительной влажности при температуре 20°C .

Рис. 101. Зависимость коэффициента поглощения звука и ультразвука в воздухе от частоты:

1 — экспериментальная кривая, 2 — теоретическая.

Давление равно $1,013 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$, температура $26,5^{\circ}\text{C}$, комнатный воздух имеет около $0,03\%$ CO_2 по объему и такую влажность, что число молекул водяного пара составляет $1,26\%$ от всех остальных молекул воздуха (относительная влажность 37%). Как видно из графика, на частотах ниже 100 кгц поглощение звука в воздухе гораздо больше вычисленного теоретически.

На частотах, превышающих 100 кгц , имеется заметное расхождение теории с опытом (примерно в $1,5$ раза). При этих частотах, кроме влияния влажности, играет роль наличие углекислого газа. Приведенные данные о поглощении ультразвука в воздухе говорят о том, что передать ультразвук на большие расстояния (километр и более) невозможно.

Например, если ультразвук частоты 50 кгц распространяется в спокойном воздухе, то его поглощение согласно приведенным данным составляет 2 дб/м . Это значит, что при прохождении расстояния, равного 1 м , амплитуда акустического давления убывает в $1,26$ раза. При прохождении расстояния 50 м затухание составляет 100 дб , т. е. амплитуда давления уменьшается в 10^5 раз, при расстоянии 100 м поглощение составит 200 дб — амплитуда давления уменьшается уже в 10^{10} раз и т. д. Ультразвук более высоких частот имеет еще большее затухание (оно пропорционально квадрату частоты).

Рис. 102. Зависимость коэффициента поглощения звука в пресной и морской воде от частоты звука:

1 — морская вода, 2 — пресная, 3 — морская и пресная, 4 — теоретическая кривая.

Рис. 103. Ход звуковых лучей в атмосфере: точка А — место взрыва.

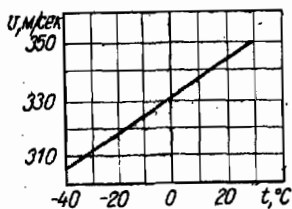


Рис. 99

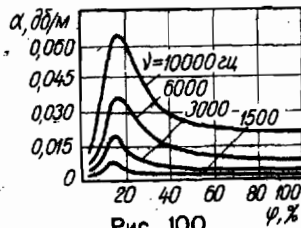


Рис. 100

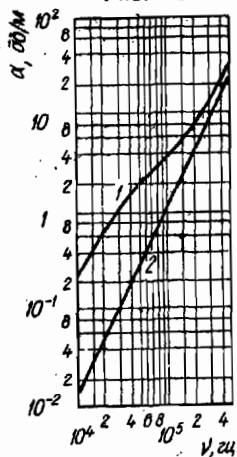


Рис. 101

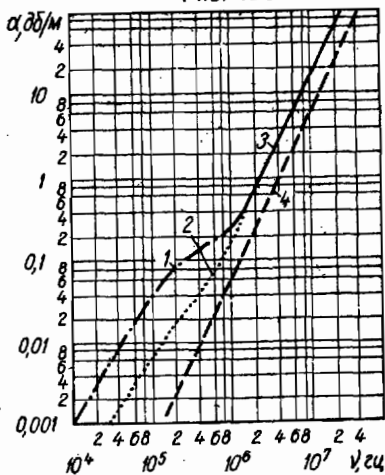


Рис. 102

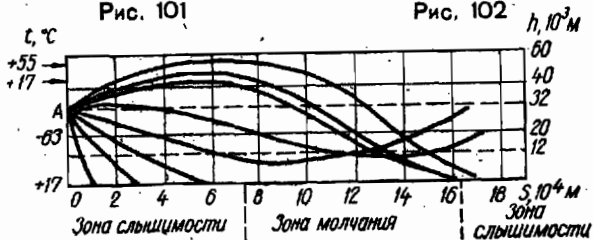


Рис. 103

Рис. 104. Изменение с глубиной скорости продольных (P) и поперечных (S) волн, распространяющихся при землетрясениях.

Рис. 105. Искривление хода звуковых лучей в море: 1 — обычный случай искривления звукового луча, когда температура воды слегка убывает с глубиной (лето). В поверхностных слоях воды температура обычно изменяется на несколько десятых градуса на метр. Лучи изгибаются книзу в виде дуг радиуса в несколько километров, 2 — очень сильное искривление звукового луча, когда температура с глубиной убывает быстро; что часто наблюдается в южных морях, 3 — искривление звукового луча в зимних условиях.

Рис. 106. Ход световых лучей в жидкости, в которой распространяются ультразвуковые волны длиной λ .

Стрелками показано направление распространения света и звука.

Жидкость, в которой распространяются ультразвуковые волны, ведет себя подобно обычной дифракционной решетке. При этом роль штрихов решетки играют периодические изменения коэффициента преломления, возникающие благодаря периодическим изменениям плотности жидкости при прохождении через нее ультразвуковых волн.

Скорость света в жидкости во много тысяч раз больше, чем скорость звука, поэтому за время, в течение которого свет успеет пройти через сосуд, слой сжатия и разрежения практически останутся на месте (для света они как бы неподвижны, хотя и движутся на самом деле со скоростью звука). Световые лучи при распространении вдоль фронтов ультразвуковых волн концентрируются около осей слоев сгущения, где скорость света минимальна. Эти слои служат для лучей света своеобразными коридорами.

На рисунке построен ход световых лучей в таком коридоре. Лучи заворачивают из областей разрежения в области сжатия, максимальная интенсивность света будет на оси слоя сжатия, минимальная же — на оси слоя разрежения. Слои разрежения играют роль штрихов, а слои сгущения — роль просветов. Для бегущих ультразвуковых волн постоянная решетки равна, следовательно, длине ультразвуковой волны.

Рис. 107. Пример каустической поверхности, образующейся в неоднородной среде:

S — источник звука.

В ряде случаев при распространении звука в неоднородных средах образуются каустические поверхности. Каустика — линия, огибающая совокупность отраженных или преломленных лучей.

Рис. 108. Схема искривления лучей в атмосфере от поднятого над землей источника звука для случая, когда температура воздуха убывает с высотой.

Рис. 109. Формы звуковых волн при ветре.

Рис. 110. Направление звуковых лучей, идущих от источника, в середине летнего дня:

x — зона молчания.

Лучи отклоняются кверху, расстояние, на котором слышен звук, уменьшается.

Рис. 111. Ход звуковых лучей после захода Солнца в ясный вечер.

Благодаря излучению поверхность Земли быстро остывает, прилегающие к ней слои воздуха охлаждаются. Поэтому лучи звука, идущие от источника, расположенного на поверхности Земли, загибаются вниз.

Рис. 112. Кривые изменения давления на различных расстояниях (500, 640, 1000, 1500, 2000, 2500 м) при распространении звукового импульса после взрыва 1000 кг взрывчатого вещества.

Кривые показывают, что сгущение сменяется разрежением, причем продолжительность первой полувоны меньше продолжительности второй. С увеличением расстояния вследствие рассеяния звуковой энергии уменьшаются амплитуда давления и быстрота его нарастания.

Скорость распространения звукового импульса обусловлена его интенсивностью и может быть значительно больше скорости звука.

Рис. 113. Зависимость скорости распространения звукового импульса от расстояния до места возникновения звукового импульса.

Громкость звукового импульса определяется очень коротким промежутком времени, в течение которого нарастает давление.

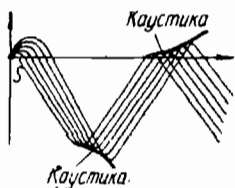


Рис. 107



Рис. 108

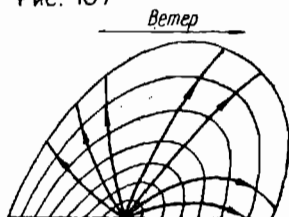


Рис 109

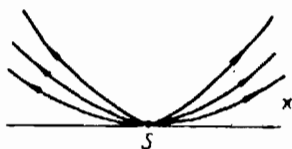


Рис. 110



Рис. 111

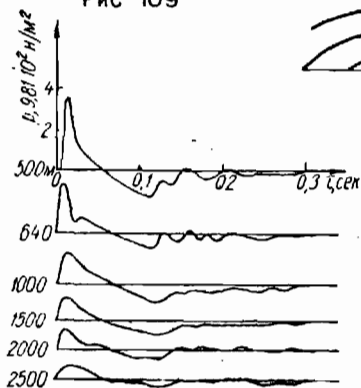


Рис. 112

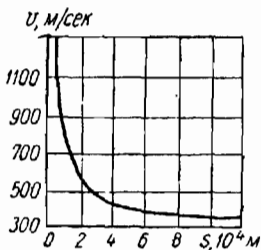


Рис. 113

§ 27. ГИДРОАКУСТИКА

Рис. 114. Распределение скорости звука (а) и ход звуковых лучей (б), при наличии зоны тени.

В зону тени звуковая энергия проникает только за счет дифракции или рассеяния от поверхности или дна, поэтому сила звука в зоне тени резко падает. При этих условиях дальность действия гидроакустической системы обычно определяется расстоянием до границ зоны тени.

Рис. 115. Распределение скорости звука (а) и ход звуковых лучей (б) при наличии подводного звукового канала.

Если источник звука помещен на глубине, на которой скорость звука минимальна, то звуковые лучи можно разбить на три категории: *I* — лучи, выходящие из источника с относительно малыми углами и не достигающие ни дна, ни поверхности, *II* — лучи, не достигающие дна, но отражающиеся от поверхности, *III* — лучи, отражающиеся и от дна и от поверхности.

Область глубин, в пределах которой осциллируют лучи первой категории, называется областью подводного звукового канала. В этой области убывание интенсивности происходит медленно, и поэтому для низких частот возможно сверхдальнее распространение звука. В этом случае распространение звука может происходить на тысячи километров даже при сравнительно небольших мощностях источника звука. Явление сверхдального распространения звука в подводном звуковом канале используется для дальней сигнализации кораблями, терпящими бедствие в океане, а также для своевременного обнаружения подводных землетрясений и извержений.

При распространении звука в мелком море картина еще более усложняется благодаря увеличению влияния отражения звука от поверхности и дна, которое может привести к дополнительному ослаблению звука.

Рис. 116. Кривые изменения температуры, давления и скорости звука с глубиной моря.

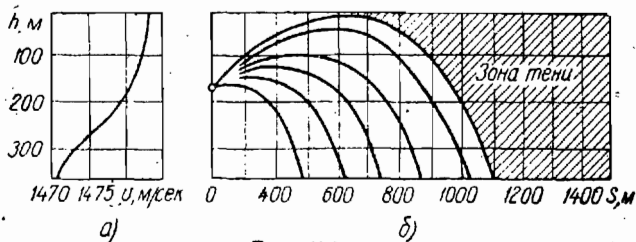


Рис. 114

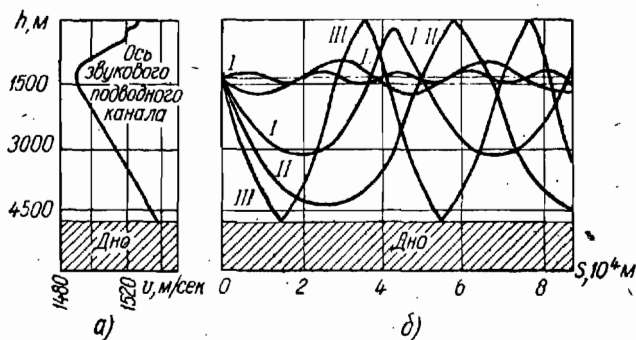


Рис. 115

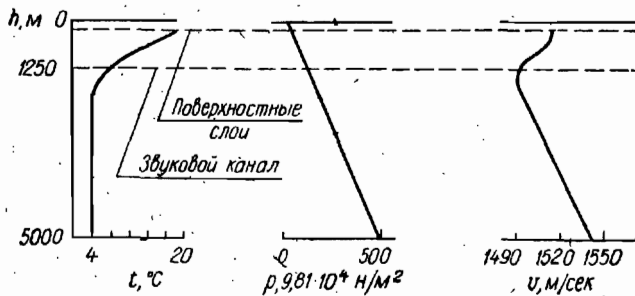


Рис. 116

§ 28. ГРАФИКИ ЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Р и с. 117. Графическая запись ноты «до» (128 *гц*) и звуковой спектр этой ноты.

Р и с. 118. Графическая запись и спектр гласной «и», пропетой высоким женским голосом (350 *гц*)

Спектр состоит из сильного основного тона и нескольких обертонов, причем особенно сильны обертоны в области около 3500 *гц*. Оказывается, что эти сильные обертоны характеризуют данную гласную. На какой бы основной тон ни была произнесена гласная, особенно сильные обертоны получаются всегда в определенных областях частот. Эти характерные для данной гласной резонансные области получили название формант.

Р и с. 119. Спектры гласной «и», произнесенной на разные тоны частотой от 128 до 256 *гц*.

Количество гармоник и их относительная интенсивность весьма различны, но во всех случаях имеются сильные обертоны в областях около 500 и 2500 *гц*. Эти обертоны и определяют гласную «и». Новейшие данные показывают, что все гласные имеют две резонансные области.

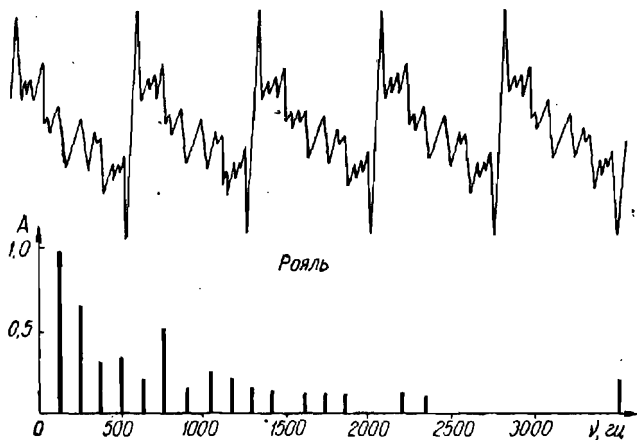


Рис. 117

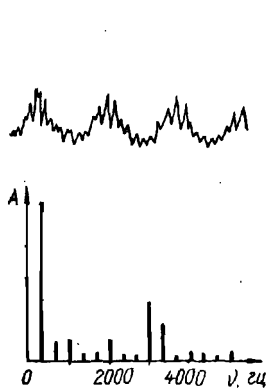


Рис. 118

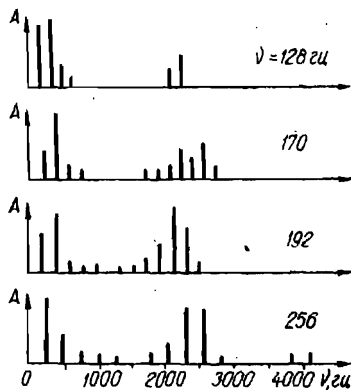


Рис. 119

Р и с. 120. Зависимость мощности звука (*дб*) от частоты: 1 — мужской голос, 2 — женский голос.

Р и с. 121. Акустические спектры певческого (вверху) и разговорного (внизу) голосов для тона частотой 129 *гц* гласной «а».

Цифры внизу — номера обертонов.

Певческий голос в отличие от разговорного имеет ясно выраженную высоту, т. е. определенную, произвольно изменяемую частоту колебаний основного тона. При пении на произнесение согласных затрачивается относительно небольшое время, само же пение состоит в длительном воспроизведении гласных звуков. Форманты певческого голоса характеризуются резким усилением определенных гармонических обертонов основного тона, а не целой полосы частот, как в разговорном голосе. Это достигается большей жесткостью стенок резонаторов голосового аппарата, вырабатываемой певцами.

Высота формант, а следовательно, и характер гласных меняются. Нижняя форманта всех гласных мужского певческого голоса имеет 500 *гц*, женского — около 600 *гц*. Кроме формант, у хорошего певческого голоса наблюдается резко выраженный резонанс в области 2500—3000 *гц*. Мощность певческого голоса значительно больше мощности разговорного голоса.

Р и с. 122. Изменение акустического спектра при вибрациях.

Вибрации заключаются в периодическом изменении мощности, частоты колебаний и тембра. Частота вибрации колеблется от 5 до 8 в 1 *сек.*, наилучшая частота — 6 вибраций в 1 *сек.* Изменения мощности достигают 10—15 *дб*, изменения тембра заключаются в периодическом усилении то одной, более высокой (1), то другой, более низкой (2, 3) группы обертонов. Это можно видеть по изменениям акустического спектра (1, 2, 3, 4):

Р и с. 123. Спектр шума бунзеновской газовой горелки.

В шуме обнаруживаются колебания всех частот, вплоть до очень высоких частот порядка 13 000—14 000 *гц*.

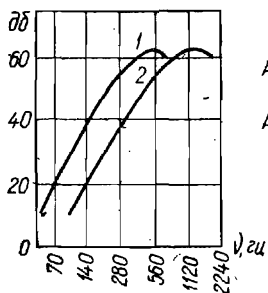


Рис. 120



Рис. 121

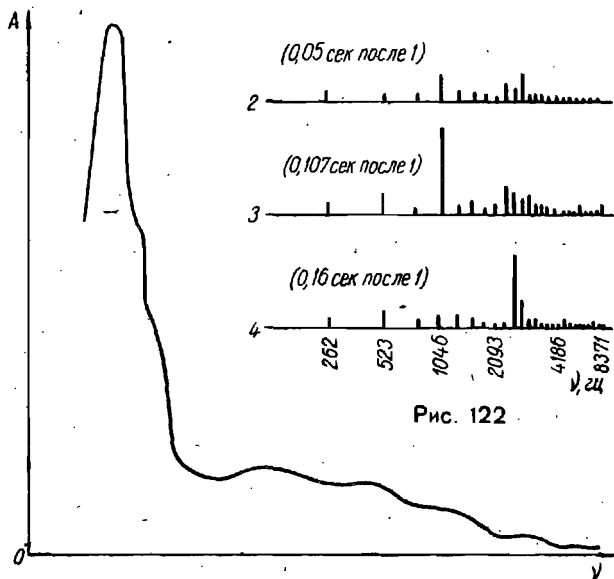


Рис. 122

Рис. 123

Р и с. 124. Один из типов записи звука выстрела.

Сначала дана запись баллистической волны (1), потом запись звука от падения снаряда (2), а затем дульной волны (3). Отрезок времени 0,5 сек.

При выстрелах орудий в воздухе образуются волны различных типов: 1) дульная волна, возникающая вследствие резкого изменения давления, производимого вырывающимися газами из дула орудия; эта волна распространяется со скоростью звука от центра, лежащего впереди дула, и несет инфразвуковую частоту; 2) баллистическая, или головная волна; она огибает сферические волны, возникающие благодаря импульсам, которые сообщаются воздуху снарядом, летящим со скоростью, большей скорости звука; инфра-частоты в ней слабо выражены; эта волна опережает дульную и возникает только при стрельбе снарядами с большими начальными скоростями; 3) волна падения снаряда; 4) волна разрыва снаряда. Две последние волны несут, как и дульная, инфрачастоту, но обладают меньшей мощностью.

Р и с. 125. Запись колебаний почвы, вызванных землетрясением (сейсмограмма):

P — вступление продольной волны и других волн, один или два раза отразившихся от земной поверхности, S — вступление поперечной волны, которая распространяется почти в два раза медленнее волны P . В основном по времени вступления поперечной и продольной волн определяется расстояние до эпицентра. В конце сейсмограммы после ряда вступлений отмечается приход поперечной волны L с большим периодом.

§ 29. ФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

Р и с. 126. Порог слышимости (1) и болевой порог (2) для разных частот.

Пунктирные линии по бокам показывают вероятное соединение обеих кривых в тех областях, где слуховой эксперимент затруднителен. Этими кривыми ограничена вся область слышимости человеческого уха. Как видно, наибольшая чувствительность уха лежит в области 600 — 5000 *гц*. В обе стороны от этой области чувствительность уха убывает.

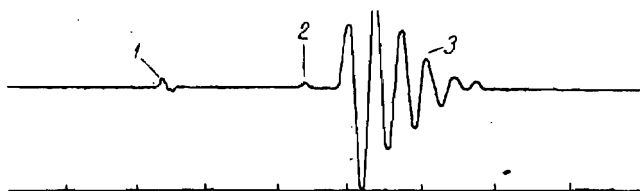


Рис. 124

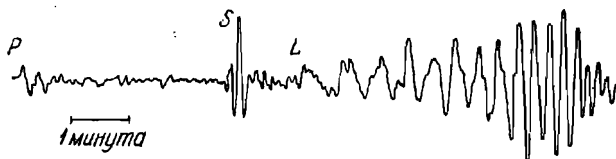


Рис. 125

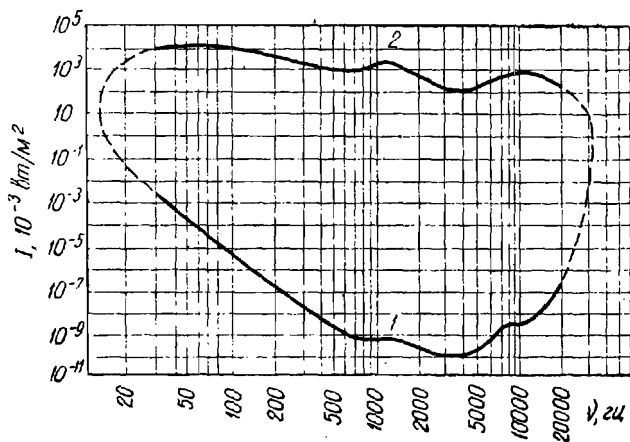


Рис. 126

Рис. 127. Зависимость понижения уровня громкости (дб) воспринимаемого тона от времени действия утомляющего тона (800 гц) при звуках различной силы.

При воздействии громкого звука слуховой аппарат подвергается утомлению, и все воспринимаемые звуки кажутся более слабыми, чем если бы предшествующего утомления не было. После прекращения действия утомляющего тона ухо не сразу, а лишь постепенно возвращается к нормальному состоянию.

Рис. 128. Зависимость отношения $\frac{\Delta I}{I}$ от громкости (дб) над порогом слышимости.

Дифференциальный порог восприятия громкости звука выражается отношением $\frac{\Delta I}{I}$, где I — сила исследуемого звука, ΔI — минимальный ощутимый прирост громкости.

Рис. 129. Зависимость отношения $\frac{\Delta I}{I}$ от частоты при различных громкостях (дб).

Величина отношения $\frac{\Delta I}{I}$ растет при ослаблении исследуемого тона и достигает максимальной величины вблизи порога слышимости. При громкостях, равных 40 дб над порогом слышимости и более высоких, $\frac{\Delta I}{I}$ остается постоянным.

Рис. 130. Распределение утомления (усл. ед.) по частотам после действия утомляющего тона (800 гц).

Рис. 131. Кривая восстановления нормального уровня громкости (дб) после действия в течение 2 мин утомляющего тона (800 гц).

Уровень утомляющего тона равен 94 дб над порогом слышимости.

Так как утомление распространяется только на то ухо, которое подвергается действию утомляющего тона, и только на те частоты, которые весьма близки к частоте этого тона, то наиболее естественным является предположение, что утомление локализуется в улитке.

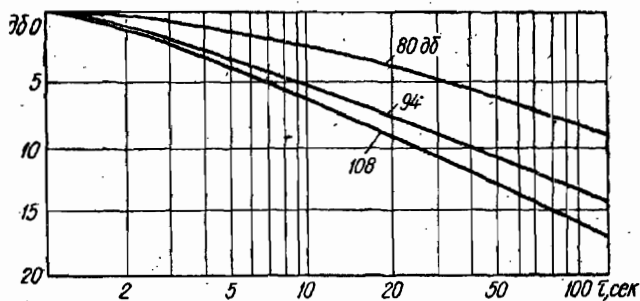


Рис. 127

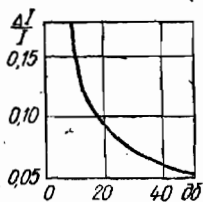


Рис. 128

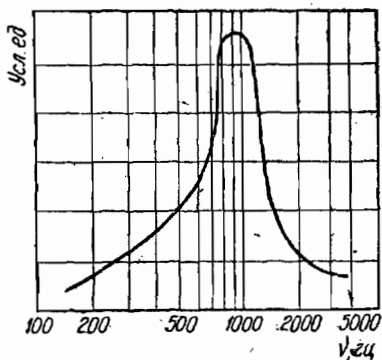


Рис. 130

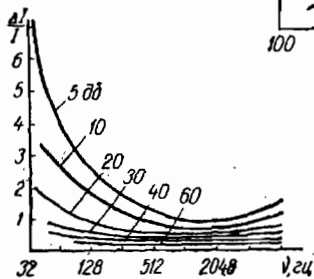


Рис. 129

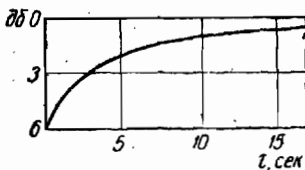


Рис. 131

Рис. 132. Зависимость уровня звукового давления (*дб*) чистых тонов от частоты для кривых равной громкости.

Каждая кривая объединяет тоны всех частот, одинаковые по громкости. Из графика видно, что, например, тон частоты 50 *гц*, имеющий уровень звукового давления 62,5 *дб* ($0,27 \cdot 10^5$ *н/м²*), на слух представляется таким же громким, как и тон частоты 1000 *гц*, имеющий уровень звукового давления 40 *дб* ($0,02 \cdot 10^5$ *н/м²*).

Рис. 133. Зависимость условной величины громкости в фонах от уровня громкости в фонах:

I — шум вблизи работающего авиамотора, *II* — фортиссимо оркестра, шум в кабине самолета, *III* — громкий крик на расстоянии 1 *м*, *IV* — громкая речь на расстоянии 1 *м*, *V* — разговор средним голосом на расстоянии 1 *м*, *VI* — шепот на расстоянии 0,3 *м*, *VII* — шепот на расстоянии 1 *м*.

Громкость указанных источников звука указана ориентировочно.

На практике пользуются величиной уровня громкости в фонах или относительных децибелах. Уровнем громкости данного звука называется уровень звукового давления чистого тона частотой 1000 *гц*, громкость которого (сравнением на слух) устанавливается равной громкости данного звука. Существует ряд способов приближенного вычисления уровня громкости сложного звука по уровням громкости его составляющих, для чего вводится условная шкала громкости в фонах.

Рис. 134. Зависимость слоговой артикуляции от уровня силы речи (*I*), считая или от порога слышимости, или от уровня силы звука.

Семейство кривых артикуляции получено в зависимости от силы одновременно слышимого шума, уровень которого указан на каждой кривой (*дб*). Для кривых характерно наличие максимума, за которым следует спад, обусловленный тем, что при слишком большой громкости механизм уха начинает давать искажение.

Для решения ряда физических и технических вопросов важно иметь количественную оценку ясности речи с целью учета различных искажений в передаче и воспроизведении звука.

Если наблюдатель будет записывать определенный набор звуков речи, то отношение правильно записанных звуков к общему количеству записанных звуков, выраженное в процентах, может служить количественной мерой ясности произношения. Эта величина называется артикуляцией. Она может относиться к отдельным звукам речи (буквам), к словам или к связным фразам. Поэтому различают артикуляцию букв, слоговую и связной речи, часто называемую понятностью речи (ее выражают также в процентах).

Определение слоговой артикуляции является наиболее употребительным методом исследования. Артикуляционные таблицы для такого исследования состоят из слогов, входящих в состав некоторого отрывка речи, переставленных в произвольном порядке. Исследование артикуляции дает лучший способ учета искажений речи, вносимых каким-либо фактором. Понятность речи при слоговой артикуляции, меньшей 70%, считается неудовлетворительной.

Р и с. 135. Влияние различных областей звукового спектра на громкость и разборчивость речи:

1 — разборчивость, 2 — энергия.

Это явление было подробно изучено при помощи акустических фильтров, заглушавших по желанию ту или иную область спектра.

Фильтр, выключавший все частоты ниже 500 *гц*, уменьшал энергию звука на 60%, но почти совершенно не влиял на разборчивость речи. Фильтр же, выключавший все частоты выше 1500 *гц*, уменьшал энергию звука только на 10%, но речь становилась неразборчивой. Кривые, отмеченные буквой *H*, показывают разборчивость и энергию в случае выключения звуков с частотами ниже той, которая соответствует рассматриваемой точке кривой. Например, точки *A* и *A'* показывают, что при выключении всех частот, лежащих ниже 1450 *гц*, энергия уменьшается до 13% от ее начального значения, разборчивость же

уменьшается на 21%. Кривые с буквой *L* обозначают разборчивость и энергию в случае выключения всех звуков с частотами выше той, которая соответствует рассматриваемой точке кривой. Точки *B* и *B'* показывают, что при выключении всех частот выше 500 гц энергия уменьшается сравнительно немного (на 40%), но артикуляция выражается всего 4%, т. е. речь становится совершенно неразборчивой, наблюдатель записывает правильно всего 4 слога из 100.

Следовательно, частоты выше 1000 гц гораздо важнее для разборчивости речи. Таким образом, артикуляционные исследования позволяют сделать заключения о силе искажений, вносимых тем или иным фактором, или о важности той или иной полосы частот для передачи речи.

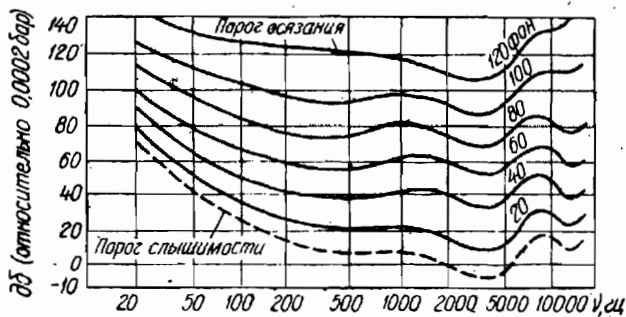


Рис. 132

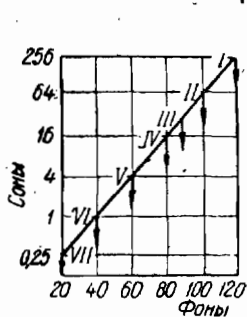


Рис. 133

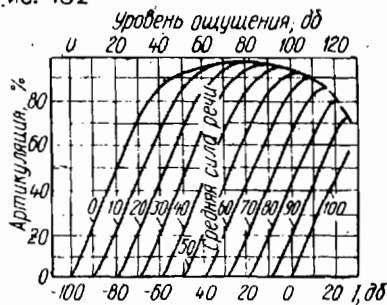


Рис. 134

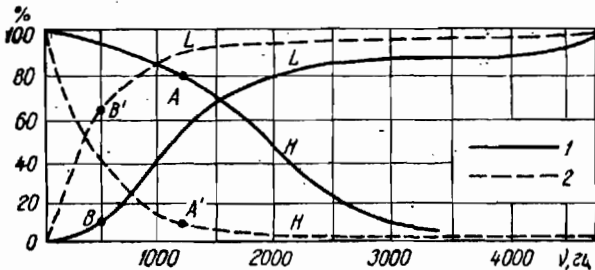


Рис. 135

§ 30. АРХИТЕКТУРНАЯ АКУСТИКА

Рис. 136. Зависимость ослабления звука (дб) от веса на единицу площади перегородки или стены.

Изолирующее действие перегородок, выраженное числом децибел ослабления звука, пропорционально логарифму веса на единицу площади перегородки или стены.

Рис. 137. Зависимость оптимальной реверберации от объема помещения.

Вопрос об оптимальном значении реверберации решается экспериментально и на основе субъективных оценок. Поэтому на графике значения для музыки представлены в виде довольно широкой полосы. Для речи оптимальная реверберация выражена более определенно, ибо метод артикуляции позволяет подойти к оценке слышимости с количественным критерием. Поглощение возрастет с частотой звука. Реверберация не зависит, во-первых, от формы помещения и, во-вторых, от расположения источника и приемника звука. Эти законы имеют силу для помещения с объемом не менее 400 м^3 при условии, что в помещении нет резонирующих поверхностей.

Рис. 138. Зависимость времени реверберации (сек) от объема помещения:

1 — зал пустой, 2 — наполненный на $\frac{1}{3}$, 3 — полный.

Время, в течение которого плотность звуковой энергии уменьшается до 0,000001 доли начального значения, называется временем стандартной реверберации или просто реверберацией.

Рис. 139. Оптимальная реверберация для помещений различного объема.

В помещениях объемом не более 350 м^3 оптимальной является реверберация 1,06 сек. При дальнейшем увеличении объема оптимальная реверберация растет пропорционально $\sqrt[3]{V}$.

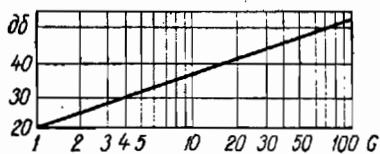


Рис. 136

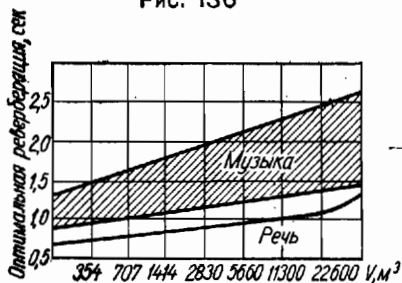


Рис. 137

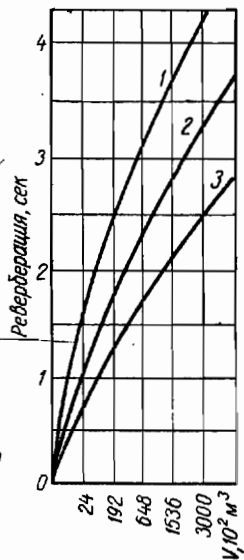


Рис. 138

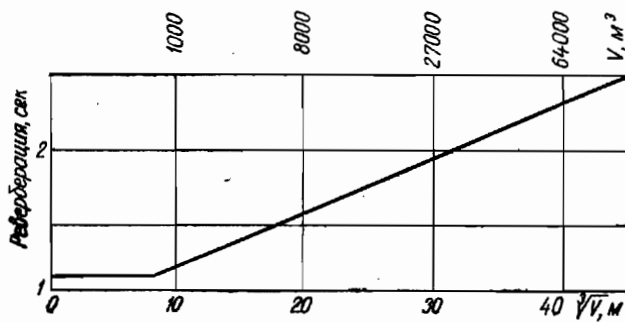


Рис. 139

III. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕПЛОТА

- c — теплоемкость
 D — электрическое смещение
 G — вес
 I — величина тока; ток
 L — теплота парообразования
 l — длина
 p — давление
 T — температура, °К
 t — температура, °С
 U — энергия
 V — объем
 v — скорость
 α — термический коэффициент объемного расширения
 β — коэффициент сжимаемости
 Δl — абсолютное удлинение
 ϵ — относительное удлинение
 η — вязкость; коэффициент вязкости
 $\frac{1}{\eta}$ — текучесть
 Λ — скрытая теплота
 λ — теплопроводность; коэффициент теплопроводности
 ν — частота колебания
 ρ — плотность
 σ — поверхностное натяжение; коэффициент поверхностного натяжения
 τ — время
 ω — угловая частота

§ 31. МОЛЕКУЛЯРНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Рис. 140. Молекулярное движение в газах, жидкостях и твердых телах.

Плотность газа мала по сравнению с плотностью жидкости и твердого тела. Расстояние между отдельными молекулами в газообразном состоянии больше, следовательно, силы взаимодействия между молекулами газа слабые. Путь газовой молекулы представляет собой ломаную линию, состоящую из множества неравных зигзагов, следующих в беспорядке один за другим. В жидкости изломы — это места выхода молекул из разных положений равновесия, а звездочки обозначают колебания внутри каждого положения равновесия. В твердом теле звездочки показывают колебания около положения равновесия в произвольных направлениях.

§ 32. ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ТЕЛ

Рис. 141. Зависимость удлинения стержней (начальная длина 1 м) из различных веществ от температуры.

Рис. 142. Зависимость температуры охлаждающейся воды от времени на разных глубинах.

Вода обладает отрицательным коэффициентом расширения при $0-4^{\circ}\text{C}$. При 4°C плотность воды наибольшая. Это можно доказать с помощью следующего опыта. В высокий цилиндрический сосуд (а) наливается вода комнатной температуры и опускаются два термоэлемента, соединенных с пирометрами P_1 и P_2 . На середину сосуда надевается муфта, наполненная охлаждающей смесью льда и поваренной соли (температура около -20°C).

Температуры нижнего и верхнего слоев воды отмечаются через определенные промежутки времени и заносятся на график (б). Температура нижнего слоя воды довольно быстро падает до 4°C и длительное время остается постоянной (кривая В). Это значит, что плотность средних, более холодных, слоев жидкости становится меньше плотности нижнего слоя. При дальнейшем охлаждении холодные слои опускаться вниз не могут, они охлаждают верхние слои. Таким образом, возникает конвекционное движение, быстро снижающее температуру верхнего слоя до 0° (кривая А).



Рис. 140

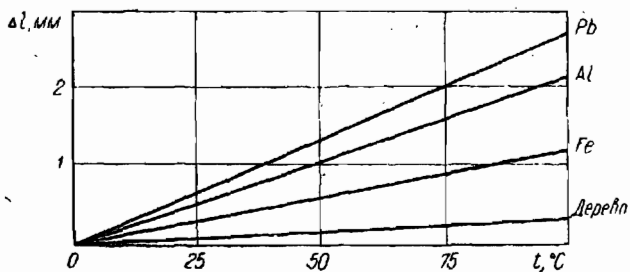


Рис. 141

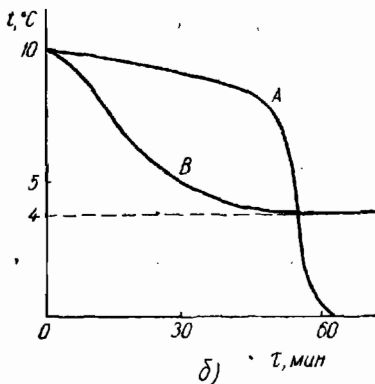
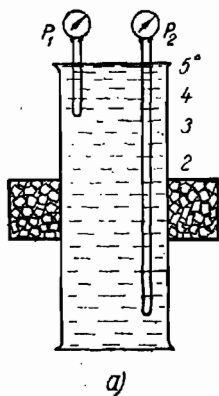


Рис. 142

Рис. 143. Зависимость объема воды от температуры (объем при 4°C принят за единицу).

Рис. 144. Зависимость удельного объема воды от температуры.

При замерзании объем воды увеличивается (примерно на 10%). Вода, лед и пар находятся в равновесии при давлении $613,18 \text{ н/м}^2$ и температуре $0,0100^\circ\text{C}$.

В известных пределах при увеличении давления температура плавления понижается (примерно на 1°C на каждые $1,28 \cdot 10^7 \text{ н/м}^2$). При давлении выше $1,96 \cdot 10^8 \text{ н/м}^2$ картина осложняется вследствие полиморфизма воды.

Рис. 145. Зависимость плотности воды от температуры.

При 4°C данное количество воды имеет наименьший объем и, следовательно, наибольшую плотность.

Аномальное поведение воды играет большую роль в зимнем режиме рек и водоемов. Охлаждение воды до 4°C идет путем конвекции, так как холодные верхние слои обладают большой плотностью и поэтому опускаются на дно. При охлаждении ниже 4°C верхние слои расширяются, становятся менее плотными и остаются на поверхности. С этого момента дальнейшее охлаждение происходит путем теплопроводности и идет весьма медленно, так как коэффициент теплопроводности воды очень мал.

Рис. 146. Зависимость плотности этилового спирта от температуры.

Рис. 147. Зависимость плотности ртути от температуры.

Рис. 148. Плотность жидкого гелия He^4 вблизи λ -точки, при которой происходит фазовый переход второго рода.

Известны три изотопа гелия: He^3 , He^4 и He^6 . Природный He состоит из стабильных изотопов He^4 и He^3 . Жидкий гелий — легкая бесцветная жидкость.

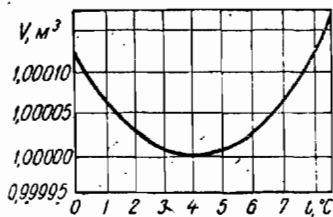


Рис. 143

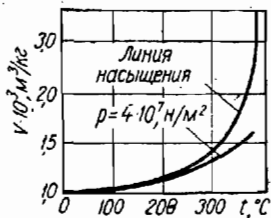


Рис. 144

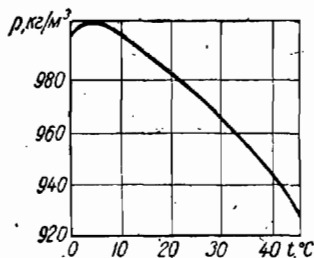


Рис. 145

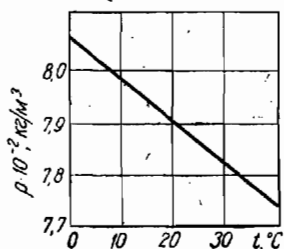


Рис. 146

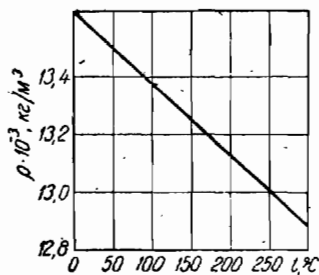


Рис. 147

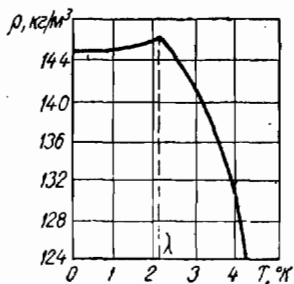


Рис. 148

§ 33. О ДВИЖЕНИИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Р и с. 149. Распространение тепла при периодически меняющихся температурах.

Концы металлического стержня находятся в двух сосудах с водой (а). Температура воды в сосуде слева комнатная (20°C). В правом сосуде воду каждые 5 мин меняют. В сосуде в течение 4 мин находится вода при 40° , за 1 мин ее заменяют водой при 0° . Эту воду через 4 мин опять меняют и т. д.

Изменение температуры воды около правого конца стержня можно схематически изобразить ступенчатой кривой (б). По ординатам откладываются разности между наблюдаемыми температурами и комнатной. В каналы, высверленные в стержне, вставлены три термомолары (1, 2, 3), соединенные с пирометрами. Резкие изменения температуры (в) сглаживаются по мере удаления от нагреваемого конца. Нагревание требует времени, и теплообмен с окружающим пространством при больших значениях разности между наблюдаемыми температурами и комнатной больше, чем при малых.

Р и с. 150. Скорость охлаждения тела.

По оси абсцисс (а) откладывается время, а по оси ординат — разность температур $\theta = t_1 - t$, где t — температура среды, в которую помещают тело, имеющее более высокую температуру t_1 . Температура тела в начале опыта на θ градусов выше температуры среды, скорость остывания, определяемая в первую очередь разностью температур $t_1 - t$, постепенно замедляется.

Если по оси ординат наносить не температуры, а их натуральные логарифмы, то график получается в форме прямой линии (б).

Р и с. 151. Годовой ход среднесуточных температур.

Нагревание земной поверхности представляет собой типичный периодический процесс. Наблюдается суточная и годовая периодичность. Верхняя кривая обозначает температуру воздуха, нижние кривые — температуру почвы на глубине 10, 50 и 250 см от поверхности. Амплитуда температурных колебаний в почве быстро уменьшается при удалении от поверхности, а резкие вторичные колебания температур (пики на верхней кривой) сглаживаются.

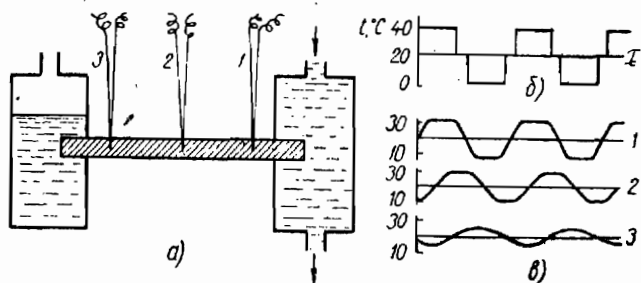


Рис. 149

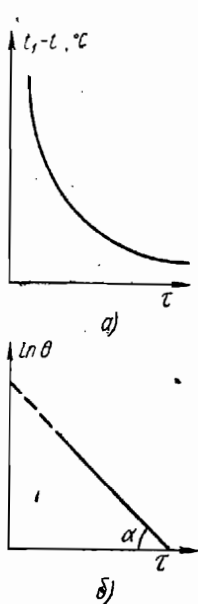


Рис. 150

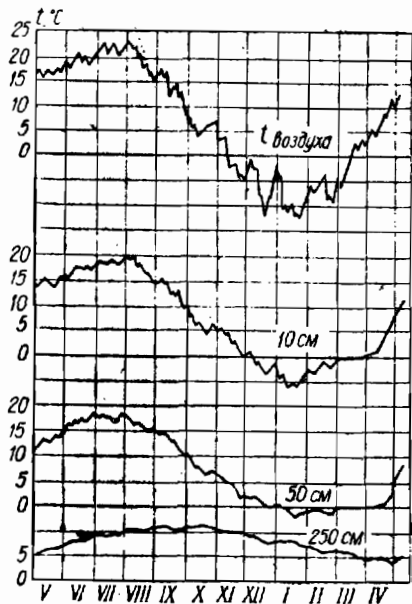


Рис. 151

§ 34. ТЕПЛОЕМКОСТЬ

Рис. 152. Зависимость теплоемкости меди, серебра и кварцевого стекла от температуры.

Рис. 153. Зависимость теплоемкости твердых тел от абсолютной температуры.

Рис. 154. Зависимость теплоемкости жидкого этилового спирта от температуры и давления:

c_p — теплоемкость при постоянном давлении.

Рис. 155. Зависимость теплоемкости воды от температуры.

Рис. 156. Зависимость теплоемкости воды от температуры при давлении $4 \cdot 10^7$ н/м².

Рис. 157. Зависимость теплоемкости жидкого гелия He³ от температуры.

He³ в отличие от He⁴ не обладает сверхтекучестью по крайней мере вплоть до 0,1° К. Теплоемкость He³ не обнаруживает аномалий. Характерно, что ниже 0,15° К теплоемкость линейно зависит от температуры аналогично электронной теплоемкости в металлах. При температурах ниже 1° К He³ имеет специфическую энтропийную диаграмму: энтропия жидкости меньше энтропии твердой фазы.

Рис. 158. Теплоемкость жидкого гелия He⁴ вблизи λ -точки, при которой происходит фазовый переход второго рода.

Кривая имеет характерную форму, напоминающую греческую букву λ .

Характер фазового перехода выясняется по наличию аномалии теплоемкости в T_λ , по температурной зависимости плотности с характерным изломом в T_λ (рис. 148) и по другим явлениям, типичным для фазового перехода второго рода. Рост теплоемкости c при приближении к T_λ происходит по логарифмическому закону

$$c \approx \ln(T - T_\lambda).$$

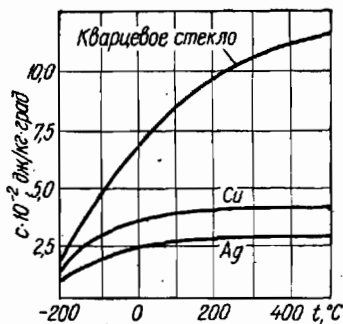


Рис. 152

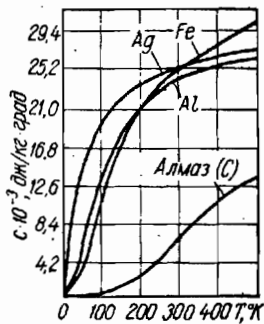


Рис. 153

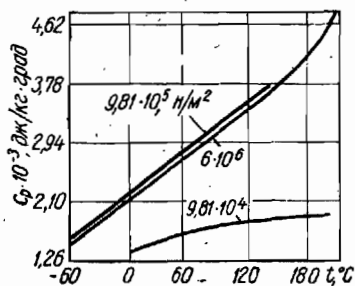


Рис. 154

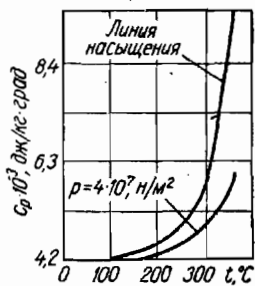


Рис. 155

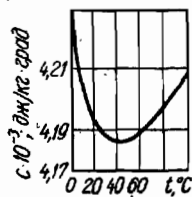


Рис. 156

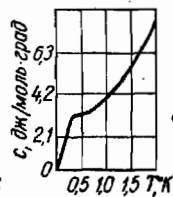


Рис. 157

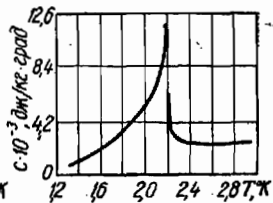


Рис. 158

Р и с. 159. Зависимость теплоемкости воздуха от температуры при различных давлениях.

Р и с. 160. Зависимость теплоемкости углекислого газа от температуры и давления.

Р и с. 161. Зависимость теплоемкости кислорода от температуры.

Р и с. 162. Зависимость теплоемкости водорода и газообразной углекислоты от температуры.

Р и с. 163. Зависимость теплоемкости водяного пара от температуры и давления.

Основные физические свойства воды на линии насыщения (т. е. воды, находящейся под давлением своих насыщенных паров), а также насыщенного водяного пара зависят только от температуры. Физические свойства не на линии насыщения (перегретый пар и сжатая вода) зависят как от температуры, так и от давления. Зависимость c_p от температуры и давления носит сложный характер. При низких давлениях (приблизительно 10^5 н/м²) значения c_p в соответствии с кинетической теорией газов увеличиваются с ростом температуры. При высоких давлениях температурная зависимость изменяет знак, что особенно заметно вблизи кривой насыщения. Такой сложный характер кривых свойствен и для других реальных (сильно сжатых) газов.

Р и с. 164. Зависимость теплоемкости газового этилового спирта от температуры.

Р и с. 165. Теплоемкость для одно- и двухатомных газов в широком интервале температур.

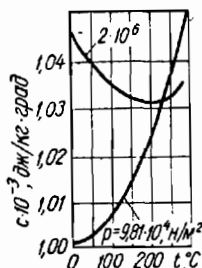


Рис. 159

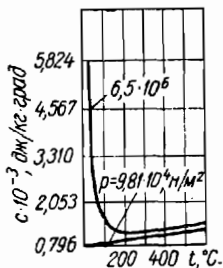


Рис. 160

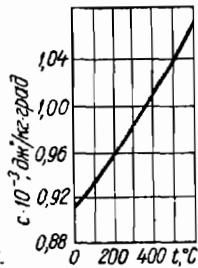


Рис. 161

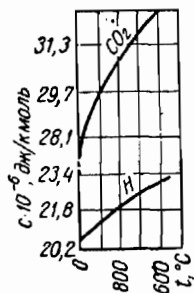


Рис. 162

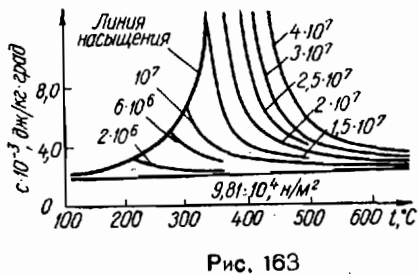


Рис. 163

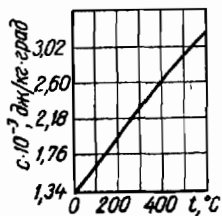


Рис. 164

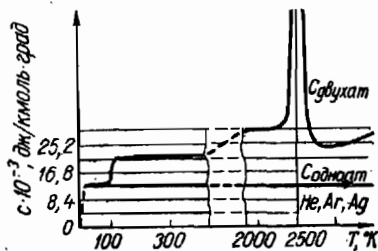


Рис. 165

§ 35. ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ

а) Изопроцессы

Р и с. 166. Изопроцессы.

б) Закон Бойля—Мариотта

Р и с. 167. Изотермы газа по закону Бойля—Мариотта ($T_1 < T_2 < T_3 < T_4$).

Р и с. 168. Зависимость давления газа от занимаемого им объема при постоянной температуре в системе координат p, V .

Р и с. 169. Зависимость давления газа от объема в системе координат $p, 1/V$ ($T_1 < T_2 < T_3$).

в) Закон Гей-Люссака

Р и с. 170. Зависимость объема газа от температуры при постоянном давлении в системе координат t, V ($p_1 < p_2 < p_3$).

г) Закон Шарля

Р и с. 171. Зависимость давления газа от температуры при постоянном объеме в системе координат t, p ($V_1 < V_2 < V_3$).

д) Понятие об идеальном газе

Р и с. 172. Зависимость объема от давления для азота, водорода и гелия.

По оси ординат отложены объемы грамм-молекул соответствующих газов в кубических сантиметрах. Начало координат соответствует давлению $3 \cdot 10^8$ н/м². Объем грамм-молекулы всех газов при нормальных условиях, т. е. при 0°C и давлении $9,81 \cdot 10^4$ н/м², равен $22\,400$ см³. Согласно закону Бойля—Мариотта этот объем при давлении $3 \cdot 10^8$ н/м² должен для всех газов уменьшаться до $7,2$ см³. Диаграмма показывает, что объем газов различен и сильно отличается от нормы ($7,2$ см³). Наибольшие отступления характерны для азота, объем которого при $p = 3 \cdot 10^8$ н/м² равен 36 см³.

Р и с. 173. Зависимость произведения объема на давление от давления при постоянной температуре для азота, водорода и гелия ($pV = 1$).

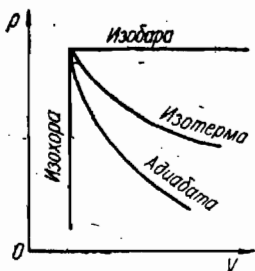


Рис. 166

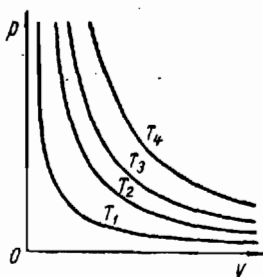


Рис. 167



Рис. 168

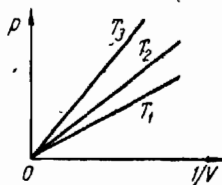


Рис. 169

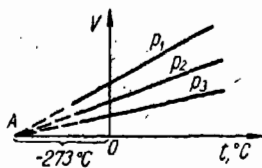


Рис. 170

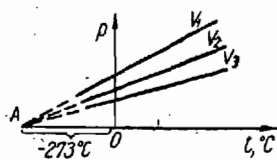


Рис. 171

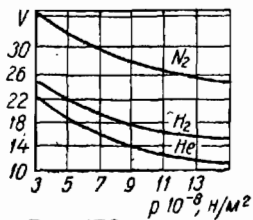


Рис. 172

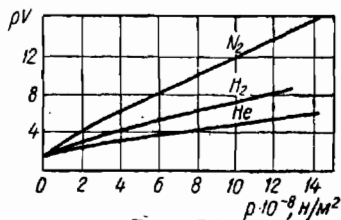


Рис. 173

Р и с. 174. Зависимость произведения объема на давление от давления при постоянной температуре для газов (а, б).

Р и с. 175. Зависимость произведения объема на давление от давления для кислорода.

Р и с. 176. Зависимость термического коэффициента объемного расширения газов от давления.

Р и с. 177. Зависимость отношения pV/T от давления для углекислоты.

Уравнение Менделеева—Клапейрона при больших давлениях неправильно описывает поведение углекислоты.

е) Энергия молекул

Р и с. 178. Зависимость средней кинетической энергии (\bar{U}) поступательного движения молекул идеального газа от абсолютной температуры:

1 — по Ферми, 2 — по Максвеллу, 3 — по Бозе.

Абсолютная температура является мерой средней кинетической энергии поступательного движения молекул идеального газа. Однако в области температур, близких к абсолютному нулю, этот результат оказывается неверным.

Р и с. 179. Зависимость энергии вращательного ($U_{вр}$) или колебательного ($U_{колеб}$) движения молекул от времени при нагревании газа.

Разность между энергиями, соответствующими соседним уровням (высота «ступенек»), для вращательного движения значительно меньше, чем для колебательного. Это связано с тем, что $\nu_{колеб} \gg \nu_{вр}$. Поэтому молекулы значительно легче перевести с более низких на более высокие уровни энергии колебательного движения.

Р и с. 180. Зависимость средней кинетической энергии (\bar{U}), приходящейся на одну колебательную степень свободы атома, от частоты его колебания.

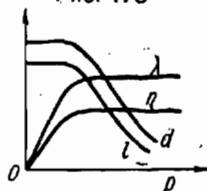
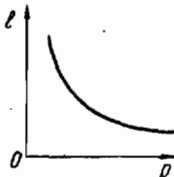
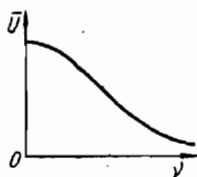
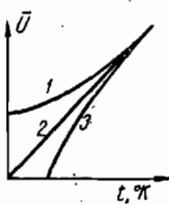
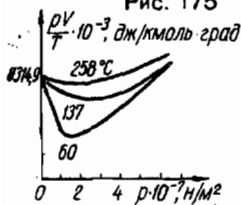
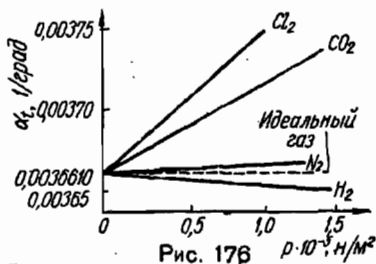
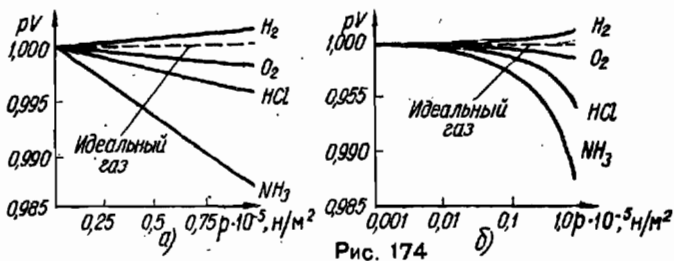
ж) Длина свободного пробега молекул

Р и с. 181. Зависимость длины свободного пробега молекул от давления.

з) Коэффициенты переноса

Р и с. 182. Зависимость коэффициентов переноса от давления:

l — длина свободного пробега, d — коэффициент диффузии.



§ 36. ГАЗ В ПОЛЕ ТЯГОТЕНИЯ

Рис. 183. Распределение давления в воде:

l — расстояние от дна сосуда, наполненного водой до высоты 10,2 м.

Гидростатическое давление определяется формулой

$$p = \rho gh,$$

где h — глубина погружения, ρ — плотность жидкости, которую можно считать постоянной. Формула показывает, что давление в жидкости есть линейная функция от глубины погружения.

Рис. 184. Распределение давления в воздухе:

l — расстояние от уровня моря, км.

Давление газа убывает с высотой над уровнем океана экспоненциально. Никакой определенной границы атмосфера не имеет. На высоте многих сот километров от поверхности Земли еще можно обнаружить наличие весьма разреженного газа.

Рис. 185. Схематическое изображение распределения молекул (n/n_0) водорода, гелия и кислорода при одинаковых условиях в поле тяготения:

l — расстояние от уровня океана, n и n_0 — количество молекул в единице объема (например, в 1 см^3) соответственно на высоте h и на уровне океана.

Чем ниже температура или чем больше вес молекул, тем больше молекул оказывается внизу и тем меньше наверху (а). Наглядное сравнительное распределение по высоте молекул водорода, гелия, кислорода при одной и той же температуре дано на рисунке (б).

Рис. 186. Распределение частиц гуммигута по вертикали в поле тяготения.

Глубина кюветы равна 0,1 мм, размер частиц около 0,6 мк, плотность гуммигута 1210 кг/м^3 . Вес частицы равен $1,23 \cdot 10^{-15}$ н. Горизонтальные линии на микрофотограмме (а, б), сделанной Перреном, проведены так, что расстояние между ними соответствует 10 мк.

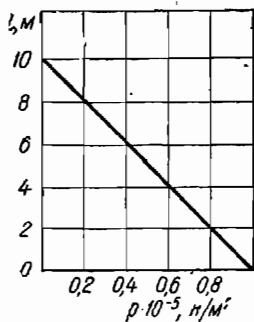


Рис. 183

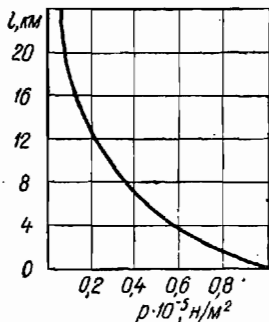


Рис. 184

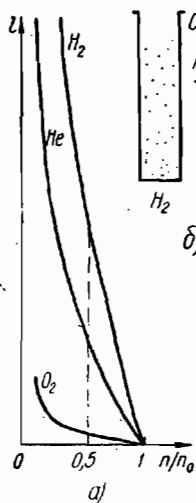
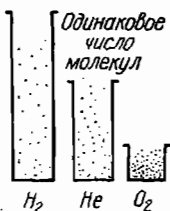


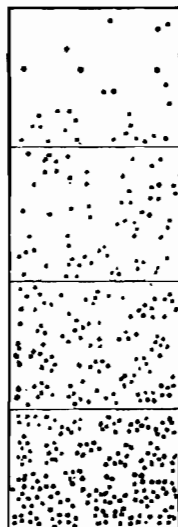
Рис. 185



б)



а)



б)

Рис. 186

§ 37. ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЛЕКУЛ ПО СКОРОСТЯМ

Рис. 187. График закона распределения молекул по скоростям при различных температурах.

Площадь всей ступенчатой фигуры изображает 100% молекул. С уменьшением промежутка скоростей верхняя ступенчатая граница диаграммы (а) приближалась бы по виду к некоторой плавной линии (б). Скорость, соответствующая максимуму, называется наиболее вероятной скоростью ($v_{\text{наивер}}$) при данной температуре.

Рис. 188. График закона распределения молекул (n) по скоростям при различных температурах ($T_1 < T_2 < T_3$).

С повышением температуры максимум смещается в сторону больших скоростей, несколько уменьшается и делается более «размытым» и «пологим».

Рис. 189. Распределение молекул (n) кислорода по скоростям при различной температуре.

Рис. 190. Сопоставление опытных данных о распределении молекул по скоростям с законом Максвелла.

Вдоль оси ординат отложены значения ионизационного тока, вдоль оси абсцисс — смещение атомов по вертикали. Кривая рассчитана теоретически, в предположении, что скорости движения атомов подчиняются закону Максвелла. Точки на графике получены экспериментально. Следует отметить хорошее совпадение теоретически рассчитанной кривой с данными опыта.

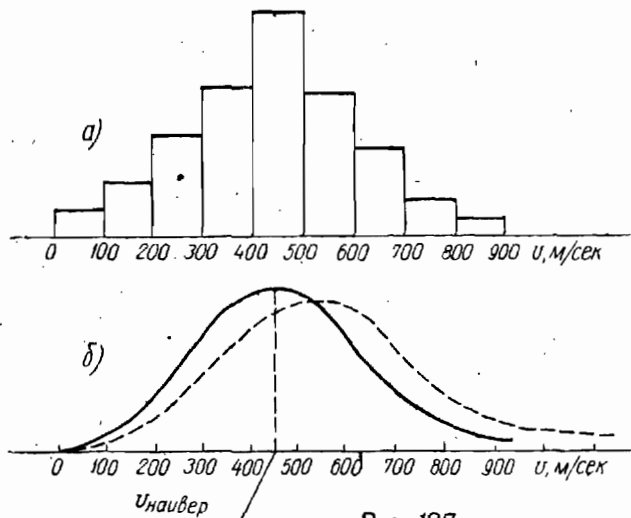


Рис. 187

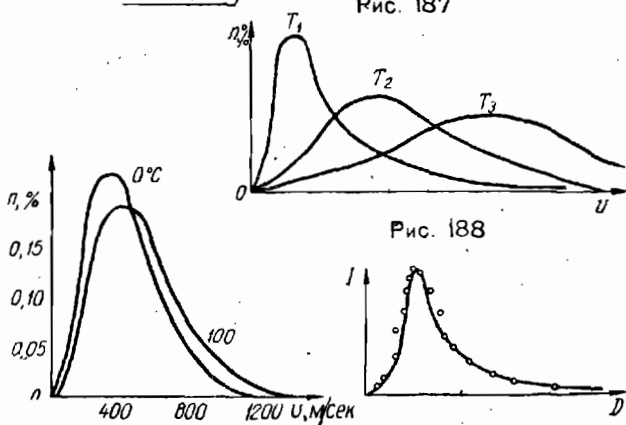


Рис. 188

Рис. 189

Рис. 190

§ 38. РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ И ПАРЫ

а) Экспериментальные изотермы реального газа

Рис. 191. Ход экспериментальной изотермы:

ab — рост давления при сжатии ненасыщенного пара, bc — постоянство давления при конденсации, cd — рост давления при сжатии жидкости.

Рис. 192. Ход экспериментальных изотерм.

Чем выше температура, тем правее и выше лежат изотермы. Точка K называется критической точкой, а изотерма T_K , проходящая через точку K , — критической изотермой.

Рис. 193. Области существования вещества в различных агрегатных состояниях:

1 — жидкость, 2 — газ, 3 — ненасыщенный пар, 4 — область двух фаз (жидкой и парообразной).

Рис. 194. Инверсионная кривая азота (знаки $+$ и $-$ обозначают соответственно положительный и отрицательный эффект Джоуля—Томсона).

б) Давление насыщенных паров

Точки пересечения кривых (рис. 195—197) с пунктирной прямой, соответствующей нормальному давлению, указывают температуры, при которых давление насыщенных паров становится равным нормальному атмосферному давлению. Для воды эта температура равна 100, для этилового эфира — 34,8, для этилового спирта — 78,3, для хлороформа — 60,2 и для бензола — 80,2° С.

Рис. 195. Зависимость давления насыщенных паров воды (1), этилового спирта (2) и этилового эфира (3) от температуры.

Рис. 196. Зависимость давления насыщенных паров хлороформа от температуры.

Рис. 197. Зависимость давления насыщенных паров бензола от температуры.

Рис. 198. Зависимость давления насыщенных паров ртути от температуры.

Рис. 199. Давление насыщенного пара (1) над водным раствором поваренной соли (2) как функция температуры.

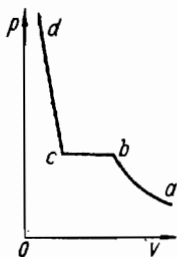


Рис. 191

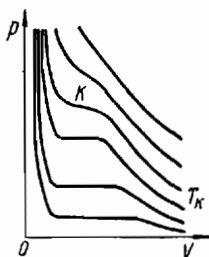


Рис. 192

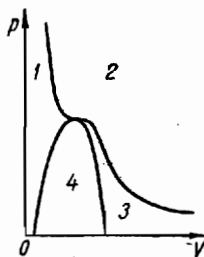


Рис. 193

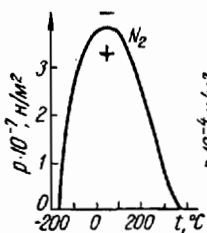


Рис. 194

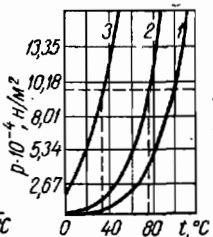


Рис. 195

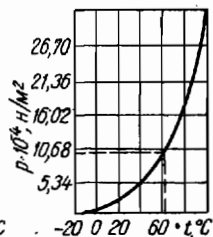


Рис. 196

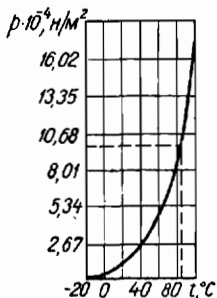


Рис. 197

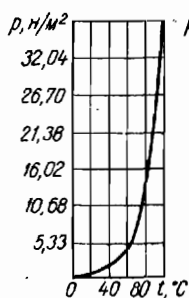


Рис. 198

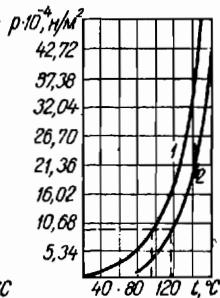


Рис. 199

в) Плотность пара и жидкости, находящихся в равновесии

Рис. 200. Зависимость плотности воды и ее пара, находящихся в равновесии, от температуры:

t_K — критическая температура, K — критическая точка.

Рис. 201. Плотность этилового спирта и его пара, находящихся в равновесии, как функция температуры.

Рис. 202. Плотность гелия (He^3 и He^4).

г) Теплота парообразования

Рис. 203. Зависимость теплоты парообразования воды от температуры.

Рис. 204. Зависимость теплоты парообразования углекислоты от температуры.

д) Вязкость

Рис. 205. Зависимость вязкости водяного пара от температуры при различных давлениях.

е) Сжимаемость

Рис. 206. Зависимость сжимаемости $\left(\frac{pV}{RT}\right)$ водяного пара от давления при различных температурах:
1 — $500^\circ K$, 2 — 550, 3 — 600, 4 — 650, 5 — 700, 6 — 750, 7 — 850.

Коэффициент сжимаемости $\frac{pV}{RT}$ характеризует отступление реальных газов от идеального состояния, для которого $\frac{pV}{RT} = 1$. До $p = 3 \cdot 10^7$ н/м² коэффициент сжимаемости уменьшается с ростом p . Это уменьшение, как и у всех реальных газов, особенно велико при приближении к кривой насыщения.

ж) Теплопроводность

Рис. 207. Зависимость теплопроводности водяного пара от температуры и давления.



Рис. 200

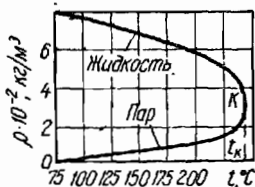


Рис. 201

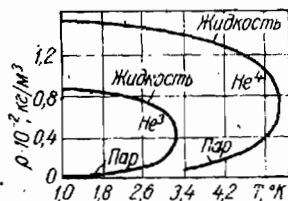


Рис. 202

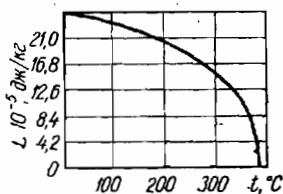


Рис. 203

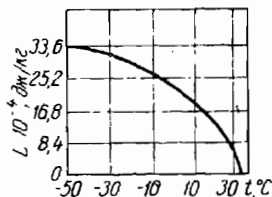


Рис. 204

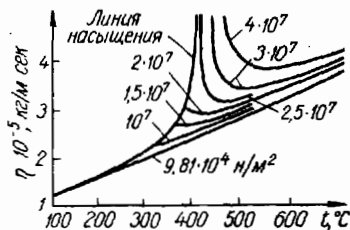


Рис. 205

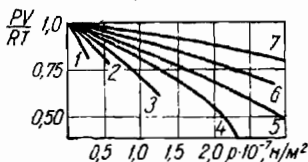


Рис. 206

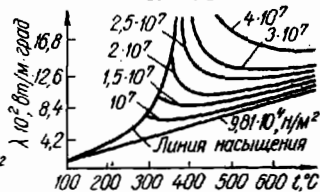


Рис. 207

§ 39. ЖИДКОСТИ

а) Поверхностное натяжение

Р и с. 208. Поверхностное натяжение этилового спирта как функция температуры.

Р и с. 209. Зависимость поверхностного натяжения воды от температуры.

Р и с. 210. Зависимость поверхностного натяжения ртути от температуры.

Р и с. 211. Зависимость поверхностного натяжения олова, свинца и висмута в жидком состоянии от температуры.

Р и с. 212. Зависимость поверхностного натяжения золота от температуры.

Р и с. 213. Зависимость поверхностного натяжения некоторых органических жидкостей на границе с собственным паром (п.) или азотом (N_2) от температуры:

1 — глицерин (N_2), 2 — кислота муравьиная, амид (N_2), 3 — этан четырехбромистый (N_2), 4 — гликоль (п.), 5 — анилин (N_2), 6 — ацетофенон (N_2), 7 — кислота муравьиная (N_2), 8 — кислота трихлоруксусная (N_2), 9 — ацетон (N_2), 10 — хлороформ (N_2), 11 — бензол (п.), 12 — кислота уксусная (п.), 13 — спирт метиловый (п.), 14 — эфир этиловый (п.).

Р и с. 214. Зависимость поверхностного натяжения от температуры на границе жидкость — газ в системе метанол — азот под давлением.

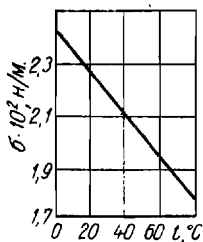


Рис. 208

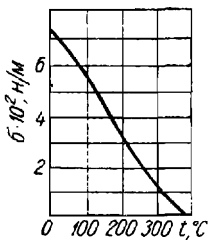


Рис. 209

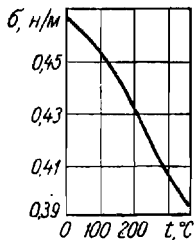


Рис. 210

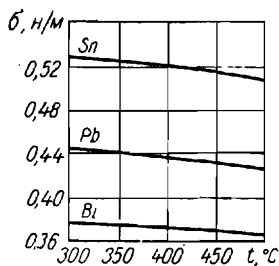


Рис. 211

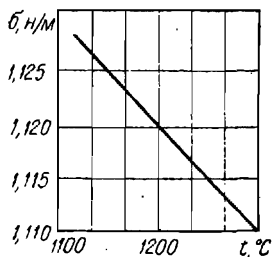


Рис. 212

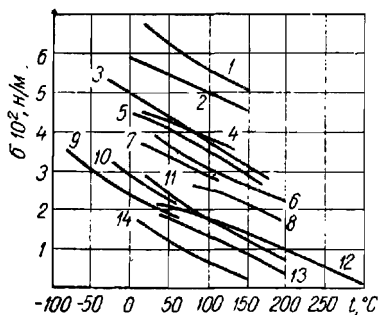


Рис. 213

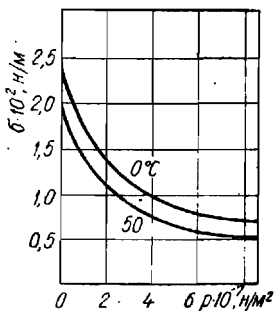


Рис. 214

б) Вязкость

Р и с. 215. Зависимость вязкости воды от температуры.

Р и с. 216. Зависимость вязкости воды от температуры и давления.

Р и с. 217. Зависимость вязкости жидкости (верхняя ветвь кривых) и пара (нижняя ветвь) от температуры:

1 — вода, 2 — углекислота, T/T_K — приведенная температура.

Вязкость жидкостей при температурах значительно ниже критической и аморфных стеклообразных твердых тел существенно отличается от вязкости газов: она определяется подвижностью частиц (молекул и атомов). Поэтому для жидкостей и твердых тел в отличие от газов вязкость обратно пропорциональна коэффициенту самодиффузии и резко падает с повышением температуры по общему закону

$$\eta = A(T) \exp(U/kT),$$

где предэкспоненциальный множитель $A(T)$ по сравнению с $\exp(U/kT)$ — слабая функция от T ; а U — энергия активации вязкого течения или разрыхления жидкости.

Р и с. 218. Зависимость текучести воды от температуры.

Р и с. 219. Вязкость смазочных масел как функция температуры:

1 — авиационное масло, 2 — автол, 3 — веретенное масло.

Р и с. 220. Вязкость некоторых расплавленных металлов.

Р и с. 221. Зависимость удельного объема жидкостей от текучести (закон Бачинского):

1 — бензол, 2 — уксуснокислый этил, 3 — уксусная кислота.

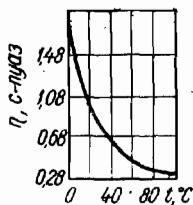


Рис. 215

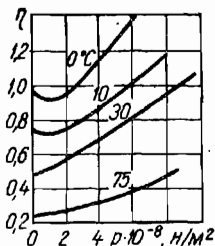


Рис. 216

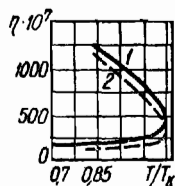


Рис. 217

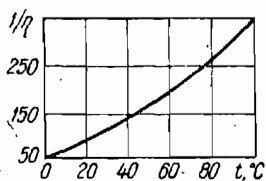


Рис. 218

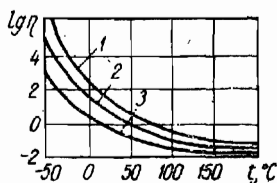


Рис. 219

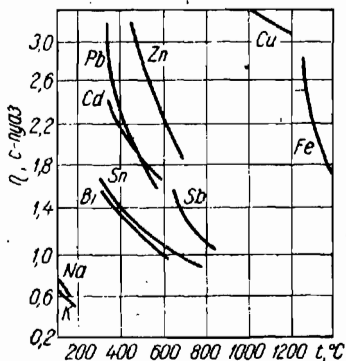


Рис. 220

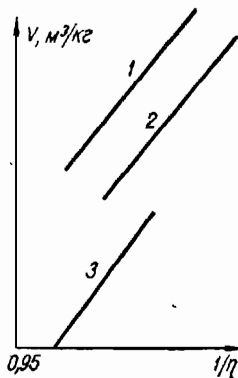


Рис. 221

в) Растворы

Р и с. 222. Зависимость растворимости (1 г вещества в 100 г воды) некоторых веществ от температуры:

1 — сахар, 2 — сода, 3 — азотнокислый свинец, 4 — бромистый натрий, 5 — алюминиевые квасцы, 6 — хлористый натрий, 7 — медный купорос.

Р и с. 223. Фазовая диаграмма растворов жидкого гелия (He^3 и He^4).

$T_c^{\text{кр}}$ ($0,88^\circ \text{K}$) — критическая температура смещения. He^3 и He^4 неограниченно растворяются друг в друге выше критической точки смещения $T_c^{\text{кр}}$. Ниже этой температуры смесь расслаивается на две фазы с различной концентрацией:

$$x = \frac{\text{He}^3}{\text{He}^3 + \text{He}^4}$$

С повышением концентрации температура, соответствующая λ -точке смеси, смещается в сторону низких температур. При $T = 0,67^\circ \text{K}$ и $x = 82\%$ λ -линия пересекает кривую расслоения. Выше $0,67^\circ \text{K}$ обе фазы расслоившейся смеси сверхтекучи, ниже этой температуры верхняя фаза нормальна, нижняя — сверхтекуча.

Р и с. 224. Понижение давления пара водных растворов маннита:

p_0 — давление пара над поверхностью чистого растворителя, н/м^2 ; p — давление над поверхностью раствора, н/м^2 ; n — число молей в 1 кг воды.

Р и с. 225. Растворимость водорода (%) в жидком аммиаке.

Р и с. 226. Растворимость жидкого аммиака (%) в сжатом азоте.

Р и с. 227. Степень диссоциации углекислого газа (%) при различных температурах и давлениях.

Р и с. 228. Дисперсия звука в углекислоте:

c — скорость звука.

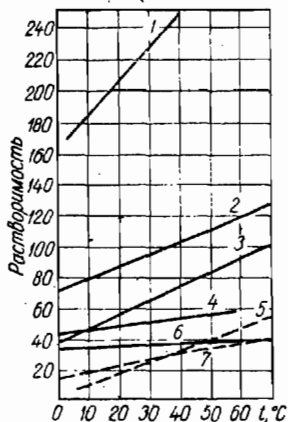


Рис. 222

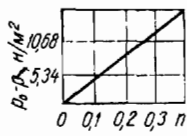


Рис. 224

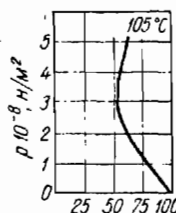


Рис. 225

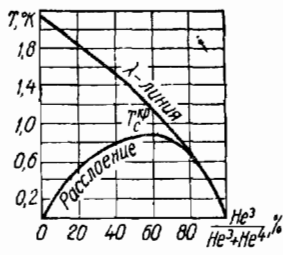


Рис. 223

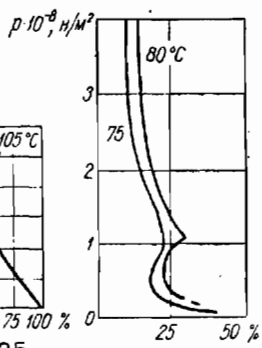


Рис. 226

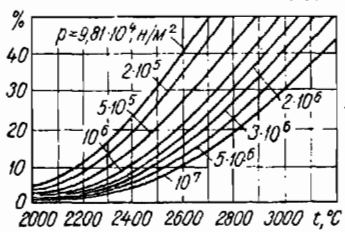


Рис. 227

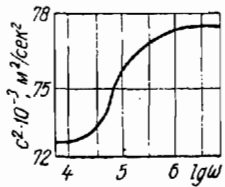


Рис. 228

г) Сжимаемость

Рис. 229. Сжимаемость жидкостей:

1 — н-пентан, 2 — этиловый спирт, 3 — вода, 4 — глицерин; V/V_0 — относительный объем, где V_0 — объем при давлении 1 н/м^2 и температуре 0°С .

Величина сжимаемости зависит от молекулярной структуры жидкости. При больших давлениях ($2,5 \cdot 10^9$ — $5 \cdot 10^9 \text{ н/м}^2$) почти все жидкости ведут себя одинаково и различие в сжимаемости редко превышает 10%.

д) Теплопроводность

Рис. 230. Зависимость теплопроводности воды от температуры.

Теплопроводность воды в отличие от обычных жидкостей в некотором диапазоне температур (от 0 до 150°С) увеличивается с ростом температуры.

е) Скрытая теплота испарения

Рис. 231. Скрытая теплота испарения воды.

Верхняя кривая изображает зависимость удельной теплоты испарения от температуры. С повышением температуры скрытая теплота испарения уменьшается и при 374°С обращается в нуль. Это означает, что при 374°С жидкость и насыщенный пар представляют собой одно и то же. Температура, при которой жидкость и насыщенный пар обладают одинаковыми свойствами, называется критической.

Удельная теплота испарения Λ идет на увеличение внутренней энергии Λ_1 и на внешнюю работу расширения ψ ($\Lambda = \Lambda_1 + \psi$).

Рис. 232. Зависимость общего количества тепла, потребного для испарения жидкости, от температуры.

Для техники представляет значительный интерес общее количество тепла r , потребное для того, чтобы 1 г воды, взятый при 0°С , перевести в пар, имеющий температуру t . Очевидно, r равно сумме теплоты q , необходимой для нагревания 1 г жидкости до температуры t , и скрытой теплоты испарения Λ .

$$r = q + \Lambda.$$

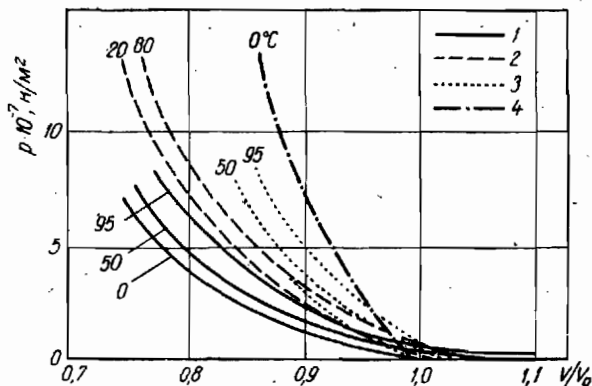


Рис. 229



Рис. 230

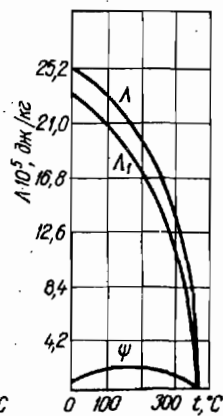


Рис. 231

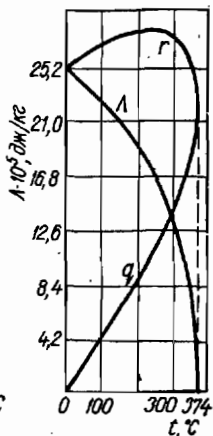


Рис. 232

§ 40. ТВЕРДОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА

а) Типы кристаллических решеток

Резко выраженная анизотропия монокристаллов является следствием упорядоченного размещения частиц кристалла в узлах кристаллической решетки. Кристаллическая решетка складывается из ячеек. Под ячейкой понимают такую часть решетки, перемещение которой параллельно самой себе позволяет получить всю кристаллическую решетку.

Представление об упорядоченном расположении частиц в кристаллах было высказано в виде гипотезы Браве в 1848 г. В строгую научную систему кристаллография была впервые приведена трудами замечательного русского ученого Е. С. Федорова, который создал математическое учение о симметрии и исследовал все мыслимые пространственные расположения частиц кристалла, исходя из того, что плотное заполнение пространства ячейками возможно только при определенной форме ячеек. Федоров установил, что может существовать 230 различных «пространственных групп», объединяемых по признакам симметрии в 32 класса симметрии.

Р и с. 233. Решетка поваренной соли.

Р и с. 234. Решетка алмаза (а) и графита (б).

Р и с. 235. Решетка α -, β - и δ -железа (а) и γ -железа (б).

Р и с. 236. Решетка хлористого цезия.

Р и с. 237. Решетка цинковой обманки.

Р и с. 238. Решетка флюорита.

Р и с. 239. Решетка меди.

Р и с. 240. Структура решетки типа перовскит.

Р и с. 241. Решетка куприта.

Р и с. 242. Решетка рутила.

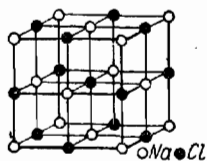


Рис. 233

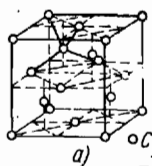


Рис. 234

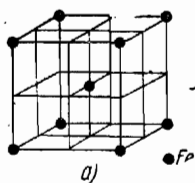
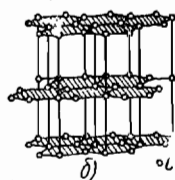


Рис. 235

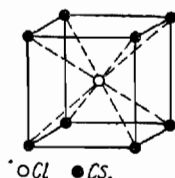
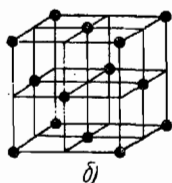


Рис. 236

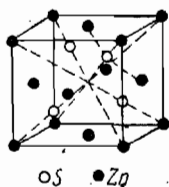


Рис. 237

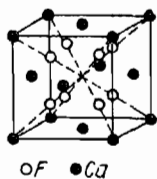


Рис. 238

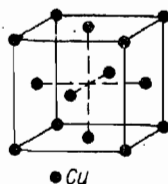


Рис. 239

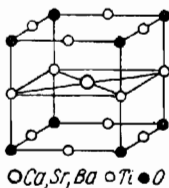


Рис. 240

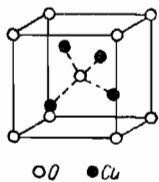


Рис. 241

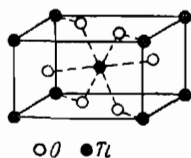


Рис. 242

б) Взаимодействие молекул

Рис. 243. Взаимодействие молекул.

Рис. 244. Зависимость силы взаимодействия молекул от расстояния (r) между ними.

Частицы находятся в равновесии (рис. 243, *a*; точка *B* на рис. 244), когда расстояние между их центрами AB равно примерно $3 \cdot 10^{-10}$ м, — таков порядок молекулярных расстояний в твердых и жидких телах. При уменьшении расстояния (рис. 243, *б*) возникает сила отталкивания, и кривая круто поднимается вверх. При расстоянии больше $3 \cdot 10^{-10}$ м возникают силы притяжения, и кривая опускается вниз. На расстояниях $15 \cdot 10^{-10}$ м (рис. 243, *в*) силы притяжения и отталкивания становятся исчезающе малыми, и кривая сливается с осью абсцисс.

в) Сублимация, плавление и кристаллизация твердых тел

Рис. 245. Температура плавления твердого кристаллического тела.

С течением времени температура твердого тела непрерывно растет. По достижении температуры плавления $t_{пл}$ тело начинает плавиться, и при дальнейшем нагревании его температура остается постоянной. Все подводимое тепло при этом затрачивается на плавление твердого тела. Температура смеси твердого тела с его расплавом остается постоянной и равной температуре плавления до тех пор, пока все твердое тело не превратится в жидкость. При дальнейшем нагревании температура начнет опять расти.

Рис. 246. Температура плавления аморфного тела.

Рис. 247. Диаграмма состояния. Тройная точка:

1 — твердая фаза, 2 — жидкая, 3 — газообразная.

При увеличении давления для большинства веществ температура плавления повышается — кривая BT (*a*). У некоторых веществ (вода, галлий, висмут и чугун) плотность жидкой фазы больше, чем твердой, и при увеличении давления температура плавления понижается — кривая BT (*б*). В тройной точке T вещество одновременно находится в твердой, жидкой и газообразной фазах, которые равновесно существуют друг с другом. Кривая AT — кривая сублимации, TK — кривая парообразования.

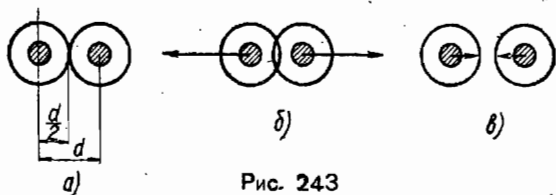


Рис. 243

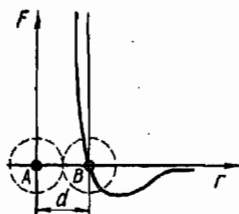


Рис. 244

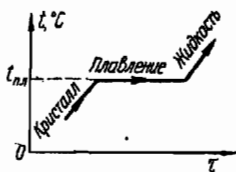


Рис. 245

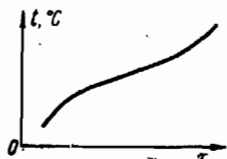


Рис. 246

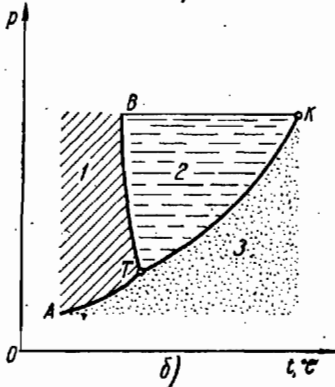
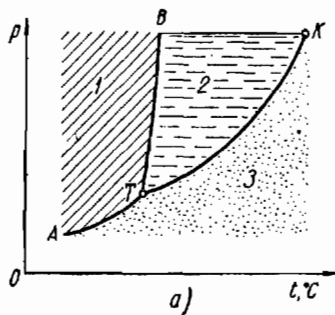


Рис. 247

Рис. 248. Диаграмма состояния воды.

Переход из одной кристаллической модификации в другую называется рекристаллизацией и происходит при определенной температуре и при данном давлении. Подобно плавлению и отвердеванию такой переход сопровождается выделением (или поглощением) определенной теплоты перехода, называемой теплотой рекристаллизации. Величина теплоты рекристаллизации обычно меньше теплоты плавления.

У некоторых веществ встречаются модификации, устойчивые лишь при высоких давлениях. Например, у воды имеется семь полиморфных модификаций льда, которые все, кроме четвертой, устойчивы только при более высоких давлениях, т. е. не могут находиться в равновесии с насыщенным паром. Лед VII плавится при давлении $4 \cdot 10^9$ н/м² и температуре 190° С.

Рис. 249. Диаграмма состояния жидкого гелия.

При температуре 2,172° К (так называемая λ -точка) в жидком гелии (He⁴), находящемся под давлением насыщенного пара (5039 н/м²), происходит фазовый переход второго рода. Гелий выше этой температуры называется He I, ниже ее — He II.

Рис. 250. Диаграмма состояния висмута.

Висмут имеет восемь полиморфных модификаций.

Рис. 251. Диаграмма состояния углекислоты.

Углекислота (СО₂) имеет две модификации, из которых вторая устойчива лишь при давлениях более высоких, чем в тройной точке 2. Точка 1 — тройная точка первой модификации.

Рис. 252. Зависимость температуры плавления олова, фосфора и воды от давления.

Рис. 253. Зависимость температуры плавления некоторых элементов от давления.

Рис. 254. Изменение температуры жидкости при охлаждении.

Кристаллизация начинается при точке отвердевания (а). Жидкость переохлаждается, затем начинается кристаллизация, и температура возрастает до $t_{пл}$ (б). Кристаллизации не происходит, тело остается аморфным (в).

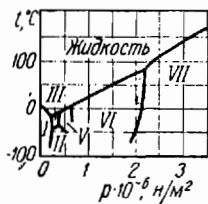


Рис. 248

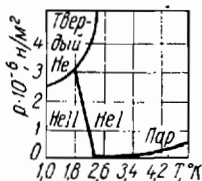


Рис. 249

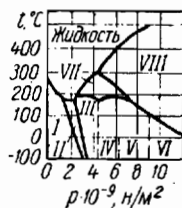


Рис. 250



Рис. 251

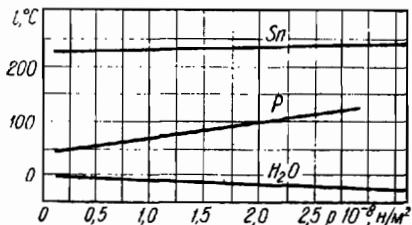


Рис. 252

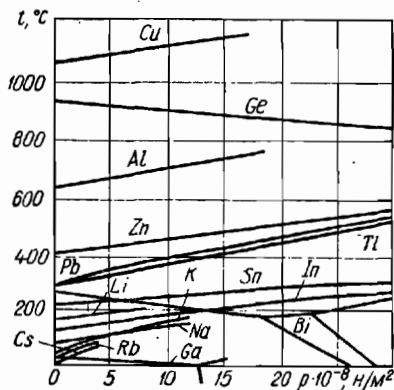


Рис. 253

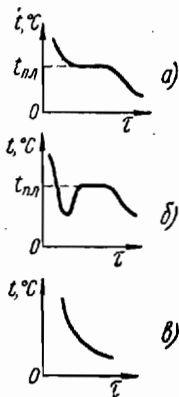


Рис. 254

Р и с. 255. Температура отвердевания воды.

Р и с. 256. Зависимость температуры замерзания раствора поваренной соли от содержания в нем соли (%).

С изменением процентного содержания соли в растворе температура замерзания сначала понижается (до -21°C при 22,5%), а затем при дальнейшем увеличении содержания соли повышается.

Р и с. 257. Изменение объема свинца (a), воска (b) и льда (ϵ) при плавлении.

Р и с. 258. Число центров кристаллизации (n) в зависимости от температуры для пиперидина.

График показывает, что максимальное количество центров кристаллизации возникает при некоторой температуре ниже точки отвердевания. Температура плавления отмечена ($t_{\text{пл}}$).

г) Сжимаемость

Р и с. 259. Сжимаемость $\left(\frac{\Delta V}{V_0}\right)$ твердых тел:

V_0 — объем при давлении $9,8 \cdot 10^4$ н/м.²

д) Кристаллизация растворов. Диаграмма плавкости

Р и с. 260. Диаграмма плавкости:

1 — однородная жидкость, 2 — кристаллы B в жидкости, 3 — кристаллы A в жидкости, 4 — кристаллы B в эвтектике, 5 — кристаллы A в эвтектике; A — температура плавления вещества A , $^\circ\text{C}$; B — температура плавления вещества B , $^\circ\text{C}$.

Линия BCA дает температуру кристаллизации в зависимости от процентного состава сплава. Точка C называется эвтектической. При охлаждении жидкости от температуры K_1 до температуры, соответствующей точке K , на линии AC начнет кристаллизоваться вещество A . Кристаллы его на диаграмме представлены точкой K_A .

Р и с. 261. Диаграмма плавкости сплава сурьмы и свинца.

Температура плавления сурьмы 630 и свинца 326°C . Эвтектическая точка соответствует 246°C при 13% Sb и 87% Pb .

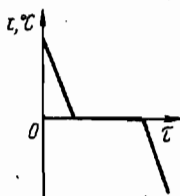


Рис. 255

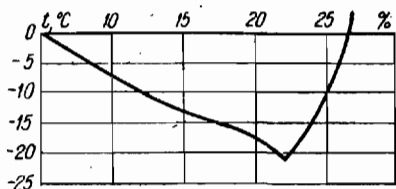
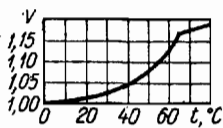
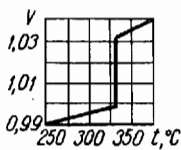


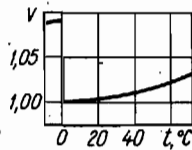
Рис. 256



а)



б)



в)

Рис. 257

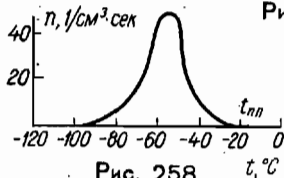


Рис. 258

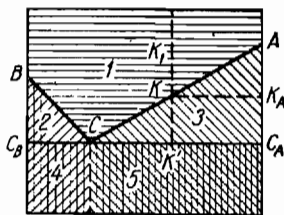


Рис. 260

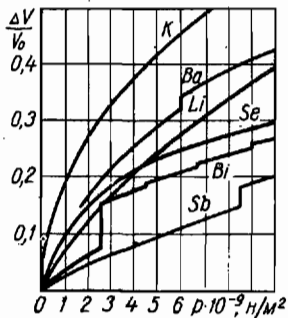


Рис. 259

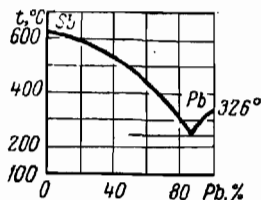


Рис. 261

Рис. 262. Диаграмма плавкости системы, составные части которой образуют соединение.

Эта диаграмма представляет сочетание двух простых диаграмм, у которых имеется общая составная часть AB . При охлаждении расплава с составом, отвечающим точке a , кристаллизация начнется с выпадения кристалликов вещества A . Содержание вещества A в расплаве будет уменьшаться, а температура расплава понижаться вплоть до температуры, соответствующей эвтектической точке E_1 . При этой температуре одновременно с выпадением кристалликов вещества A начнут выпадать кристаллики соединения AB . В случае расплава с составом, отвечающим точке b , первоначально при охлаждении будут выпадать кристаллики соединения AB , а состав расплава будет приближаться к эвтектике. Сходная картина наблюдается при охлаждении расплавов, составы которых на диаграмме плавкости заключены между точками AB и B . Затвердевание расплава с составом a_1 начинается с выпадения кристалликов соединения AB . Температура расплава понижается до температуры, соответствующей эвтектической точке E_2 . Затвердевание расплава заканчивается кристаллизацией эвтектики. При кристаллизации расплава с составом b_1 первоначально выпадают кристаллы вещества B , а заканчивается затвердевание кристаллизацией эвтектики, состоящей из кристаллов вещества B и кристаллов соединения AB .

Рис. 263. Диаграмма плавкости системы никель — медь.

При температурах, превосходящих 1702°C , жидкий никель смешивается в любых пропорциях с медью. Если расплав с составом, отвечающим точке a , охладить до 1500° , он начнет кристаллизоваться, причем выпадающие кристаллики представляют собой твердый раствор меди в никеле. При этом они более богаты никелем, чем исходный расплав. Для нахождения состава образующихся кристаллов следует провести из точки, соответствующей началу кристаллизации, прямую, параллельную оси абсцисс, до пересечения ее с кривой, ограничивающей снизу чечевицеобразную фигуру, изображенную на диаграмме плавкости, и опустить из этой точки перпендикуляр на ось абсцисс, как показано стрелками на графике.

По мере кристаллизации незатвердевшая жидкость будет обогащаться медью, а температура кристаллизации — понижаться. Процесс кристаллизации окончится, когда температура кристаллизации понизится до 1415° , при которой состав выпадающих кристалликов начинает совпадать с составом исходного расплава.

Рис. 264. Диаграмма плавкости системы висмут — сурьма.

Верхняя кривая определяет зависимость температуры кристаллизации расплава от состава расплава; нижняя кривая дает зависимость между температурой кристаллизации и составом образующихся твердых растворов. Если, например, расплав, содержащий 40% сурьмы и 60% висмута, охлаждать, то при температуре около 530° С начнут выпадать кристаллики, представляющие собой твердый раствор 8%-ного висмута в сурьме (состав этого твердого раствора определяется абсциссой точки *S*), тогда как состав жидкой фазы при той же температуре определяется абсциссой точки *L*. По мере выпадения кристалликов твердого раствора остающийся расплав вследствие малого содержания висмута в твердом растворе постепенно обогащается им. В связи с этим температура кристаллизации понижается; точка, характеризующая состояние расплава, будет перемещаться по верхней кривой вниз; состав выпадающих кристалликов будет при понижении температуры изменяться соответственно абсциссам точек нижней кривой. Когда температура кристаллизации понизится настолько, что состав твердого раствора окажется таким, каков был состав исходного расплава, весь расплав закристаллизуется.

Рис. 265. Диаграмма плавкости системы висмут — теллур.

Если химическое соединение не образует твердых растворов и плавится без разложения, то диаграмма принимает вид, представленный на графике для сплава висмута с теллуrom. Максимум кривой соответствует соединению Bi_2Te_3 . Каждая часть диаграммы, лежащая вправо и влево от максимума, подобна диаграммам первого типа. В левой части имеется эвтектическая точка для сплава Bi и Bi_2Te_3 , а в правой — для сплава Te и Bi_2Te_3 .

Рис. 266. Уменьшение температуры при равномерном охлаждении сплава:

I — жидкость, *II* — кристаллизация, *III* — твердое тело. Участок *1—2* соответствует охлаждению раствора до температуры начала кристаллизации T_0 ; участок *2—3* — выделению из раствора кристаллов того вещества, избыток которого в растворе определяет отличие любой точки на диаграмме плавкости от эвтектической (рис. 260); участок *3—4* — кристаллизации эвтектики; участок *4—5* — охлаждению твердого сплава. При плавлении сплава процесс идет в обратном направлении.

Рис. 267. Кривая охлаждения расплава свинца и сурьмы (10%).

При температуре 260°C начинается выпадение кристаллов свинца, и остающийся расплав оказывается обогащенным сурьмой. Когда вследствие постепенной кристаллизации свинца состав сплава оказывается соответствующим эвтектике, закристаллизовывается весь расплав. Об этом на кривой охлаждения свидетельствует прямолинейный участок при температуре 240°C .

Если исходный расплав содержит сурьмы больше, чем соответствует эвтектике, то при охлаждении выпадают кристаллики сурьмы, и остающийся расплав постепенно обогащается свинцом, пока не будет достигнут состав эвтектики.

е) Диффузия в жидких и твердых телах

Рис. 268. Распределение концентрации в теле для значения $\sqrt{D\tau} = 3$:

l — расстояние от границы.

ж) Адсорбция

Рис. 269. Изотермы адсорбций (Γ) углекислоты на угле.

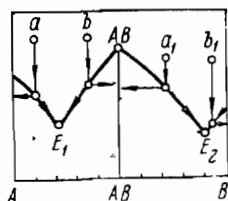


Рис. 262

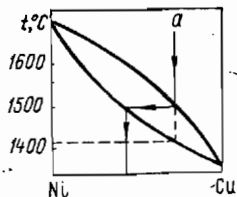


Рис. 263

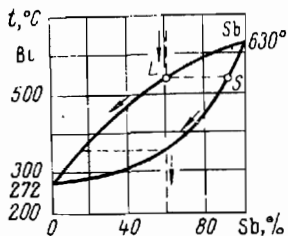


Рис. 264

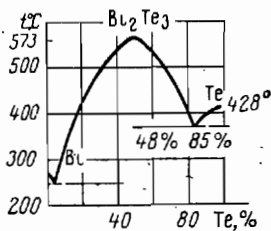


Рис. 265

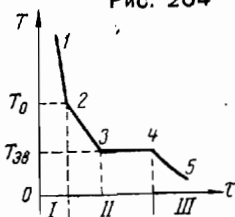


Рис. 266

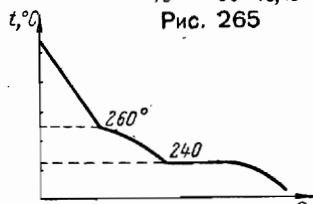


Рис. 267

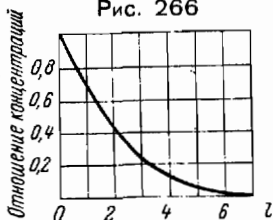


Рис. 268

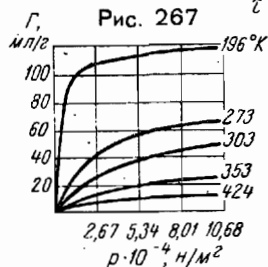


Рис. 269

§ 41. ТЕХНИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ

Рис. 270. Схема и диаграмма работы четырехтактного двигателя внутреннего сгорания.

I. Такт-всасывание. Давление в цилиндре постоянно и равно приблизительно внешнему атмосферному давлению. К концу движения поршня вправо впускной клапан закрывается. Описанная часть цикла изображена графически в координатах pV (а).

II. Такт-сжатие. Графически показано адиабатическое сжатие горючей смеси (б).

III. Такт-вспышка и расширение. При вспышке газ сильно нагревается, и давление его почти мгновенно повышается (изохорический процесс, изображенный вертикальной линией). Расширение газа при рабочем ходе поршня можно считать приближенно адиабатическим (в).

IV. Такт-выхлоп. Когда при расширении (III такт) поршень достигает правого крайнего положения, открывается выхлопной клапан (изохорический процесс). При обратном движении поршень вытесняет из цилиндра в воздух отработанные газы при давлении, почти равном атмосферному (изобарический процесс; г). Этим процессом завершается цикл двигателя внутреннего сгорания и начинается новый цикл в том же порядке.

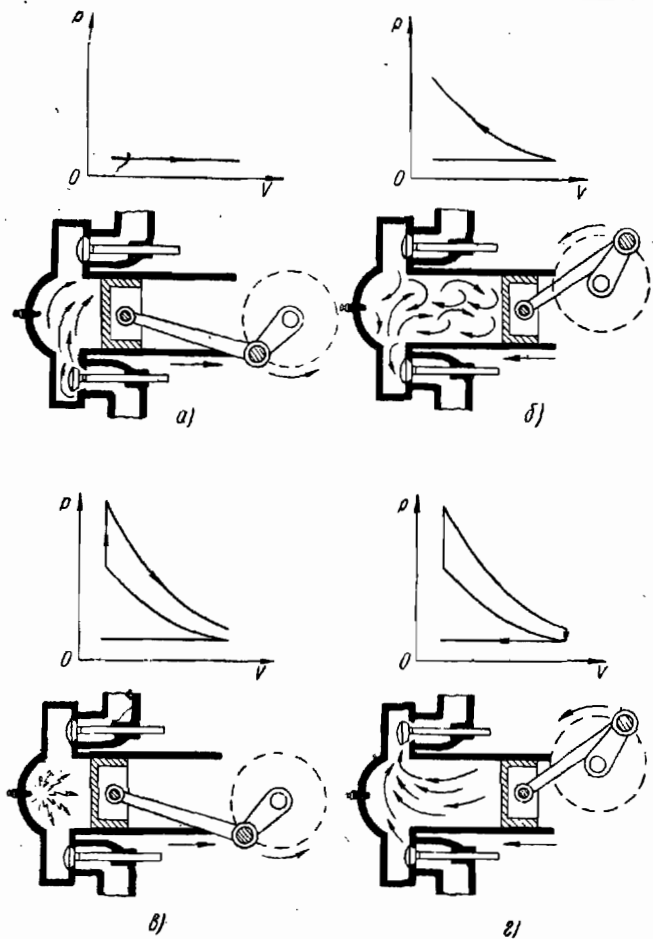


Рис. 270

Р и с. 271. Цикл поршневой паровой машины.

Вначале пар из котла поступает в цилиндр, давление пара в цилиндре увеличивается от p_0 до p_1 . Этот процесс происходит при постоянном объеме (ветвь EA). При продолжающемся доступе пара из котла в цилиндр поршень движется слева направо при $p_1 = \text{const}$, в результате чего объем увеличивается (ветвь AB). При движении поршня направо происходит адиабатическое расширение пара (ветвь BC), а доступ пара из котла в цилиндр прекращается. Ветвь CD соответствует выходу пара из цилиндра в холодильник. При обратном движении поршень выталкивает оставшиеся пары при $p_0 = \text{const}$.

Р и с. 272. Рабочий цикл двигателя Дизеля.

При первом такте поршень засасывает в цилиндр воздух при атмосферном давлении p_0 (ветвь EA). При втором такте поршень сжимает этот воздух адиабатически (ветвь AB) до давления p_1 . Температура повышается от T_0 до T_1 .

В начале третьего такта в цилиндр вбрызгивается горючее, которое воспламеняется в горячем воздухе и сгорает, вызывая перемещение поршня при постоянном давлении p_1 (ветвь BC); температура повышается от T_1 до T_2 . Затем смесь продуктов горения и воздуха адиабатически расширяется (ветвь CD). В конце третьего такта (точка D) открывается выпускной клапан, в результате чего давление в цилиндре падает до p_0 (ветвь DA). При четвертом такте смесь удаляется из цилиндра (ветвь AE).

Р и с. 273. Рабочий цикл воздушно-реактивного двигателя.

Поступающий в диффузор воздух проходит из его более узкой головной части в расширенную, благодаря чему скорость воздуха понижается. При этом происходит сжатие воздуха, изображаемое адиабатой (точнее, политропой) AB . В камере сгорания происходит нагревание рабочей смеси при постоянном давлении p_1 (прямая BC); температура смеси повышается от T_1 до T_2 , а ее объем возрастает от V_2 до V_3 . В сопле происходит дальнейшее адиабатическое расширение (CD), температура рабочей смеси понижается от T_2 до T_3 . Практически цикл остается незамкнутым, но на схеме его можно замкнуть, полагая, что рабочее вещество вновь сжимается от объема V_4 до объема V_1 при постоянном давлении p_0 (прямая DA).

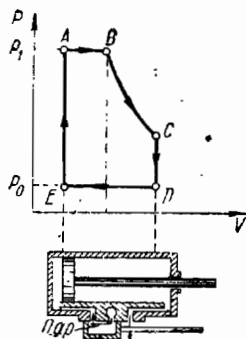


Рис. 271

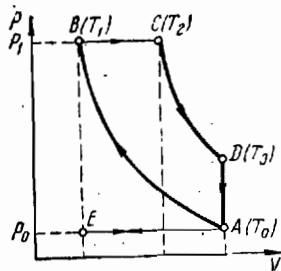


Рис. 272

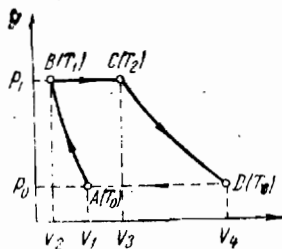


Рис. 273

IV. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

- C — электрическая емкость; концентрация
- E — напряженность электрического поля
- E — электродвижущая сила
- I — величина тока
- N — мощность
- q — электрический заряд
- P — поляризация
- p — давление
- R — сопротивление
- T — период
- T — температура, °K
- t — температура, °C
- U — электрическое напряжение (потенциал)
- α — коэффициент термоэлектродвижущей силы
- δ — плотность тока
- ϵ — диэлектрическая проницаемость
- η — коэффициент полезного действия
- λ — длина волны
- ν — частота колебания
- ρ — удельное сопротивление
- σ — электропроводность; удельная электропроводность
- Φ — лучистый поток

§ 42. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРЕМЫ ОСТРОГРАДСКОГО — ГАУССА К РАСЧЕТУ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

а) Поле поверхности заряженной сферы

Рис. 274. Зависимость вектора напряженности поля (\vec{E}) от расстояния (r) до центра поверхности заряженной сферы.

Поле внутри сферической поверхности равно нулю. Во внешнем пространстве поверхность заряженной сферы действует так, как если бы весь заряд был расположен в центре ее (R — радиус сферы).

б) Поле объемно заряженной сферы

Рис. 275. Зависимость вектора напряженности поля (\vec{E}) от расстояния (r) до центра объемно заряженной сферы.

Поле внутри заряженной сферы возрастает пропорционально расстоянию от центра сферы. Во внешнем пространстве сфера действует так, как если бы весь заряд был сосредоточен в центре ее.

в) Поле поверхности заряженного цилиндра

Рис. 276. Зависимость вектора напряженности поля (\vec{E}) от расстояния (r) до оси цилиндра.

§ 43. ПРОВОДНИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Рис. 277. Зависимость потенциала от заряда для заряженного проводника.

§ 44. ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

а) Поляризация

Рис. 278. Зависимость поляризации твердодипольных диэлектриков от напряженности поля (α — коэффициент поляризации вещества).

б) Диэлектрическая проницаемость

Рис. 279. Зависимость диэлектрической проницаемости неполярных (1) и полярных (2) веществ от температуры: I — твердое состояние, II — жидкое, III — газообразное.

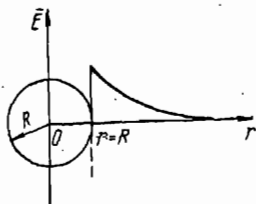


Рис. 274

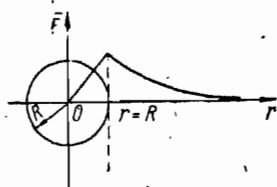


Рис. 275

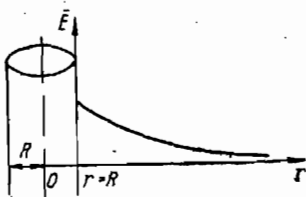


Рис 276

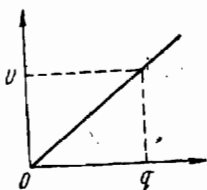


Рис. 277



Рис. 278

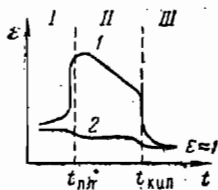


Рис. 279

Р и с. 280. Зависимость величины $(\epsilon - 1)$ для газов от температуры.

Величина $(\epsilon - 1)$ приближенно пропорциональна плотности газа.

Р и с. 281. Зависимость величины $(\epsilon - 1)$ для газов от давления:

A — постоянная величина.

Р и с. 282. Зависимость диэлектрической проницаемости неполярных жидкостей от температуры:

1 — сероуглерод, 2 — толуол, 3 — бензол, 4 — четыреххлористый углерод; \circ — точка замерзания, \bullet — переохлажденная жидкость, Δ — точка кипения.

Р и с. 283. Зависимость диэлектрической проницаемости некоторых полярных жидкостей от температуры:

1 — нитробензол, 2 — этиловый спирт, 3 — метиловый спирт, 4 — этиловый эфир, 5 — хлороформ, 6 — глицерин.

Р и с. 284. Зависимость диэлектрической проницаемости этилового эфира от температуры.

Точка резкого возрастания диэлектрической проницаемости соответствует температуре плавления.

Р и с. 285. Зависимость диэлектрической проницаемости льда от температуры и частоты поля.

Р и с. 286. Зависимость диэлектрической проницаемости твердого сероводорода от температуры при частоте 5 *кГц*.

Понижение температуры приводит к значительному росту ϵ , а следовательно, и поляризуемости, определяющей значение ϵ . Этот рост связан с действием ориентационного механизма поляризуемости, так как молекулы сероводорода обладают значительным собственным дипольным моментом. При 105° К наблюдается резкое падение ϵ до значений, соответствующих электронной поляризуемости. Это падение обусловлено «замораживанием» ориентации диполей в кристалле. Небольшие скачки ϵ при более высоких температурах связаны со структурными изменениями кристалла.

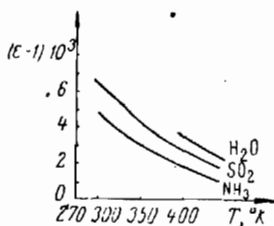


Рис. 280

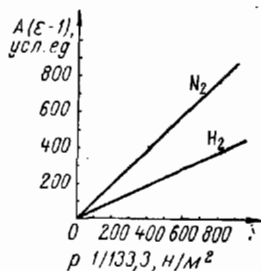


Рис. 281

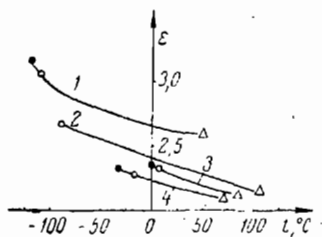


Рис. 282

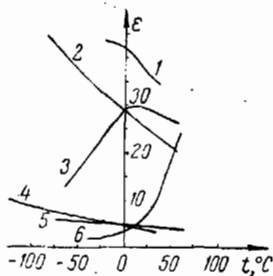


Рис. 283

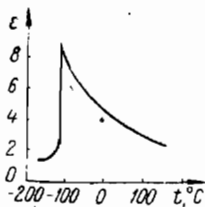


Рис. 284

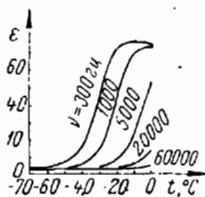


Рис. 285

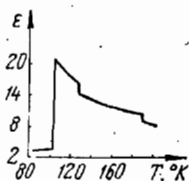


Рис. 286

§ 45. СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКИ И АНТИСЕГНЕТОЭЛЕКТРИКИ

а) Поляризация

Рис. 287. Зависимость поляризации сегнетовой соли от времени при различных приложенных к кристаллу (толщиной 7,2 см) напряжениях и при температуре 0° С.

Все вещества, имеющие аномально большую диэлектрическую проницаемость, носят название сегнетоэлектриков. В отношении электрической поляризации сегнетоэлектрики обнаруживают полное сходство с намагничиванием железа: подобно железу, в котором наблюдаются явления остаточного намагничивания и магнитного гистерезиса, сегнетоэлектрики обнаруживают остаточную электрическую поляризацию и электрический гистерезис.

Рис. 288. Зависимость спонтанной поляризации титаната бария от температуры.

б) Диэлектрическая проницаемость

Рис. 289. Зависимость диэлектрической проницаемости сегнетовой соли от температуры при различных значениях напряженности поля:

1 — 500 в/м, 2 — $5 \cdot 10^4$ в/м.

Рис. 290. Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры для сегнетоэлектриков из группы титаната бария.

Рис. 291. Зависимость диэлектрической проницаемости некоторых сегнетоэлектриков от напряженности переменного электрического поля при комнатной температуре:

1 — титанат бария, 2 — сегнетова соль.

Рис. 292. Зависимость диэлектрической проницаемости поликристаллического титаната бария от напряженности поля при различных температурах.

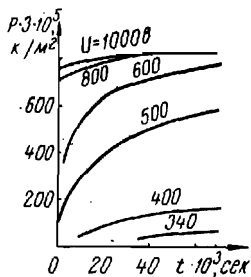


Рис. 287

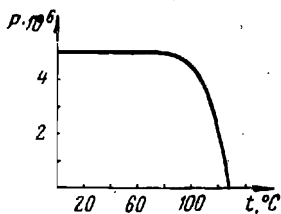


Рис. 288

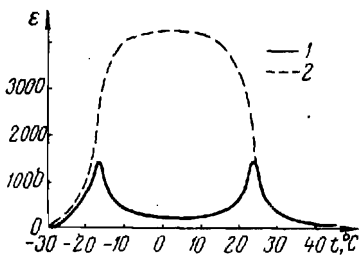


Рис. 289

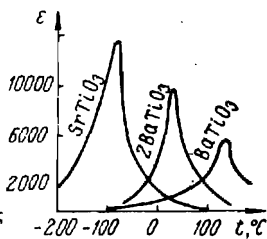


Рис. 290

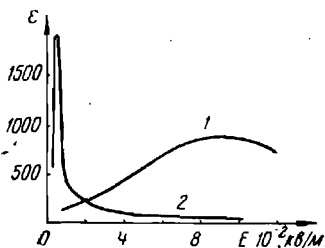


Рис. 291

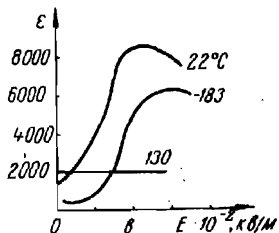


Рис. 292

Рис. 293. Зависимость диэлектрической проницаемости поликристаллического цирконата свинца от температуры:

○ — при нагревании, ● — при охлаждении.

В некоторых диэлектриках наблюдаются фазовые превращения, имеющие почти все признаки сегнетоэлектрических превращений: прохождение диэлектрической проницаемости через максимум, скачок теплоемкости, изменение симметрии и размеров элементарной ячейки. В то же время в них имеются и существенные различия: отсутствие петли гистерезиса и спонтанной поляризации. Примером подобного диэлектрика является цирконат свинца $PbZrO_3$.

При фазовом превращении в цирконате свинца возникают антипараллельные смещения ионов, что приводит к взаимной компенсации значительных по величине элементарных электрических моментов, вызванных смещением ионов. Векторы спонтанной поляризации подрешеток кристалла направлены антипараллельно и взаимно компенсируют друг друга. Результирующая поляризация кристалла равна нулю. Подобное состояние диэлектрика получило название анти-сегнетоэлектрического, а температура превращения — анти-сегнетоэлектрической точки Кюри.

Рис. 294. Зависимость поляризации сегнетовой соли от меняющейся со временем напряженности поля при температуре 26 (а) и 23° С (б).

При температуре $t > \theta$ (θ — точка Кюри, $\theta = 25^\circ\text{C}$) соблюдается пропорциональность между P и E . При $t < \theta$ эта пропорциональность нарушается, кривая приобретает петлеобразную форму (гистерезис).

Рис. 295. Петли диэлектрического гистерезиса поликристалла (а) и монокристалла (б) титаната бария.

Рис. 296. Петля диэлектрического гистерезиса анти-сегнетоэлектрика вблизи температуры Кюри.

При $E = E_K$ происходит скачкообразный переход из антисегнетоэлектрического состояния в сегнетоэлектрическое.

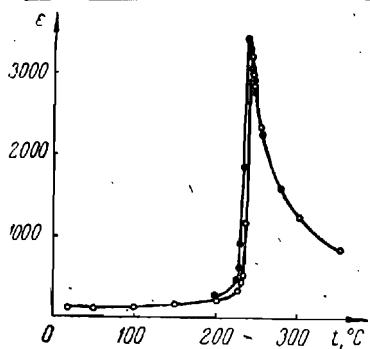
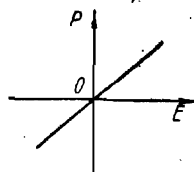
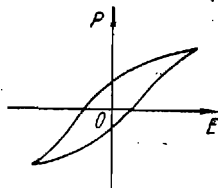


Рис. 293

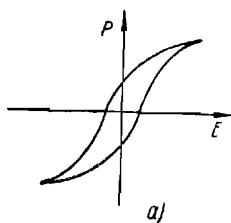


а)

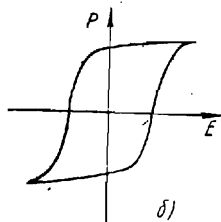


б)

Рис. 294



а)



б)

Рис. 295

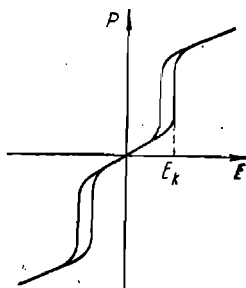


Рис. 296

§ 46. ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

а) Закон Ома для участка цепи

Р и с. 297. Вольт-амперная характеристика по закону Ома.

Для проводника с сопротивлением R наклон вольт-амперной характеристики определяется соотношением $\operatorname{tg} \alpha = 1/R$

Р и с. 298. Распределение потенциала в однородном проводнике, имеющем различные сечения (1, 2, 3, 4).

Р и с. 299. График предельных значений чувствительности гальванометров различных систем (S_I — чувствительность по току):

1 — магнитоэлектрические с подвижной катушкой и подвижными магнитами, 2 — струнные, 3 — строборезонансные, 4 — электродинамические, 5 — резонансные, вибрационные и поляризованные электромагнитные, 6 — с термопреобразователями, 7 — электромагнитные, 8 — тепловые.

б) Замкнутая цепь постоянного тока

Р и с. 300. Зависимость величины тока от внешнего сопротивления:

$I_{к.з}$ — ток короткого замыкания.

в) Энергия, выделяемая в цепи постоянного тока

Р и с. 301. Зависимость мощности источника (N), мощности во внешней цепи (N_a) и к. п. д. источника от величины тока:

$N = EI$; $N_a = EI - RI^2$; $I_{max} = E/2R$,
где R — внутреннее сопротивление.

Из графика видно, что условия получения наибольшей полезной мощности N_a и наибольшего к. п. д. η не совместимы. Когда N_a достигает наибольшего значения, величина тока $I_{max} = E/2R$ и к. п. д. η равен $1/2$, или 50%. Когда же к. п. д. близок к единице, полезная мощность мала по сравнению с максимальной мощностью $(N_a)_{max}$, которую мог бы развить данный источник.

г) Последовательное и параллельное соединение гальванических элементов

Р и с. 302. Зависимость величины тока от внешнего сопротивления для одного элемента и для батарей последовательно (а) и параллельно (б) соединенных элементов:

1 — батарея, 2 — один элемент.

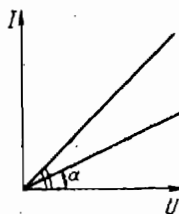


Рис. 297

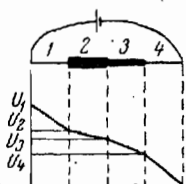


Рис. 298



Рис. 299

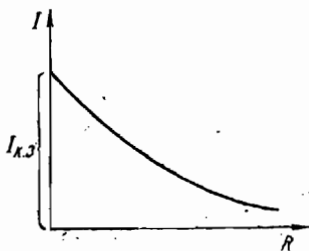


Рис. 300

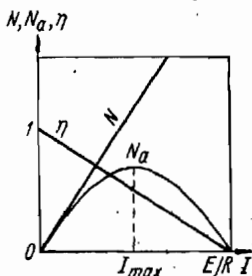
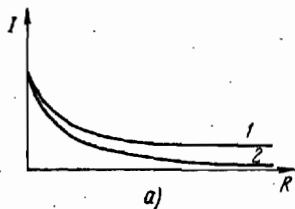
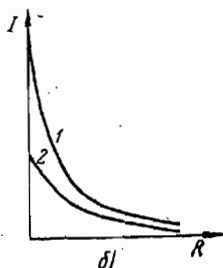


Рис. 301



a)



б)

Рис. 302

§ 47. ТОК В МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ

а) Зависимость сопротивления металлов от температуры, примесей и давления

Рис. 303. Зависимость тока от напряжения для лампочки с вольфрамовой нитью:

1 — при постоянной температуре, 2 — при увеличивающейся температуре нити.

Сопротивление нити лампочки растет с температурой.

Рис. 304. Зависимость удельного сопротивления чистых металлов от температуры.

Рис. 305. Зависимость удельного сопротивления металлов, отнесенного к удельному сопротивлению при 0°C

$\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)$, от температуры.

Рисунок показывает, во сколько раз изменяется сопротивление железа, свинца и меди при нагревании от 0°C на несколько сот градусов. Повышение температуры железа до 600°C вызывает почти восьмикратное увеличение его удельного сопротивления. Повышение температуры до 500°C приводит примерно к трехкратному увеличению сопротивления меди. Сопротивление константана при этом остается почти неизменным.

Рис. 306. Влияние примесей (%) на электропроводность меди.

По оси ординат указано относительное изменение (%) электропроводности меди.

Рис. 307. Зависимость относительного сопротивления некоторых металлов от давления.

б) Удельное сопротивление сплавов

Рис. 308. Зависимость удельного сопротивления манганина от температуры.

Рис. 309. Удельное сопротивление и его температурный коэффициент для сплавов никеля и меди.

По оси абсцисс отложен весовой процент никеля и меди.

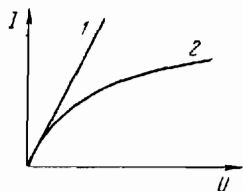


Рис. 303

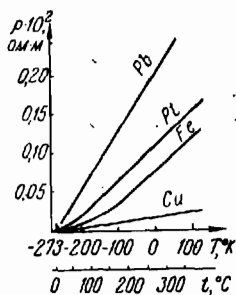


Рис. 304

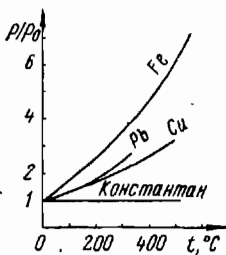


Рис. 305

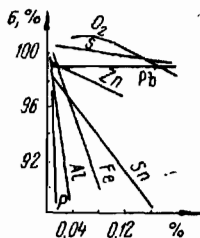


Рис. 306

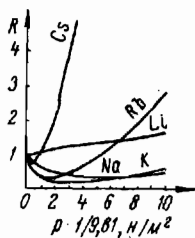


Рис. 307

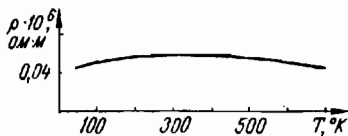


Рис. 308

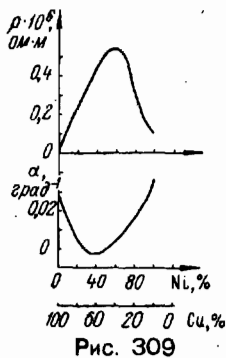


Рис. 309

Рис. 310. Удельное сопротивление сплавов цинка и магния.

По оси абсцисс отложен атомный процент цинка и магния.

Рис. 311. Удельное сопротивление сплавов алюминия и серебра.

По оси абсцисс отложен атомный процент алюминия и серебра.

§ 48. СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

Рис. 312. Возможные типы зависимости сопротивления металлов от температуры:

1 — сопротивление обусловлено рассеянием электронов тепловыми колебаниями атомов кристалла и убывает до нуля, 2 — при наличии примесей и деформаций кристаллической структуры сопротивление стремится к постоянной величине, 3 — при уменьшении числа носителей тока или их подвижности сопротивление проходит через минимум.

Рис. 313. Изменение удельного сопротивления некоторых металлов при температурах, близких к абсолютному нулю.

Рис. 314. Влияние качества образца олова на характер перехода в сверхпроводящее состояние:

1 — монокристалл, 2 — поликристалл, 3 — поликристалл с примесями.

Кривые перехода в сверхпроводящее состояние для моно- и поликристалла чистого олова, а также поликристалла олова с примесями показывают, что однородность и чистота материала значительно влияют на резкость перехода.

Рис. 315. Зависимость сопротивления олова при различных частотах переменного тока от температуры.

Для постоянного тока при частотах, меньших 10^7 гц, наблюдается резкое падение сопротивления до нуля (кривая 1). Однако при больших частотах сопротивление сверхпроводника ниже температуры, разделяющей области нормального и сверхпроводящего состояний металлов, сохраняет конечное значение тем большее, чем выше частота (кривые 2 и 3). В области инфракрасных частот ($2 \cdot 10^{13}$ гц) поглощение в нормальном и сверхпроводящем состоянии одинаково и не зависит от температуры (кривая 4).

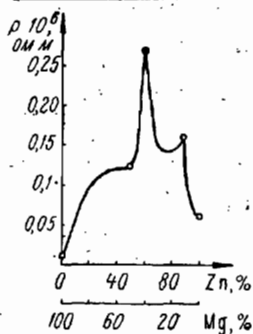


Рис. 310

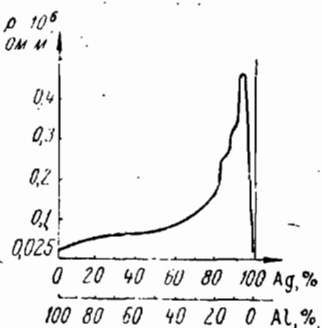


Рис. 311

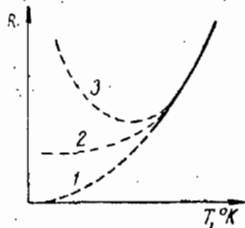


Рис. 312

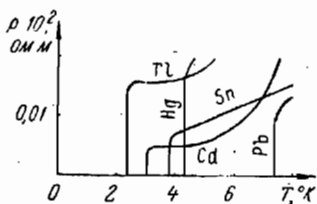


Рис. 313

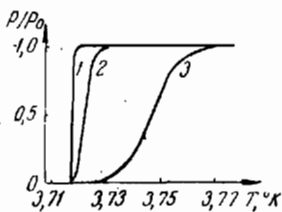


Рис. 314

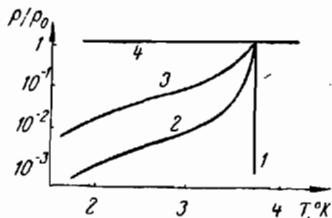


Рис. 315

§ 49. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Рис. 316. Зависимость термоэлектродвижущей силы E от разности температур $(t - t_1)$ при контакте железа с другими металлами.

Рис. 317. Зависимость коэффициента термоэлектродвижущей силы от температуры для пары медь — константан.

Рис. 318. График закона Авенариуса.

Термоэлектродвижущая сила определяется разностью ординат, которые соответствуют температурам нагретого и холодного спаев t_2 и t_1 :

$$E = a(t_2 - t_1) \left[t_{max} - \frac{1}{2}(t_2 + t_1) \right]$$

(закон Авенариуса).

Этот закон справедлив для большинства термоэлектрических цепей в области нормальных и высоких температур, но становится неточным при низких температурах и совершенно неприменим при температурах жидкого воздуха. t_{max} — температура нагретого спаев, при которой термоэлектродвижущая сила достигает максимума при любой температуре холодного спаев. Когда разность температур спаев в два раза превышает ту разность температур, при которой термоэлектродвижущая сила имеет максимум, термоэлектродвижущая сила становится равной нулю (t'_2).

Рис. 319. Диаграмма Тэта.

Чтобы найти термоэлектродвижущую силу некоторой пары металлов (например, Fe и Pt) при температурах t_1 и t_2 двух спаев (например, 50 и 250° C), нужно вычислить площадь трапеции. Высотой трапеции служит разность температур $t_2 - t_1$, а полусумма оснований — это заключенная между линиями (Fe и Pt) часть той ординаты, которая соответствует средней арифметической

температуре спаев. Для взятого примера $\frac{1}{2}(t_1 + t_2) = 150^\circ$ и средняя линия трапеции соответствует примерно 9 мкв.

Следовательно, термоэлектродвижущая сила $E \approx 9(t_2 - t_1)$ мкв = $1,8 \cdot 10^{-3}$ в.

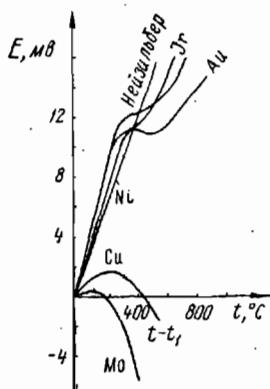


Рис. 316

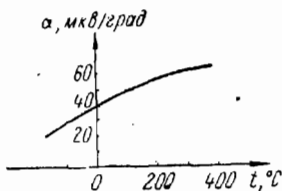


Рис. 317

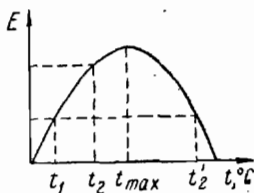


Рис. 318

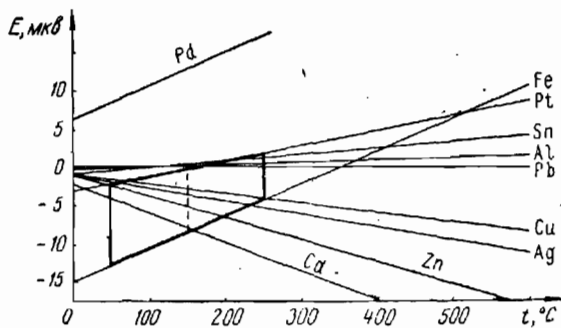


Рис. 319

§ 50. ТОК В ДИЭЛЕКТРИКАХ

Рис. 320. Зависимость величины тока от времени в твердом и жидком диэлектрике:

1 — твердый диэлектрик, 2 — трансформаторное масло.

Рис. 321. Зависимость величины тока, проходящего через твердый диэлектрик, от времени (при постоянном значении приложенной разности потенциалов).

Если в момент времени τ_1 снять с образца приложенную разность потенциалов, но оставить его замкнутым на измерительный прибор, то последний покажет ток, идущий через образец в противоположном направлении. Величина тока будет постепенно уменьшаться, приближаясь к нулю. Как показывают опыты, в большинстве случаев количество электричества, прошедшее через диэлектрик при его зарядке (заштрихованная область выше оси абсцисс), в точности равно количеству электричества, отдаваемому диэлектриком при его разрядке (заштрихованная область ниже оси абсцисс). Диэлектрик является как бы своеобразным аккумулятором электрической энергии.

Рис. 322. Зависимость удельного сопротивления диэлектриков (1) и металлов (2) от температуры.

Масштабы на рисунке несколько искажены, так как удельное сопротивление диэлектриков обычно в 10^{10} — 10^{15} раз больше, чем удельное сопротивление металлов.

Рис. 323. Зависимость удельного сопротивления органических поликристаллических диэлектриков от температуры:

1 — цезерин, 2 — парафин, 3 — галловакс; $t_{пл}$ — температура плавления, $t_{разм}$ — температура размягчения.

Рис. 324. Зависимость удельного сопротивления некоторых жидких диэлектриков от температуры:

1 — трансформаторное масло (тщательно очищенное), 2 — трансформаторное масло (очищенное), 3 — вазелиновое масло, 4 — трансформаторное масло (промышленное), 5 — касторовое масло, 6 — сало.

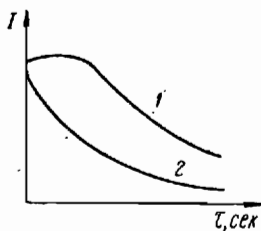


Рис. 320

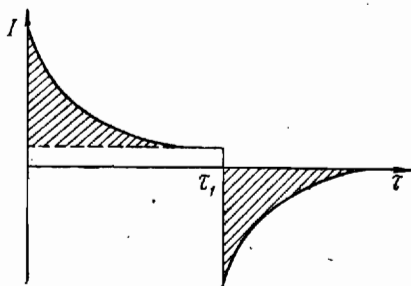


Рис. 321

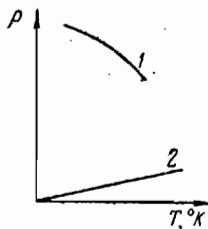


Рис. 322

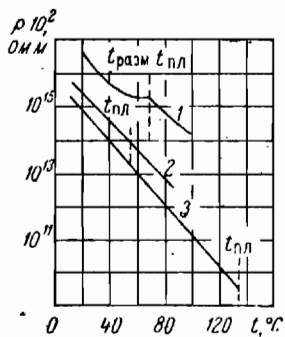


Рис. 323

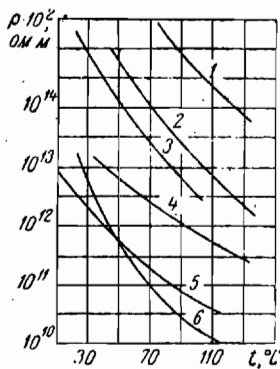


Рис. 324

§ 51. ТОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

а) Удельная электропроводность полупроводников

Р и с. 325. Зависимость логарифма удельной электропроводности от $10^3/T$ для беспримесного полупроводника:

T — температура, °К.

Р и с. 326. Зависимость логарифма удельной электропроводности от $10^3/T$ для примесного полупроводника:

Правая часть прямой до излома характеризует зависимость $\lg \sigma$ от $10^3/T$, когда в полупроводнике существует главным образом примесная проводимость. Левый прямолинейный участок после излома соответствует собственной проводимости полупроводника.

б) Полупроводники в сильных электрических полях

Р и с. 327. Зависимость величины тока от напряженности поля в полупроводниках.

Из рисунка видно, что для полупроводниковых веществ закон Ома сохраняется лишь до определенного предела ($E = E_{кр}$), выше которого он нарушается.

в) Зависимость удельного сопротивления полупроводников от температуры и примесей

Р и с. 328. Зависимость удельного сопротивления полупроводника (1) и металла (2) от температуры.

Р и с. 329. Зависимость удельного сопротивления германия (с примесью сурьмы) от температуры.

По оси ординат отложены значения сопротивления в логарифмическом масштабе, по оси абсцисс — величина, обратная абсолютной температуре; n_r — число атомов германия, n_c — число атомов сурьмы; верхняя кривая — исходный образец германия (Ge).

Р и с. 330. Зависимость удельного сопротивления германия (нижние кривые) и кремния (верхние кривые) от концентрации примесных атомов:

1 — n -тип — полупроводник с электронной проводимостью, 2 — p -тип — полупроводник с дырочной проводимостью.

Температура около 20°C.

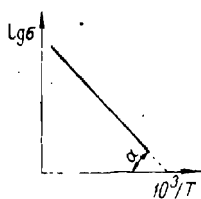


Рис. 325

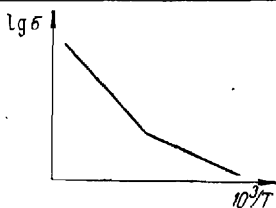


Рис. 326

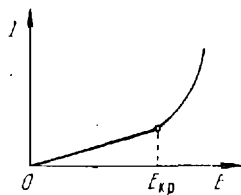


Рис. 327

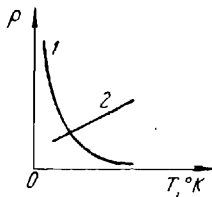


Рис. 328

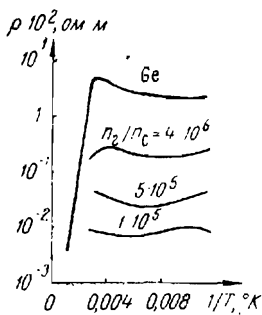


Рис. 329

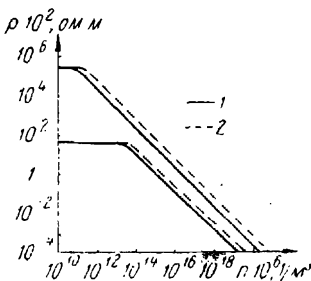


Рис. 330

г) Коэффициент термоэлектродвижущей силы

Р и с. 331. Коэффициент термоэлектродвижущей силы в зависимости от температуры для теллуристого свинца (а) и теллуристой сурьмы (б).

Верхняя кривая соответствует концентрации примесных атомов $3,5 \cdot 10^{18} 1/см^3$, нижняя — концентрации $0,5 \cdot 10^{18} 1/см^3$ (а); верхняя кривая соответствует концентрации примесных атомов $5,5 \cdot 10^{18} 1/см^3$, нижняя — концентрации $3,5 \cdot 10^{18} 1/см^3$ (б).

д) Полупроводниковые выпрямители

Р и с. 332. Вольт-амперная характеристика германиевого выпрямителя.

Р и с. 333. Вольт-амперная характеристика селенового выпрямителя.

Р и с. 334. Вольт-амперная характеристика меднозакисного выпрямителя.

е) Полупроводниковые приборы**1) Термосопротивления (термисторы)**

Р и с. 335. Вольт-амперная характеристика термосопротивления.

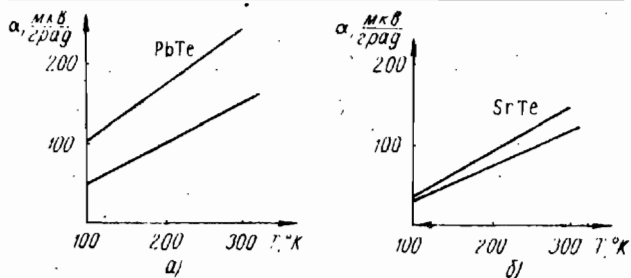


Рис. 331

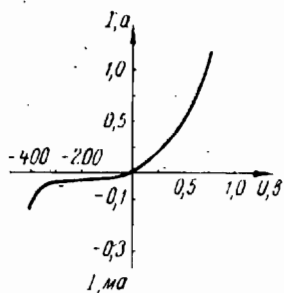


Рис. 332

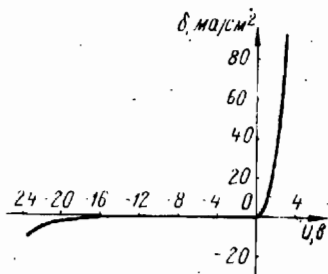


Рис. 333

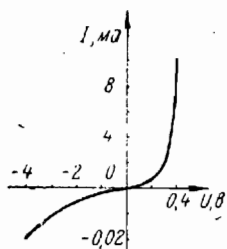


Рис 334

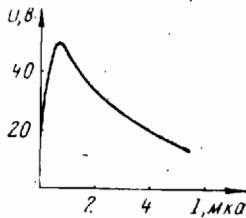


Рис. 335

Р и с. 336. Зависимость сопротивления полупроводниковых нагревательных элементов силтовой печи от температуры.

2) *Нелинейные сопротивления (варисторы)*

Р и с. 337. Вольт-амперная характеристика варистора.

3) *Фотоэлементы и фотосопротивления*

Р и с. 338. Вольт-амперная характеристика кремниевого фотоэлемента.

Вольт-амперная характеристика полупроводниковой системы с p - n -переходом может быть представлена формулой

$$I = I_s \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right) - I_{\Phi},$$

где I — ток во внешней цепи, I_s — ток насыщения через неосвещенный p - n -переход, e — заряд электрона, U — внешняя разность потенциала на p - n -переходе, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, I_{Φ} — ток, созданный возбужденными светом носителями.

Каждая из кривых, отражающих эту зависимость, соответствует определенному значению I_{Φ} . Для кривой, проходящей через начало координат, $I_{\Phi} = 0$ (отсутствие освещения). Точки вольт-амперных характеристик, лежащих на оси токов, дают значения величин токов короткого замыкания ($I_{к.з}$), когда $R_H = 0$ (R_H — сопротивление нагрузки); а точки, лежащие на оси напряжений, отражают те случаи, когда внешняя цепь разомкнута ($R_H = \infty$), и дают значения напряжения холостого хода ($U_{х.х}$) фотоэлектрической системы.

Р и с. 339. Зависимость фотоэлектродвижущей силы E_{Φ} от интенсивности лучистого потока для селенового фотоэлемента.

Р и с. 340. Частотные характеристики некоторых вентильных фотоэлементов.

По оси абсцисс отложена частота падающего светового потока, по оси ординат — фототок (I_{Φ}).

Р и с. 341. Зависимость фототока (I_{Φ}), проходящего через фотосопротивление, от частоты изменения интенсивности света:

1 — сернистобисмутное фотосопротивление, 2 — таллофидное, 3 — селеновое.

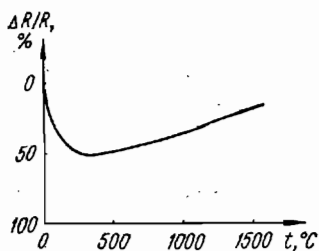


Рис. 336

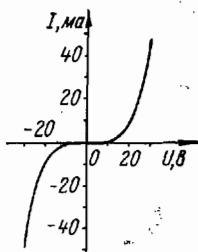


Рис. 337

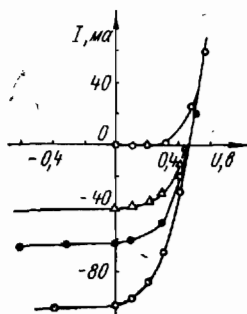


Рис. 338

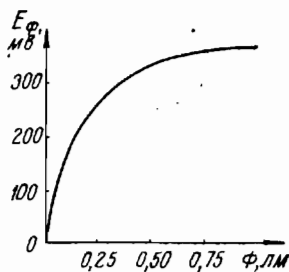


Рис. 339

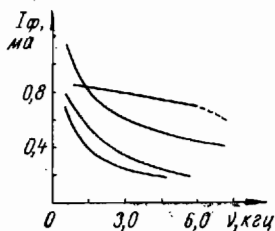


Рис. 340

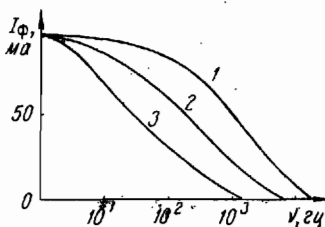


Рис. 341

§ 52. ТОК В ЭЛЕКТРОЛИТАХ

а) Закон Ома для электролитов

Рис. 342. Зависимость величины тока от разности потенциалов:

I — для проводника первого рода, 2 — для проводника второго рода (электролита); E' — поляризационная э.д.с.

б) Электропроводность электролитов в зависимости от концентрации

Рис. 343. Зависимость удельной электропроводности разведенной серной кислоты от концентрации.

Рис. 344. Зависимость удельной электропроводности сильных электролитов от концентрации, выраженной в грамм-эквивалентах на литр.

в) Аккумуляторы

Рис. 345. Напряжение свинцового аккумулятора при зарядке (1) и разрядке (2).

Из рисунка видно, что свинцовый аккумулятор отдает около 80% подведенной к нему электроэнергии.

Рис. 346. Напряжение щелочного аккумулятора при зарядке (1) и разрядке (2).

Из рисунка видно, что среднее рабочее напряжение щелочных аккумуляторов значительно ниже, чем свинцовых, и составляет 1,2 в. Коэффициент полезного действия у щелочных аккумуляторов меньше, чем у свинцовых.

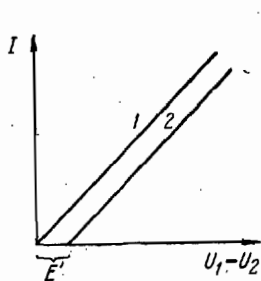


Рис. 342

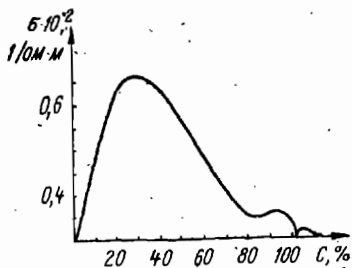


Рис. 343

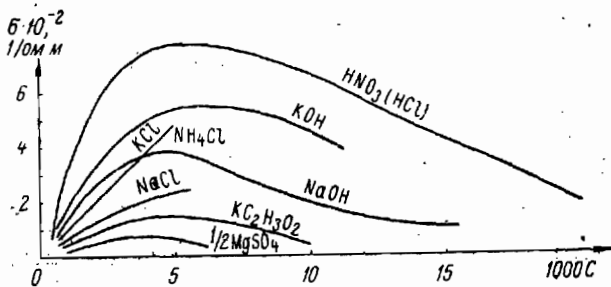


Рис. 344

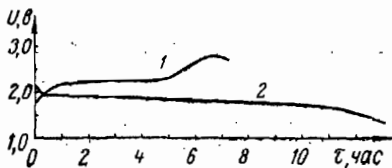


Рис. 345

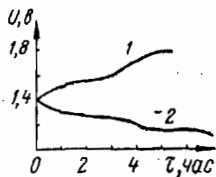


Рис. 346

§ 53. ТОК В ГАЗАХ

а) Внешние условия устойчивости газового разряда

Рис. 347. Зависимость типа разряда от плотности тока и давления газа:

I — область дугового разряда, *II* — область тлеющего разряда, *III* — область тихого разряда.

Чтобы можно было определить форму разряда при изменении не только плотности газов, но и приложенного к разрядному промежутку напряжения, на графике по оси абсцисс отложена не просто плотность δ (или давление p), а отношение этих величин к напряженности поля $\frac{\delta}{E}$

(или $\frac{p}{E}$).

б) Переход разряда из несамостоятельного в самостоятельный

Рис. 348. Вольт-амперная характеристика при переходе несамостоятельного разряда в самостоятельный (пробой).

Рис. 349. Вольт-амперная характеристика разрядного тока в высоком вакууме (1) и в неоне (2) при давлении $266,6 \text{ н/м}^2$ (при одном и том же освещении катода).

Рис. 350. Зависимость напряжения зажигания (U_3) газового разряда при плоских электродах от произведения pl : p — давление газа, н/м^2 ; l — расстояние между электродами, м.

Рис. 351. Влияние давления паров воды на потенциал зажигания разряда в воздухе.

Рис. 352. Понижение потенциала зажигания разряда в аргоне при увеличении температуры катодно-вольфрамовой нити:

l — расстояние от нити до анода.

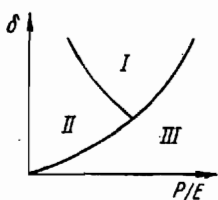


Рис. 347

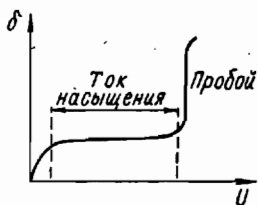


Рис. 348

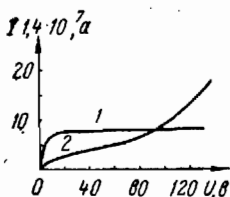


Рис. 349

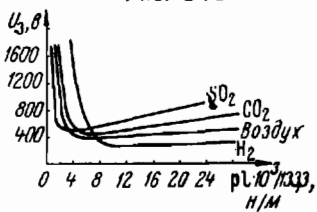


Рис. 350

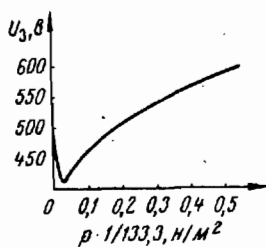


Рис. 351

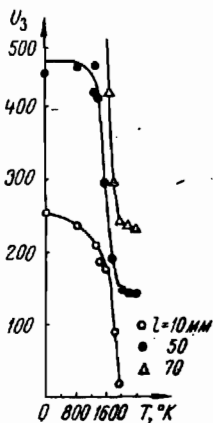


Рис. 352

Рис. 353. Исследование напряженности поля по длине разрядной трубки (l), наполненной азотом (a), и изменение напряженности при слонстом строении разряда (b).

в) Тлеющий разряд

Рис. 354. Характеристика разряда при переходе от тихого через тлеющий к дуговому.

Часть кривой AB соответствует таунсендовскому разряду, BC — переходная стадия разряда, от C через D и E до F — тлеющий разряд. При переходе к дуге после точки F характеристика снова делается падающей. Таунсендовский разряд отличается от тихого несамостоятельного разряда тем, что в нем имеет место ионизация газа толчками электронов и развитие электронных лавин.

Рис. 355. Распределение потенциала в тлеющем разряде:

1 — область катодного падения, 2 — тлеющее свечение, 3 — темное фарадеево пространство, 4 — область положительного столба, 5 — область анодного падения; A — анод, K — катод.

г) Дуговой разряд

Рис. 356. Температуры в вольтовой дуге постоянного тока.

Рис. 357. Вольт-амперная характеристика дуги при различных расстояниях между электродами.

При увеличении тока до некоторой критической величины разность потенциалов на электродах резко падает (примерно на 10 в) и горение дуги делается беспокойным (дуга начинает шипеть). Чем больше расстояние между электродами, тем больше должно быть напряжение, поданное на электроды дуги, и тем выше должна располагаться вольт-амперная характеристика.

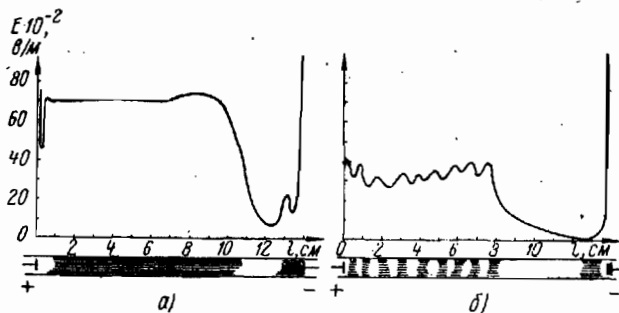


Рис. 353

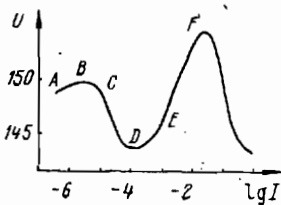


Рис. 354

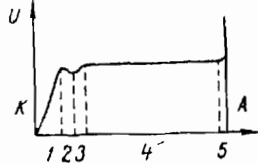


Рис. 355



Рис. 356

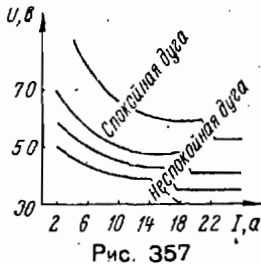


Рис. 357

V. МАГНЕТИЗМ

- B — магнитная индукция
 C — электрическая емкость
 H — напряженность магнитного поля
 J — намагниченность
 L — индуктивность
 R — сопротивление
 η — коэффициент полезного действия
 μ — магнитная проницаемость
 χ — магнитная восприимчивость

§ 54. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ТОКОВ

а) Магнитное поле токов

Р и с. 358. Зависимость напряженности магнитного поля от расстояния (r) до оси цилиндрического проводника.

Ток течет по поверхности проводника (а), внутри и по поверхности (б), по поверхности и внутри полого проводника, имеющего форму трубы (в). Внутри проводников напряженность равна нулю (а), растет пропорционально расстоянию от оси цилиндра (б), растет по линейному закону в пределах толщины стенок (в). Во внешнем пространстве во всех трех случаях (а, б, в) напряженность такова, как будто весь ток идет по оси цилиндра.

б) Измерение напряженности магнитного поля

Р и с. 359. Зависимость электрического сопротивления висмута от напряженности магнитного поля.

Сопротивление R_0 висмута вне поля принято за единицу. Измерив сопротивление висмутовой спирали в поле и вне его, можно по изменению сопротивления определить напряженность магнитного поля. Висмутовая спираль должна быть заранее проградуирована.

§ 55. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ

а) Диамагнетики и парамагнетики

Р и с. 360. Общий вид зависимости намагниченности от напряженности магнитного поля:

1 — диамагнетики, 2 — парамагнетики.

б) Ферромагнетики

Р и с. 361. Зависимость намагниченности от напряженности магнитного поля для ферромагнетиков.

в) Магнитная проницаемость и индукция ферромагнетиков

Р и с. 362. Зависимость магнитной проницаемости и индукции от напряженности поля для чугуна.

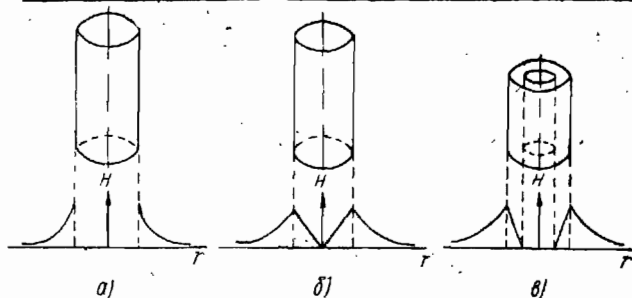


Рис. 358

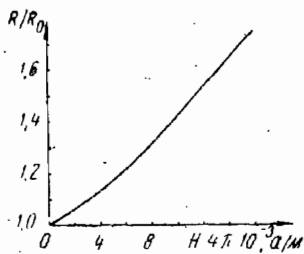


Рис. 359

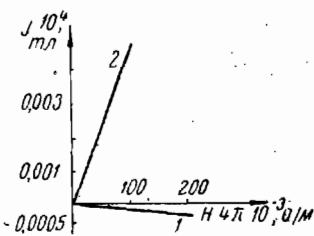


Рис. 360

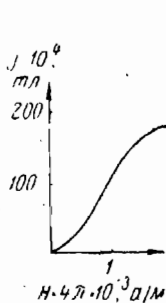


Рис. 361

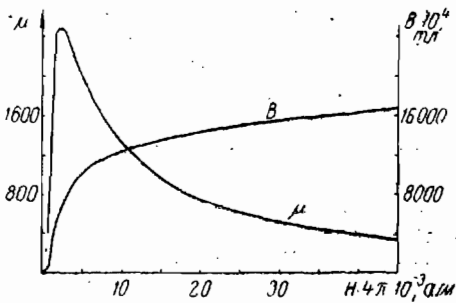


Рис. 362

Р и с. 363. Зависимость магнитной проницаемости от напряженности поля для магнитного сплава пермаллоя (1) и мягкого железа (2).

Р и с. 364. Зависимость магнитной индукции от напряженности поля для пермаллоя (1) и мягкого железа (2).

Р и с. 365. Зависимость магнитной индукции от напряженности поля для электролитического (1) и малоуглеродистого (2) железа, стали (3) и чугуна (4).

Р и с. 366. Зависимость индукции от напряженности магнитного поля при разных температурах для железа.

Р и с. 367. Зависимость напряженности магнитного поля между полюсами электромагнита от величины тока в обмотке:

H — напряженность магнитного поля в электромагните без сердечника, H_0 — напряженность магнитного поля в электромагните с сердечником.

Из графика видно, что сначала H_0 возрастает с увеличением силы тока гораздо быстрее, чем H ; это происходит до тех пор, пока не достигнуто насыщение и магнитная проницаемость велика. После этого возрастание носит линейный характер, напряженность поля H_0 остается все время больше H на одну и ту же величину, определяемую отрезком ab .

г) Антиферромагнетики

Р и с. 368. Зависимость молярной магнитной восприимчивости χ от температуры для карбоната железа.

При достаточно высоких температурах это вещество ведет себя, как обычный парамагнетик. В отличие от ферромагнетиков, в которых магнетики ориентируются параллельно, в карбонате железа и в подобных ему веществах имеет место антипараллельная ориентация. Вещества, в которых спонтанно возникает антипараллельная ориентация магнитных моментов, получили название антиферромагнетиков.

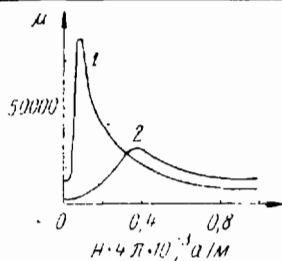


Рис. 363

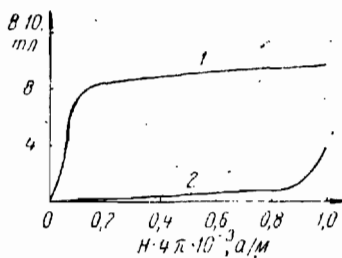


Рис. 364

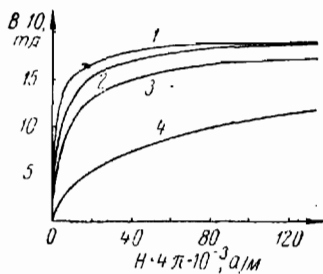


Рис. 365

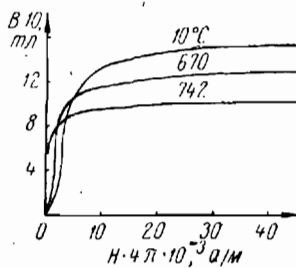


Рис. 366

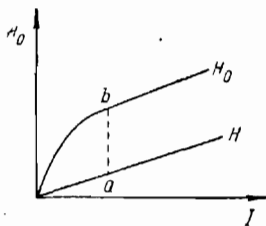


Рис. 367

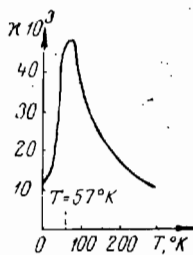


Рис. 368

д) Магнитный гистерезис

Р и с. 369. Петля гистерезиса.

При перемагничивании ферромагнитных тел обнаруживается магнитный гистерезис, т. е. намагничивание происходит при одной зависимости B от H (кривые $б — 1$ и $3 — 4$), а размагничивание при другой зависимости (кривые $1 — 2 — 3$ и $4 — 5 — 6$). Линия $O — 1$ показывает намагничивание тела от начального состояния $B = 0$, когда тело полностью размагничено еще до введения его в магнитное поле.

Площадь, ограниченной петлей гистерезиса, измеряется потерей энергии на перемагничивание ($б$).

Р и с. 370. Гнездо петель гистерезиса.

Если постепенно увеличивать амплитуду намагничивающего и размагничивающего поля, то петля гистерезиса достигает некоторых предельных очертаний — максимальной петли, характерной для вещества; совокупность получаемых таким образом циклов называется гнездом петель гистерезиса.

Р и с. 371. Кривые гистерезиса мягкого железа (1) и закаленной стали (2).

е) Магнитная анизотропия

Р и с. 372. Кривые намагничивания монокристалла железа.

На графике приведены кривые намагничивания монокристалла железа по различным кристаллографическим направлениям. В кристалле железа существует шесть направлений легкого намагничивания. Согласно принятой в кристаллографии системе, они обозначаются цифрой $[100]$. Направление диагонали грани куба, обозначаемое $[110]$, является направлением среднего намагничивания, а направление, обозначаемое $[111]$, — направлением трудного намагничивания.

ж) Ферриты

Р и с. 373. Прямоугольная петля гистерезиса.

На графике изображена прямоугольная петля гистерезиса, характерная для магниево-марганцевых ферритов.

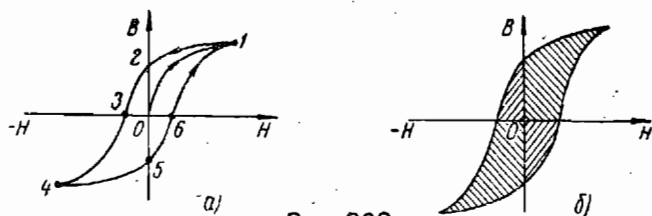


Рис. 369

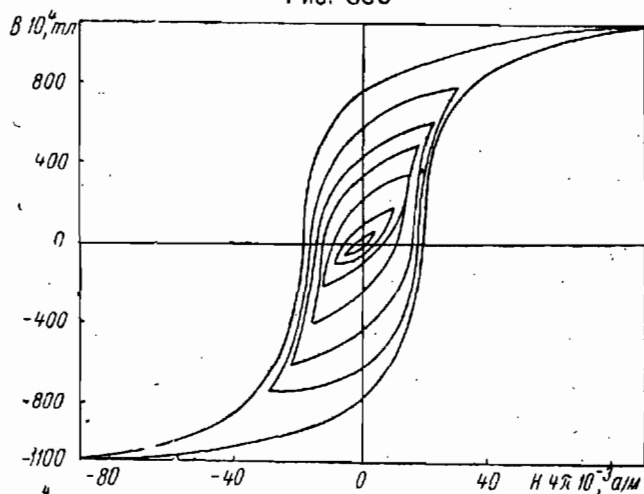


Рис. 370

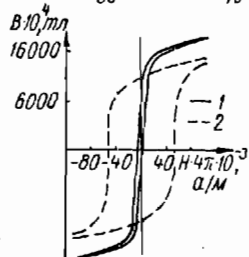


Рис. 371

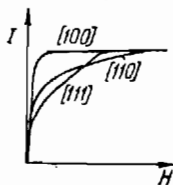


Рис. 372

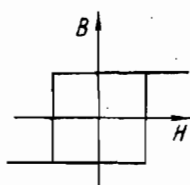


Рис. 373

§ 56. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Р и с. 374. Нарастание тока при замыкании цепи:

1 — для цепи с большим сопротивлением и малой индуктивностью, 2 — для цепи с меньшей величиной отношения $\frac{R}{L}$.

Чем больше отношение $\frac{R}{L}$, тем круче происходит нарастание тока при включении в цепь электродвижущей силы $\left(\frac{R_1}{L_1} > \frac{R_2}{L_2}\right)$.

Р и с. 375. Нарастание тока при замыкании цепи без индуктивности (а) и с индуктивностью (б).

Р и с. 376. Убывание тока при размыкании цепи:

1 — для цепи с большим сопротивлением и малой индуктивностью, 2 — для цепи с меньшей величиной отношения $\frac{R}{L}$.

Р и с. 377. Внешняя характеристика генератора с последовательным возбуждением.

По оси ординат и по оси абсцисс за 100% принято нормальное значение напряжения ($U_{\text{норм}}$) на зажимах машины и нормальная величина тока в сети ($I_{\text{норм}}$).

Р и с. 378. Внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением.

По оси ординат и по оси абсцисс за 100% приняты нормальные значения напряжения на зажимах машины и тока в цепи.

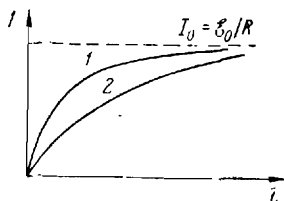


Рис 374

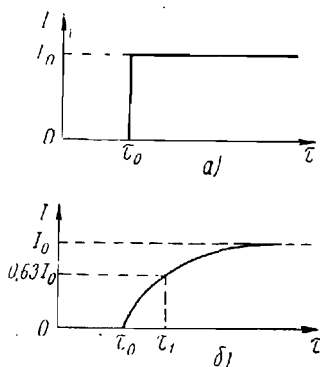


Рис. 375

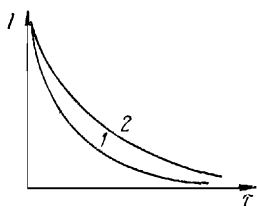


Рис 376.

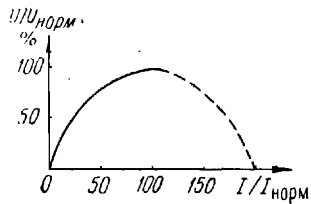


Рис. 377

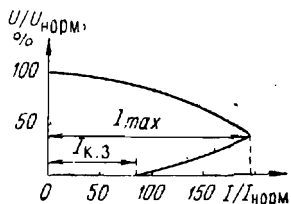


Рис. 378

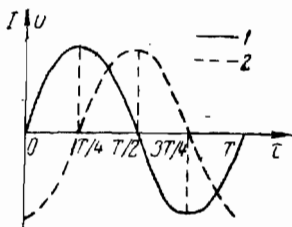
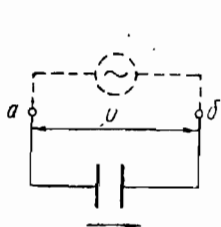
§ 57. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

Р и с. 379. Сдвиг фаз между током (1) и напряжением (2) при прохождении переменного тока через емкость, индуктивность и сопротивление: случай емкостного сопротивления (а), индуктивного сопротивления (б), омического сопротивления (в).

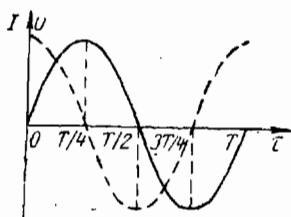
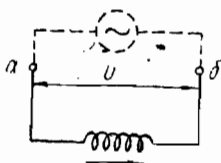
Из рисунка видно, что в случае емкостного сопротивления кривые тока и напряжения смещены по фазе, причем ток опережает напряжение на четверть периода, или на $\frac{\pi}{2}$ (а).

Если в опыте заменить конденсатор катушкой с большой индуктивностью, то окажется, что ток отстает по фазе от напряжения на четверть периода (б).

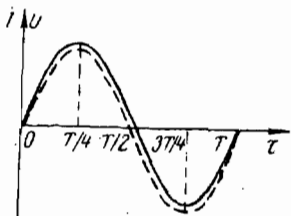
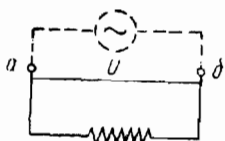
Наконец, в случае омического сопротивления напряжение и ток совпадают по фазе (в).



a)



б)



в)

Рис 379

Р и с. 380. Сдвиг фаз между током (I) и напряжением (U) в цепи, содержащей омическое и индуктивное сопротивления.

Р и с. 381. Сдвиг фаз между током (I) и напряжением (U) в случае емкостного сопротивления (конденсатор) при отсутствии омического сопротивления и процесс перезарядки конденсатора AB в цепи переменного тока.

Если цепь состоит из конденсатора емкости C , а омическим сопротивлением можно пренебречь, то обкладки конденсатора, присоединенные к источнику напряжения U , заряжаются, и между ними возникает напряжение U_1 . Напряжение на конденсаторе U_1 следует за U практически мгновенно, т. е. достигает максимума одновременно с U и обращается в нуль, когда $U = 0$.

Р и с. 382. Сдвиг фаз между током (I) и напряжением (U) в цепи, содержащей омическое и емкостное сопротивления.

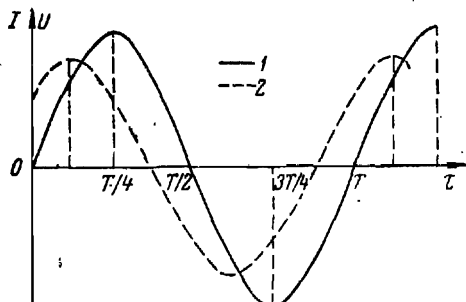


Рис. 380

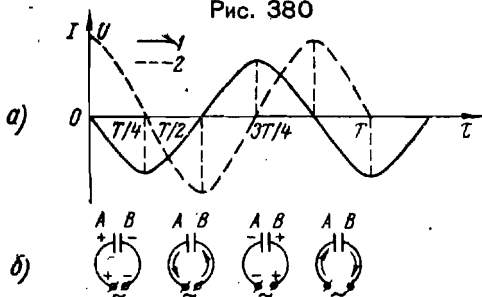


Рис. 381

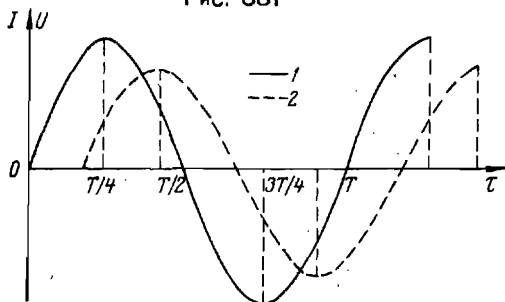


Рис. 382

§ 58. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Р и с. 383. Полный цикл явлений, происходящих в идеальном колебательном контуре.

Рассмотрим явления, происходящие в идеальном колебательном контуре с момента, когда конденсатор тем или иным способом заряжен и затем источник напряжения от него удален (*a; 1*). Конденсатор замкнут на катушку и будет через нее разряжаться. Образующийся при этом ток I , проходя через катушку, создает магнитное поле. В связи с этим в катушке появляется электродвижущая сила самоиндукции E_L , противодействующая нарастанию тока (*a; 2*).

По мере приближения мгновенных значений тока I к максимальной величине I_{max} э. д. с. уменьшается и при $I = I_{max}$ обращается в нуль (*a; 3*). Напряжение U на конденсаторе в этот момент также снижается до нуля. Вследствие этого ток I начинает уменьшаться, и в катушке появляется э. д. с. самоиндукции обратного знака. Под действием этой э. д. с. ток в контуре поддерживается, что приводит к образованию на пластинах конденсатора зарядов (*a; 4*) со знаком, обратным исходному положению. В результате, когда ток постепенно уменьшится до нуля, конденсатор оказывается вновь заряженным с обратной полярностью пластин (*a; 5*). Дальше весь процесс повторяется, но ток I протекает в контуре в обратном направлении.

На графике показан полный цикл явлений в контуре, соответствующий одному периоду изменения тока в нем (*б*), а также измененные за этот период напряжения U на зажимах конденсатора, колебания которого сдвинуты по фазе относительно колебаний тока I на 90° .

Р и с. 384. Искровой генератор затухающих колебаний.

Дроссели D_1 и D_2 не пропускают высокочастотных токов в цепь индуктора.

Р и с. 385. Форма изменений напряжения на искровом промежутке (*a*) и серии затухающих колебаний (*б*).

Схема искрового генератора представлена на рис. 384.

Р и с. 386. Затухание колебаний при четырех значениях

логарифмического декремента затухания $\left(\Delta = \pi \frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \right)$.

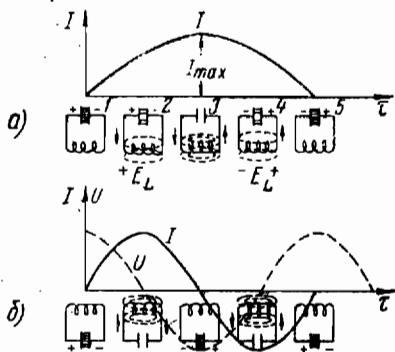


Рис. 383

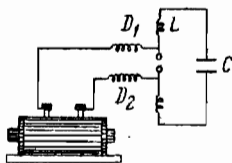


Рис. 384

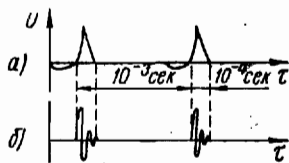


Рис. 385

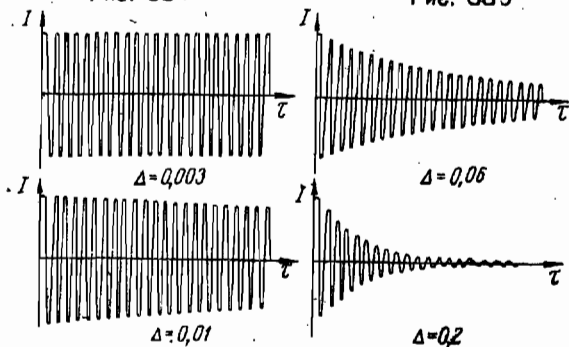


Рис. 386

§ 59. ЭЛЕКТРОННЫЕ ЛАМПЫ

Р и с. 387. Зависимость тока насыщения I_n от температуры катода.

Р и с. 388. Распределение потенциала в электронной лампе при малом анодном напряжении (1) и при увеличении напряжения между анодом и нитью (2, 3).

Р и с. 389. Характеристика двухэлектродной лампы с вольфрамовой нитью для различных температур нити. Пунктиром представлена характеристика лампы, имеющей большую емкость C , т. е. такой лампы, у которой анод расположен ближе к нити. Ток насыщения для такой лампы достигается при меньших значениях напряжения, и характеристика ее круче.

Р и с. 390. Анодная характеристика триода.

Р и с. 391. Сеточная характеристика триода.

Р и с. 392. Динамическая характеристика триода.

Если для лампы, имеющей определенную нагрузку в цепи анода, зависимость тока от напряжения на сетке выразить графически (при $U_{\text{бат}} = \text{const}$), то получится так называемая динамическая характеристика лампы. Наклон динамической характеристики — ее крутизна всегда меньше наклона статических характеристик.



Рис. 387

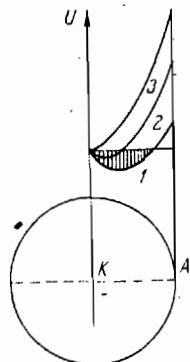


Рис. 388

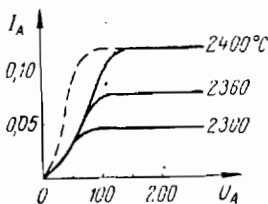


Рис. 389

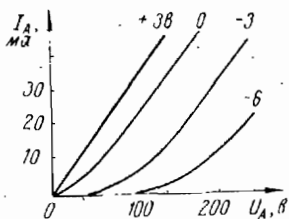


Рис. 390

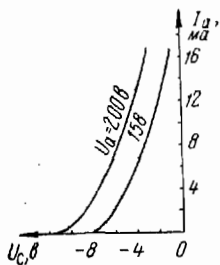


Рис. 391

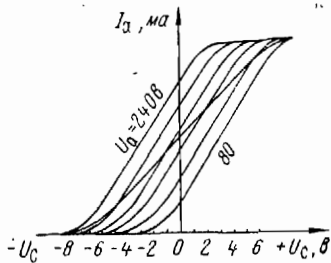


Рис. 392

Р и с. 393. Анодная характеристика газотрона.

Из графика видно, что если подать на анод газотрона отрицательный потенциал, то прибор ток не пропускает. При положительном потенциале на аноде, даже очень малом, обнаруживается слабый ток, который медленно возрастает. Когда напряжение достигает примерно 12 в, газотрон загорается, и величина тока резко увеличивается.

Р и с. 394. Сеточная характеристика тиратрона.

Из графика видно, что если подать на анод положительное напряжение, а на сетку значительное отрицательное напряжение, то заметного тока в цепи тиратрона не будет. Уменьшая отрицательное сеточное напряжение, можно достичь такого напряжения, при котором начнется ионизация атомов ртути и тиратрон загорится, причем сила тока возрастает скачкообразно. Дальнейшее увеличение сеточного напряжения не изменяет силы тока. Не изменяет ее и убывание сеточного напряжения до отрицательных значений, меньших, чем напряжение зажигания (пунктирная прямая). Тиратрон можно потушить, только сняв анодное напряжение.

Р и с. 395. Зависимость коэффициента полезного действия ртутного выпрямителя (1) и газотрона (2) от рабочего напряжения.

Р и с. 396. Зависимость между напряжением зажигания и анодным напряжением для тиратрона.

§ 60. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Р и с. 397. Два первых собственных колебания (1, 2) двухпроводной линии, разомкнутой на концах (а), и два первых собственных колебания двухпроводной линии, замкнутой на одном конце проводящим мостиком (б).

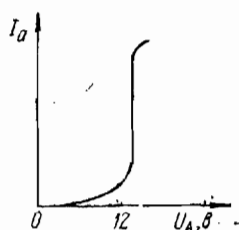


Рис. 393

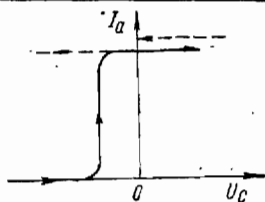


Рис. 394

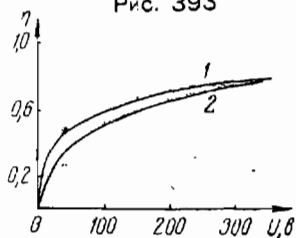


Рис. 395

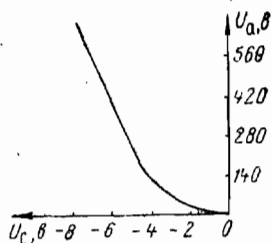


Рис. 396

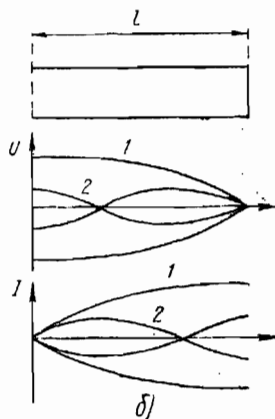
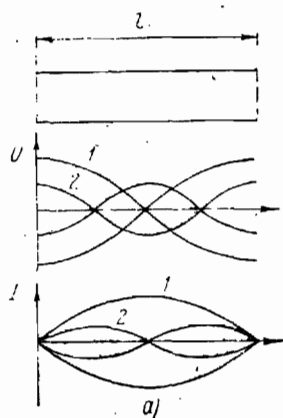


Рис. 397

Р и с. 398. Основные колебания незаземленного (*a*) и заземленного (*b*) вибраторов.

Р и с. 399. Зависимость напряжения между проводниками вибратора от времени.

Р и с. 400. Положение в пространстве электрической и магнитной составляющих в проходящей электромагнитной волне.

На рисунке показано положение электромагнитной волны, падающей на отражающую стенку (*a*), и положение той же волны после отражения (*b*).

Р и с. 401. Образование стоячих электромагнитных волн.

Если электрическая волна E отражается без изменения фазы, то магнитная волна H при отражении изменяет фазу на π (рис. 400). В результате этого у стоячей волны, образующейся при встрече падающей и отраженной волн, узлы и пучности электрической и магнитной составляющих не совпадают, а смещены на четверть длины волны.

Р и с. 402. Затухание электромагнитной волны в проводящей среде.

Благодаря интенсивному отражению электромагнитных волн от металла глубина проникновения волны в металл невелика, амплитуда волны x_0 очень быстро падает с глубиной. Длина волны в металле по сравнению с вакуумом уменьшается в n раз (n — показатель преломления данного металла).

Р и с. 403. Затухающие колебания в контуре до детектирования (*a*) и после детектирования (*b*) и действие детектированного тока на мембрану телефона (*в*).

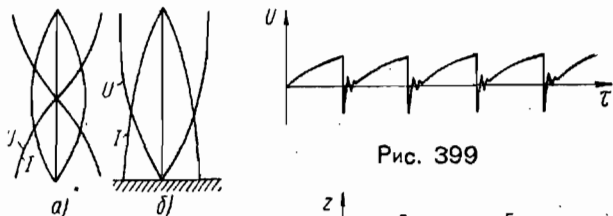


Рис. 399

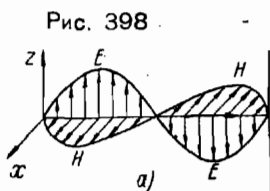


Рис. 398

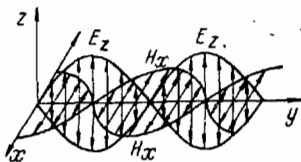


Рис. 401

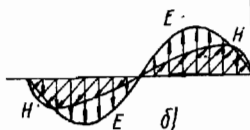


Рис. 400

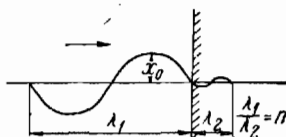


Рис. 402

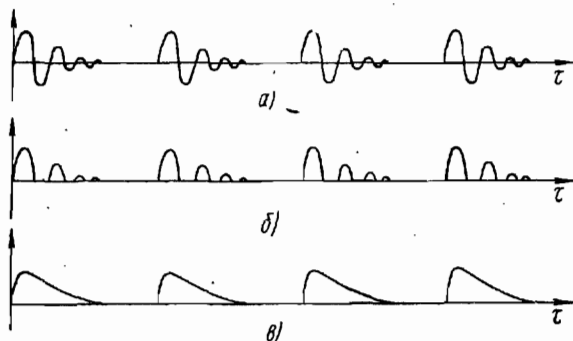


Рис. 403

Р и с. 404. Кривые токов при гетеродинном приеме: проходящий сигнал (*a*), ток гетеродина (*b*), результирующий ток до детектирования (*c*), ток после детектирования (*г*), действие на мембрану телефона (*д*).

Р и с. 405. Сопоставление амплитудной и частотной модуляций.

На рисунке сопоставлены амплитудно-модулированный сигнал (верхний график) и тот же сигнал частотно-модулированный (нижний график). Изменения частоты представлены преувеличенно.

Р и с. 406. Антенна для направленного излучения дециметровых радиоволн. Вид антенны (*a*) и диаграмма направленности (*b*) (мощность излучения в различных направлениях).

Направленность более длинных волн достигается применением специальных антенн, напоминающих лестницу. Действие их основано на интерференции волн. Поперечные металлические стержни такой антенны имеют следующие значения: второй стержень слева является вибратором, первый слева — отражателем, а остальные — директорами (направляющими). Диаграмма (*b*) показывает распределение интенсивности излучения.

Для приема отраженных волн устанавливаются четыре такие антенны: две в горизонтальной плоскости и две в вертикальной. Добившись одинаковой интенсивности приема в каждой паре антенн (как при ориентировке по слуху), можно точно определить направление на цель.

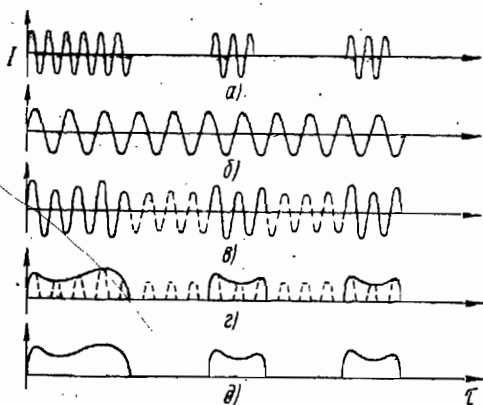


Рис. 404

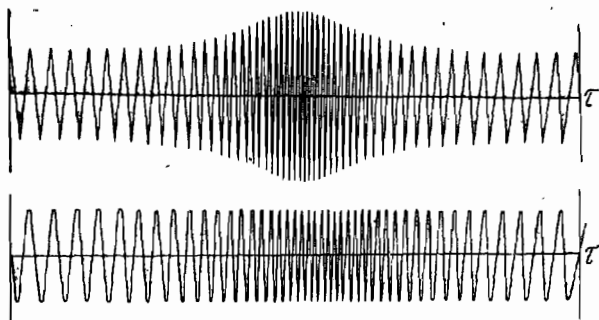
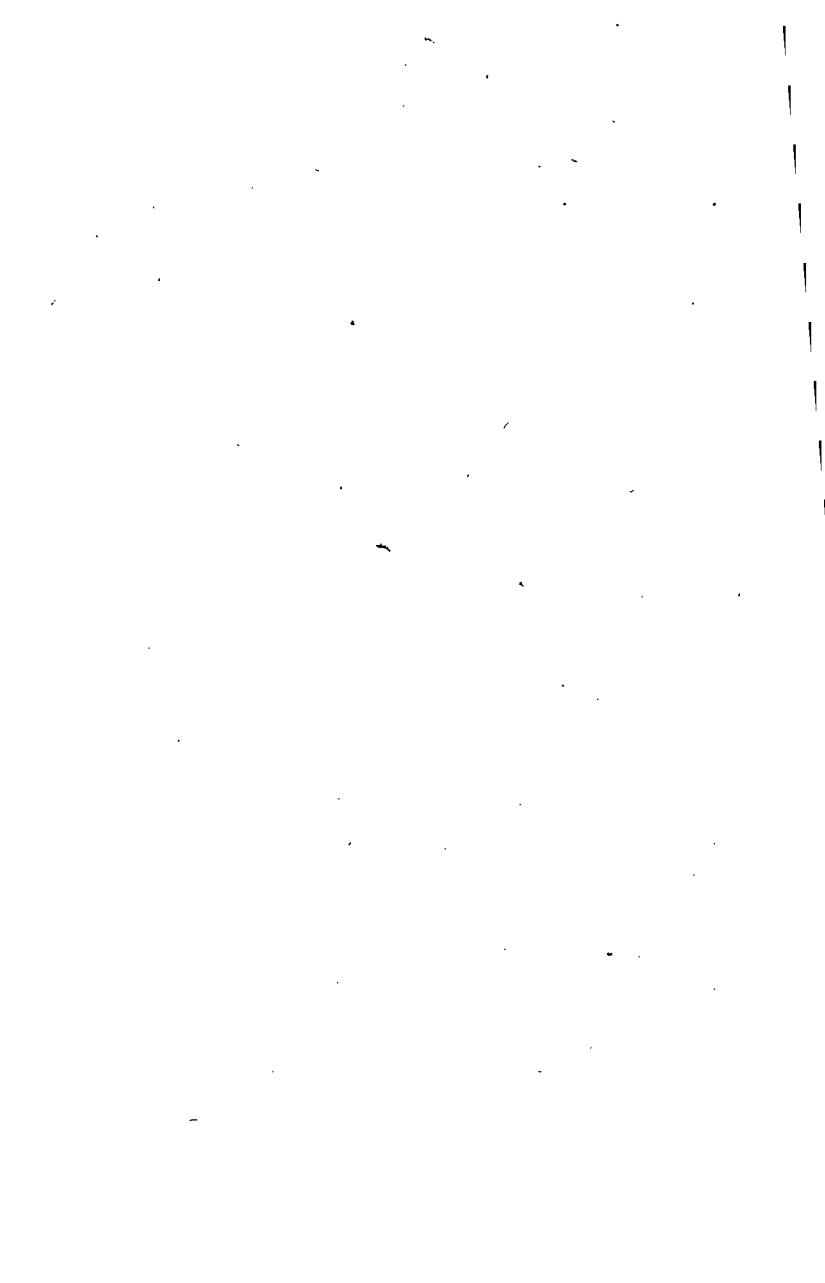


Рис. 405



Рис. 406



VI. ОПТИКА

- $a_{\lambda T}$ — спектральная поглощательная способность
 B — яркость
 C — концентрация
 d — диаметр
 E — освещенность
 e_T — излучательная способность
 $e_{\lambda T}$ — спектральная излучательная способность
 h — высота
 I — величина тока
 J — интенсивность
 N — мощность
 n — показатель преломления
 p — давление
 s — расстояние
 T — температура, °К
 t — температура, °С
 U — напряжение
 W — энергия
 α — коэффициент поглощения
 η — коэффициент полезного действия
 λ — длина волны
 ν — частота
 ρ — коэффициент отражения
 τ — время
 Φ — световой поток

§ 61. ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА

Рис. 407. Зависимость коэффициента отражения от угла падения (i).

Из графика видно, что коэффициент отражения в пределах от 0 до 50° меняется медленно, от 50 до 90° кривая круто поднимается вверх.

Рис. 408. Спектральные кривые коэффициентов отражения некоторых металлов.

Рис. 409. Зависимость коэффициента отражения от показателя преломления на границе воздух — стекло для случая падения света по нормали.

Рис. 410. Зависимость коэффициента отражения от показателей преломления для стекла ($n_{ст}$) и просветляющей пленки.

На графике приведены кривые при различных показателях преломления пленки. Просветляющие пленки обеспечивают эффективное снижение коэффициента отражения.

§ 62. ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА

Рис. 411. Зависимость распределения интенсивности света (в относительных единицах), преломляющегося в дождевой капле, от угла падения (i).

Заштрихованная область показывает долю отраженного света.

Рис. 412. Зависимость между расстояниями от предмета и от изображения до линзы при данном фокусном расстоянии (f) для идеально тонкой линзы.

Зависимость между расстоянием от предмета и от изображения для тонкой симметричной линзы выражается уравнением

$$\frac{1}{s_2} - \frac{1}{s_1} = \frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right),$$

где s_1 — расстояние от линзы до предмета, s_2 — расстояние от линзы до изображения, f — фокусное расстояние линзы.

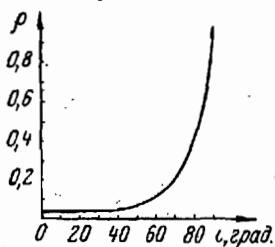


Рис. 407

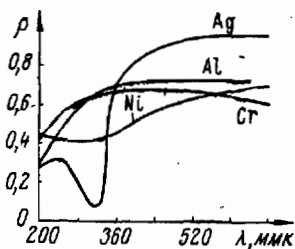


Рис. 408

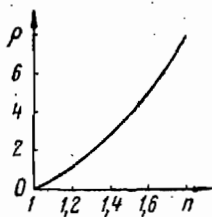


Рис. 409

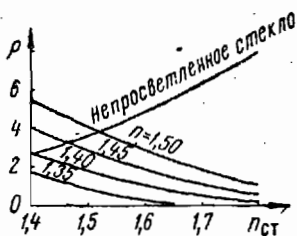


Рис. 410

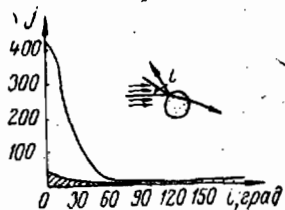


Рис. 411

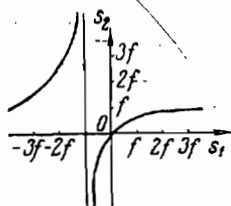


Рис. 412

Рис. 413. Призма Доллонда.

Это спектральная призма прямого зрения, образованная путем погружения стеклянной призмы в сосуд с плоскими прозрачными стенками. Наполненный жидкостью сосуд имеет форму призмы.

Рис. 414. Призма Дове.

Это отражательная призма с одним отражением. Она не изменяет направления проходящего через призму параллельного пучка лучей и эквивалентна плоскопараллельной пластинке, поставленной наклонно к направлению луча.

§ 63. СФЕРИЧЕСКАЯ АБЕРРАЦИЯ

Рис. 415. Зависимость продольной сферической аберрации (Δs) положительной линзы от высоты падающего луча над оптической осью линзы:

$$\Delta s = f_0 - f_1,$$

где f_0 — фокусное расстояние центральных лучей, а $(f_0 - f_1)$ — мера аберрации.

§ 64. ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

Рис. 416. Зависимость показателя преломления от длины волны:

1, 3 — области нормальной дисперсии, 2 — область аномальной дисперсии.

Рис. 417. Зависимость показателя преломления от длины волны вблизи двух линий поглощения (λ_1 и λ_2).

Рис. 418. Зависимость показателя преломления и коэффициента поглощения от частоты.

Кривая, изображающая зависимость поглощения от частоты, имеет максимум для резонансной частоты. Наличие поглощения оказывает влияние на показатель преломления. Вследствие поглощения дисперсионная кривая уже не имеет разрыва. Появляется область аномальной дисперсии, которая характеризуется тем, что в ней показатель преломления убывает с возрастанием частоты.

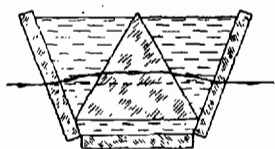


Рис. 413

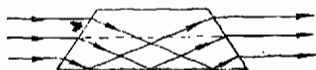


Рис. 414

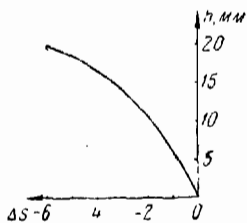


Рис. 415

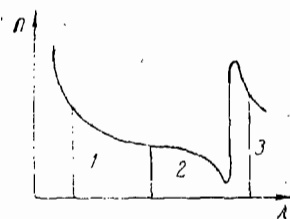


Рис. 416

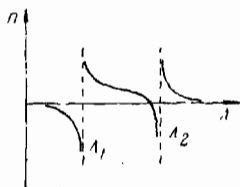


Рис. 417



Рис. 418

Рис. 419. Зависимость показателя преломления от частоты по формуле Зельмейера.

Формула Зельмейера, связывающая показатель преломления с частотой или длиной волны, имеет вид:

$$n^2 = 1 + \frac{Ne^2}{m\pi(\nu_0^2 - \nu^2)},$$

где n — показатель преломления, m — масса электрона, e — заряд электрона, N — число молекул в единице объема.

График показывает, что при частоте (ν), равной нулю,

$$n^2 = 1 + \frac{Ne^2}{\pi m \nu_0^2}.$$

С возрастанием частоты от 0 до ν_0 показатель преломления увеличивается, достигая при ν_0 бесконечного значения. При дальнейшем увеличении частоты n оказывается меньше единицы и с возрастанием ν стремится к единице. Таким образом, с увеличением ν возрастает и n . Такая зависимость n от ν называется аномальной дисперсией.

Рис. 420. Зависимость коэффициента поглощения и показателя преломления в области полосы поглощения от длины волны.

Внутри полосы поглощения показатель преломления убывает с уменьшением длины волны, т. е. имеет обратный (аномальный) ход по отношению к ходу в прозрачных средах.

Рис. 421. Дисперсионные призмы:

обыкновенная призма (a); призма Аббе, у которой угол наименьшего отклонения равен 90° (b); призма Корню — дисперсионная призма из кристаллического кварца, составленная из двух частей (левовращающего и правовращающего кварца), вырезанных так, что оптическая ось кристалла параллельна основанию призмы (c); призма Амичи — спектральная призма «прямого видения», склеенная из трех спектральных призм (d); i — угол падения, i'_1 — угол преломления, i'_2 — угол выхода луча из призмы, α — преломляющий угол призмы, δ — угол наименьшего отклонения; I — красный цвет, II — фиолетовый.

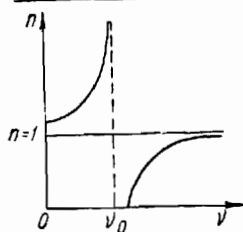


Рис. 419

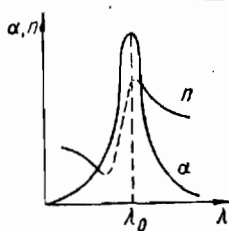
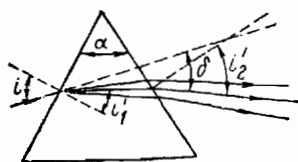
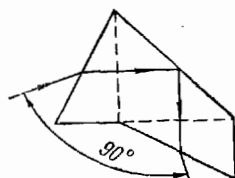


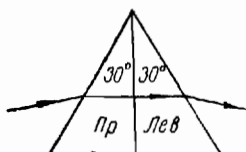
Рис. 420



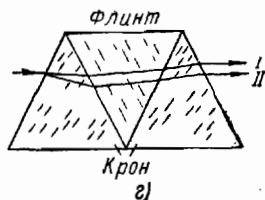
а)



б)



в)



г)

Рис. 421

§ 65. ГЛАЗ И ЕГО СВОЙСТВА

Р и с. 422. Кривая спектральной различительной способности глаза.

По горизонтальной оси отложены длины волн, а по вертикальной—наибольшие допустимые разности длин волн ($\lambda - \lambda_1$), при которых глаз еще не замечает различий в окраске. Все максимумы и минимумы этой кривой можно рассматривать как своего рода знаки границ между радужными цветами; в области 445 мкм находится граница между синим и голубым, в области 500 мкм — между зеленым и желтым, в области 600 мкм — между желтым и оранжевым.

Р и с. 423. Кривая чувствительности глаза:

I — фиолетовый цвет, *II* — синий, *III* — голубой, *IV* — зеленый, *V* — желтый, *VI* — оранжевый, *VII* — красный.

Ординаты кривой не будут идеально точными, они зависят от ряда факторов. С помощью кривой можно определять относительную видимость отдельных цветов.

Р и с. 424. Кривая темновой (*a*) и световой (*b*) адаптации глаза.

Адаптацией называется приспособление глаза к изменяющимся условиям освещения.

Световая адаптация происходит обычно значительно быстрее темновой. В состоянии полной темновой адаптации глаз реагирует, согласно С. И. Вавилову, на световую энергию порядка 10^{-10} эрг.

Р и с. 425. Изменение диаметра зрачка глаза (*d*) со временем при увеличении (*a*; по оси абсцисс — логарифм яркости) и при уменьшении яркости (*b*; по оси абсцисс — время).

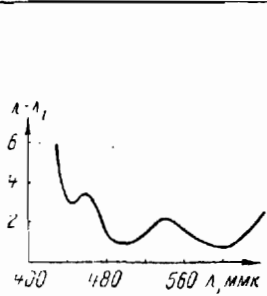


Рис. 422

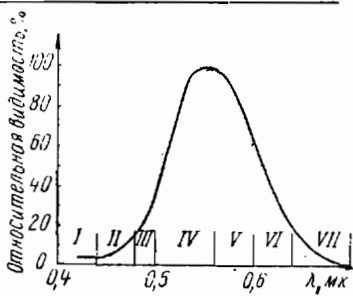
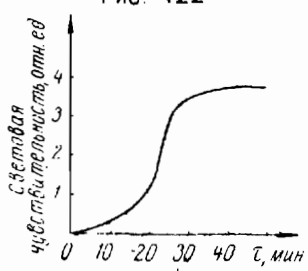
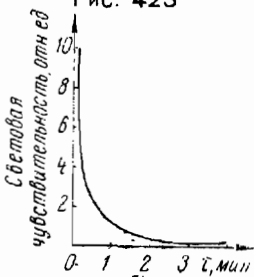


Рис. 423

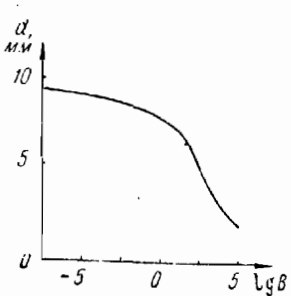


а)

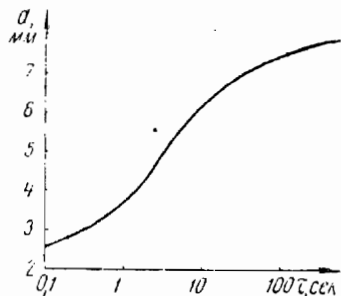


б)

Рис. 424



а)



б)

Рис. 425

Рис. 426. Зависимость остроты зрения от углового расстояния до желтого пятна (s).

Рис. 427. Скорость чтения в зависимости от освещенности.

На горизонтальной оси отложена освещенность таким образом, что цифра 40 соответствует лампе в 40 свечей, поставленной на расстоянии 1 м от книги. По вертикальной оси отложено число слов, прочитанных в минуту (N). Кривая 1 соответствует нормальному глазу, 2 — глазу, испорченному работой при искусственном освещении.

Рис. 428. Изменение видимой яркости объекта во времени.

По оси абсцисс отложена длительность светового воздействия, по оси ординат — видимая яркость объекта, определенная путем сравнения с яркостью стационарного источника. Цифры на кривых обозначают видимую яркость объекта по установлении постоянного уровня (при длительном наблюдении). Яркость в максимуме может превосходить яркость следующего постоянного уровня в 4—5 раз. Этим объясняется, что для глаза оказываются заметнее несколько кратких световых раздражений, чем одно продолжительное.

§ 66. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Рис. 429. Дифракционные полосы и кривая распределения интенсивности при прохождении света мимо края экрана.

Рис. 430. Распределение интенсивности при дифракции на щелях различной ширины (x).

Ширина щелей равна

$$x = 1,9\sqrt{2r_0\lambda} \quad (a)$$

и

$$x = 1,7\sqrt{r_0\lambda} \quad (б),$$

где r_0 — расстояние от точки наблюдения до середины щели.

Пунктиром показано распределение интенсивности, которое получилось бы по законам геометрической оптики.

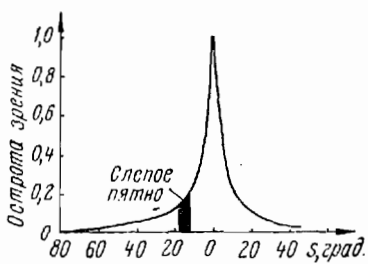


Рис. 426

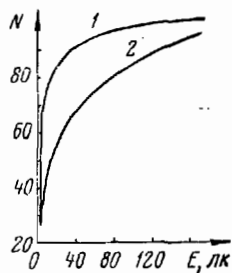


Рис. 427

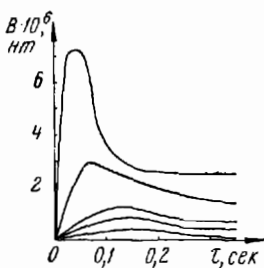


Рис. 428

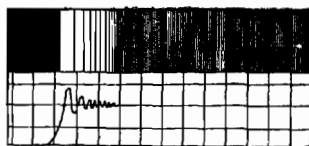


Рис. 429

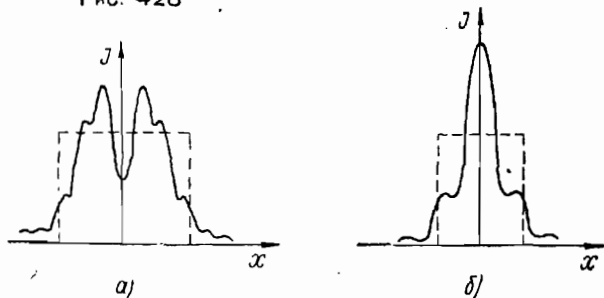


Рис. 430

Р и с. 431. Распределение энергии в дифракционной картине, полученной от одной, двух, четырех и восьми щелей.

По оси абсцисс отложены величины

$$\frac{a + b}{\lambda} \sin \varphi.$$

По оси ординат отложена энергия света, идущего в данном направлении. Ширина щели принята равной ширине промежутка, т. е. $a = b$.

Р и с. 432. Распределение энергии в дифракционном спектре от решетки.

Последовательность щелей одинаковой ширины, расположенных на равных расстояниях друг от друга, называется дифракционной решеткой.

Каждую щель можно рассматривать как самостоятельный источник когерентных колебаний. Действие такой решетки сводится к получению интерференции многих колебаний. Поэтому возрастание числа колебаний (т. е. в данном случае числа щелей) приводит к увеличению резкости интерференционной картины. Главные максимумы становятся уже и выше.

Согласно формуле дифракционной решетки

$$d \sin \varphi = k \lambda,$$

центральная кривая соответствует максимуму нулевого порядка. Симметрично ей расположены максимумы первого и второго порядка.

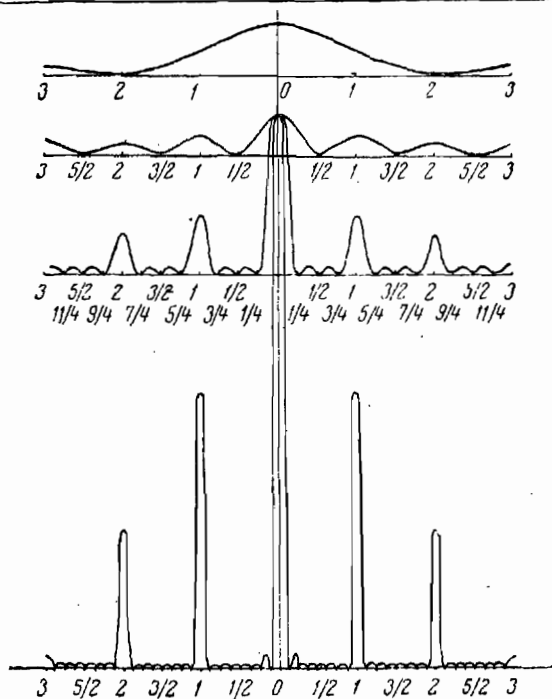


Рис. 431

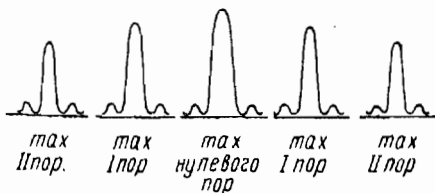


Рис. 432

§ 67. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Рис. 433. Распределение интенсивности по полосам интерференции для случая интерференции конечного множества лучей равной интенсивности:

J_D — интенсивность прошедшего света, J_R — интенсивность отраженного света, J_{max}^D — максимальное значение интенсивности света в полосах интерференции, J_0 — интенсивность падающего света, Δ — расстояние между главными максимумами интенсивности света, δ — ширина главного максимума, $k, k + 1, \dots$ — порядок интерференции.

Рис. 434. Распределение интенсивности при интерференции многих пучков (N).

При увеличении числа интерферирующих пучков главные максимумы становятся резче, между ними располагается все большее число слабых вторичных максимумов.

Рис. 435. Распределение интенсивности в отраженном (J_R) и проходящем (J_D) свете для случая интерференции бесконечного множества лучей равной интенсивности.

Обозначения такие же, как на рис. 433.

Рис. 436. Кривые резкости полос интерференции при различных значениях коэффициента отражения.

§ 68. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Рис. 437. Зависимость поляризованного света от угла падения:

R_p — электрический вектор в плоскости падения, R_s — вектор, перпендикулярный плоскости падения, R — вектор для неполяризованного света.

Рис. 438. Пластины Брюстера.

Пластины Брюстера — интерференционный оптический прибор, состоящий из двух плоскопараллельных стеклянных пластин P_1 и P_2 одинаковой толщины, образующих между собой малый угол. Лучи A и B после отражения от пластин разделяются на два луча 1 и 2 . На рисунке изображены два возможных случая деления лучей. После двукратного отражения от пластин лучи 1 и 2 сливаются в один луч и интерферируют. При повороте одной из пластин на малый угол в лучах 1 и 2 возникает разность хода. Тогда в проходящем свете наблюдаются интерференционные полосы.

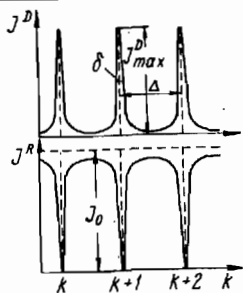


Рис. 433

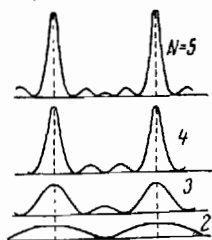


Рис. 434

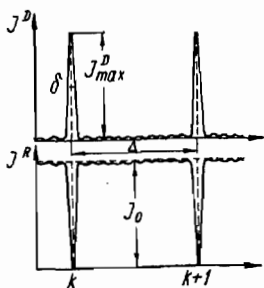


Рис. 435

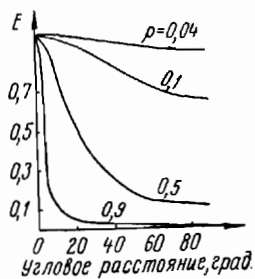


Рис. 436

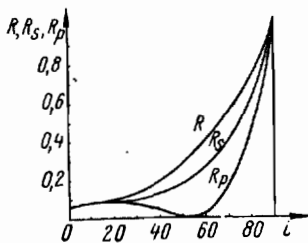


Рис. 437

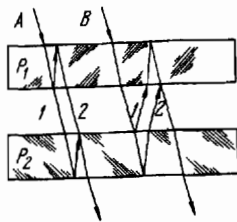


Рис. 438

Р и с. 439. Призма Глазбрука:

AB — плоскость склейки, o — обыкновенный луч, e — необыкновенный луч.

Это поляризационная призма из кристалла исландского шпата, применяемая как поляризатор.

Направление оптической оси кристалла перпендикулярно плоскости рисунка в обеих прямоугольных призмах.

Р и с. 440. Призма Глана:

o — обыкновенный луч, e — необыкновенный луч.

Это поляризационная призма. В отличие от призмы Глазбрука прямоугольные призмы, составляющие ее, не склеиваются, а разделяются воздушным промежутком AB .

Направление оптической оси кристалла перпендикулярно плоскости рисунка в обеих прямоугольных призмах.

Р и с. 441. Призма Волластопа:

BD — плоскость склейки, o — обыкновенный луч, e — необыкновенный луч.

Это двоякопреломляющая поляризационная призма. Направление оптической оси кристаллов в призме ABD параллельно ребру AB , в призме BCD перпендикулярно плоскости чертежа.

§ 69. ИЗЛУЧЕНИЕ СВЕТА

Р и с. 442. Распределение энергии по длинам волн в спектре абсолютно черного тела при различных температурах.

Р и с. 443. Распределение энергии в спектре Солнца при различных высотах его над горизонтом:

1 — за пределами атмосферы, 2 — при положении Солнца над головой, 3 — высота Солнца 30° над горизонтом, 4 — при условиях, близких к восходу и закату (10° над горизонтом); W — относительная энергия.

Р и с. 444. Средняя годовая кривая распределения энергии полуденного Солнца для средних широт (верхняя кривая):

1 — кривая дневной видимости 2 — кривая сумеречной видимости, 3 — кривая поглощения хлорофилла.

Р и с. 445. Зависимость освещенности от времени года

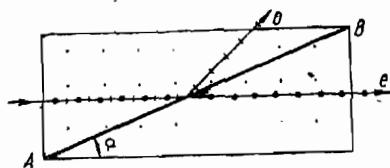


Рис. 439

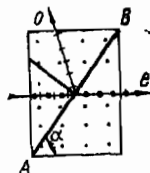


Рис. 440

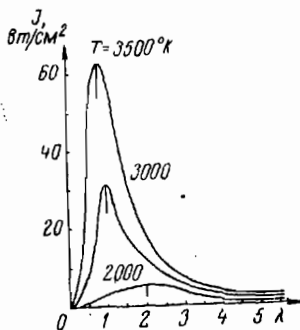


Рис. 442

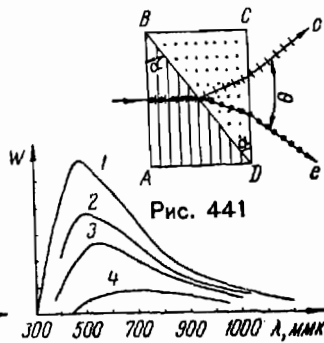


Рис. 443

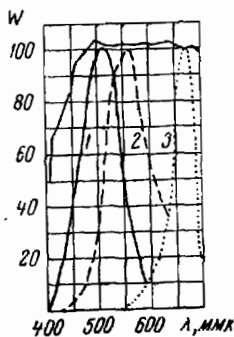


Рис. 444

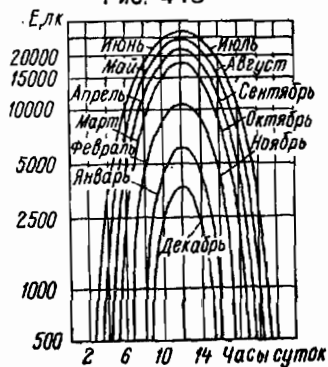


Рис. 445

Р и с. 446. Сравнение распределения по длинам волн светимости (в относительных единицах) абсолютно черного тела (1) и вольфрама (2).

Пунктирная кривая показывает поглощательную способность (ϵ) вольфрама при той же температуре.

Р и с. 447. Кривые излучения и поглощения абсолютно черного и произвольного тел:

$\epsilon'_{\lambda T}$ — спектральная излучательная способность абсолютно черного тела.

На рисунке даны графики функций $\epsilon_{\lambda T}$, $\epsilon'_{\lambda T}$, $a_{\lambda T}$ для одной и той же температуры. Кривая $\epsilon_{\lambda T}$ имеет несколько максимумов, но вся она расположена ниже кривой излучения абсолютно черного тела. Кривая $a_{\lambda T}$ лежит ниже прямой $a = 1$, причем всякому возрастанию ординаты кривой $a_{\lambda T}$ соответствует возрастание ординаты $\epsilon_{\lambda T}$ в соответствии с законом Кирхгофа.

Р и с. 448. Световой коэффициент полезного действия ($\eta_{св}$):

N_v — мощность излучения в видимой части спектра, N_0 — полная мощность излучения абсолютно черного тела, N_1 — мощность излучения, исправленная на чувствительность глаза.

Р и с. 449. Зависимость светового ($\eta_{св}$) и энергетического ($\eta_{эн}$) коэффициентов полезного действия от температуры.

Из графика видно, что при повышении температуры максимум излучения перемещается в сторону более коротких волн, что приводит к уменьшению светового и энергетического коэффициентов.

Р и с. 450. Зависимость светового потока, величины тока, мощности и световой отдачи лампы (%) от продолжительности горения.

Р и с. 451. Зависимость световой отдачи ($лм/вт$) пустотных ламп от их мощности.

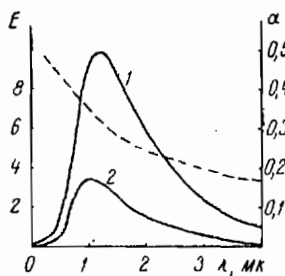


Рис. 446

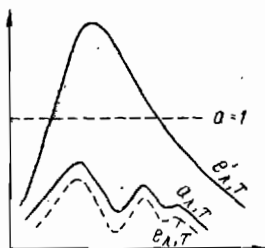


Рис. 447

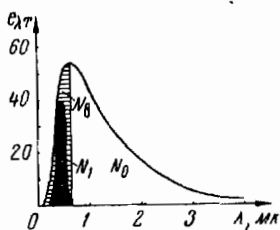


Рис. 448

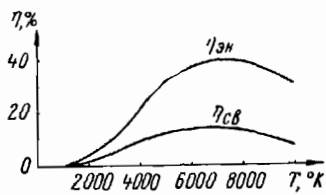


Рис. 449

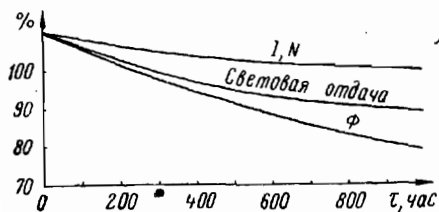


Рис. 450

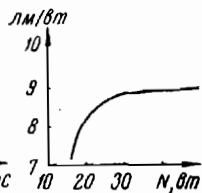


Рис. 451

Рис. 452. Спектральное распределение энергии излучения от лампы накаливания мощностью 100 в:

I — ультрафиолетовые лучи, *II* — видимые, *III* — инфракрасные.

Рис. 453. Кривая относительной спектральной чувствительности (%) различных приемников световой энергии:

1 — кадмисвый фотоэлемент, *2* — фотопластинка «Ортохром», *3* — глаз, *4* — термоэлемент.

Рис. 454. Распределение энергии в спектре дуги интенсивного горения:

1 — интенсивная дуга при $I = 150$ а, *2* — черное тело при $T = 4500^\circ\text{K}$.

§ 70. ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА

Рис. 455. Кривые оптических плотностей для различных красок:

1 — зеленый цвет, *2* — синий, *3* — красный.

По закону Бугера

$$I = I_0 e^{-\alpha a},$$

где α — коэффициент поглощения, I_0 — интенсивность падающего света, I — интенсивность прошедшего света. Часто эту формулу переписывают так:

$$I = I_0 10^{-\alpha' a},$$

где α' пропорционален α . Показатель $\alpha' a$ называется оптической плотностью. Оптическая плотность, равная 1, соответствует 10% пропускания, плотность, равная 2, соответствует 1% пропускания и т. д. Для большинства веществ коэффициент поглощения, или оптическая плотность, зависит от длины волны.

Рис. 456. Характеристическая кривая для фотопластинки.

При очень малых количествах света (*I* — недодержка) почернение медленно растет с интенсивностью, затем имеется прямолинейный участок (*II* — область нормального почернения), при слишком большом засвечивании наблюдается уже насыщение (*III* — передержка) и даже уменьшение почернения (*IV* — соляризация).

Рис. 457. Кривые спектральной чувствительности фотопластинки:

1 — обычная эмульсия, *2* — ортохроматическая, *3* — изопанхроматическая эмульсия.

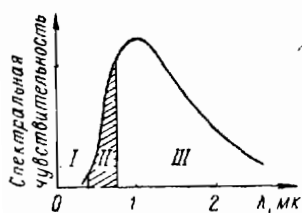


Рис. 452

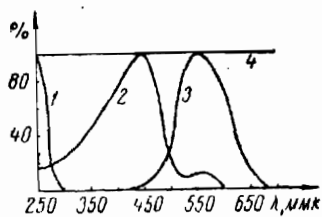


Рис. 453

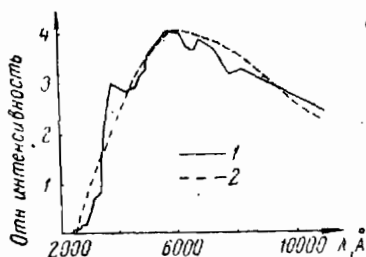


Рис. 454

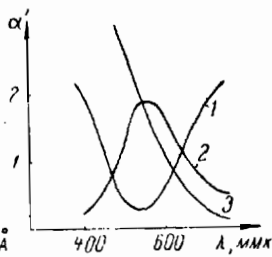


Рис. 455

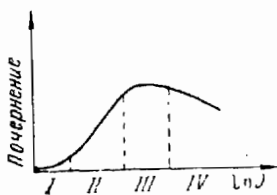


Рис. 456

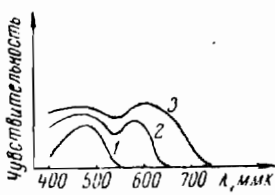


Рис. 457

§ 71. ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ

Р и с. 458. Возбуждение спектра люминесценции:

1 — линии возбуждения, 2 — люминесценция.

Спектр люминесценции, как видно из графика, характеризуется люминесцирующее вещество и обусловлен природой его молекул, а не энергией возбуждающего фотона. В жидких и твердых телах спектр люминесценции не зависит от длины волн возбуждающего света. Таким образом, если в пределах спектра поглощения изменить частоту возбуждающего света, то спектр люминесценции остается прежним.

Р и с. 459. Кривая термовысвечивания люминофора $ZnS-Cu$.

На кривой зависимости яркости свечения люминофора от температуры наблюдается ряд максимумов, которые обусловлены освобождением электронов или дырок из ловушек определенной глубины.

Р и с. 460. Закон Стокса.

Согласно закону Стокса, спектр люминесценции в целом и его максимум всегда сдвинуты в сторону длинных волн по сравнению со спектром света, применяющегося для возбуждения.

Р и с. 461. Нарушения закона Стокса:

1 — возбуждающая линия, 2 — полоса люминесценции.

Заштрихованная область, соответствующая нарушению закона Стокса, называется антистоксовой. Наличие ее следует объяснять добавлением к энергии возбуждающего фотона тепловой энергии люминесцирующего вещества. С повышением температуры антистоксова область выступает яснее.

Р и с. 462. Закон Вавилова.

На графике изображены результаты, полученные С. И. Вавиловым (сплошная кривая), и дан схематический ход теоретической кривой (пунктир).

Согласно закону Вавилова, энергетический выход люминесценции до известного предела растет пропорционально длине волны возбуждающего света, а затем резко падает до нуля.

Р и с. 463. Тушение флуоресценции жидкостей.

Тушение начинается при строго определенной концентрации, т. е. существует резкий порог концентрационного тушения.

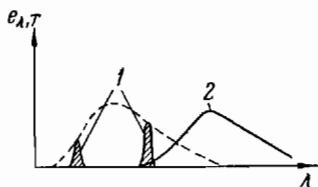


Рис. 458.

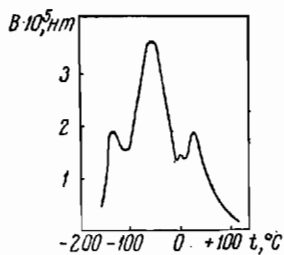


Рис. 459

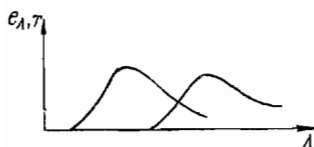


Рис. 460



Рис. 461

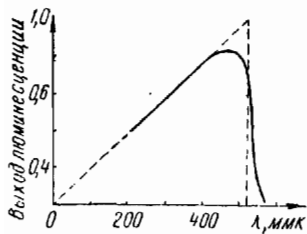


Рис. 462

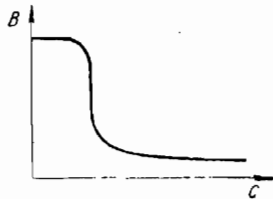


Рис. 463

Рис. 464. Тушение флуоресценции паров:

p — давление тушащего газа.

Рис. 465. Спектры флуоресценции и поглощения раствора эозина в воде.

Для данного случая характерна зеркальная симметрия обоих спектров.

По оси ординат отложены квантовая интенсивность, равная отношению лучистого потока люминесценции в интервале частот $d\nu$ к энергии кванта $h\nu$, и коэффициент поглощения α (для спектров поглощения), по оси абсцисс — время.

На графике изображены спектры флуоресценции и поглощения раствора эозина в воде. Видна зеркальная симметрия обоих спектров.

Рис. 466. Кривые спектров лампы накаливания (1) и люминесцентной лампы дневного света (2).

Из графика видно, что в лампах накаливания имеется большой недостаток лучей в синей и огромный избыток их в красной части спектра. Последнее устраняется введением дополнительной компоненты в люминесцентное покрытие ламп (прямоугольники — свет линий ртути).

Рис. 467. Зависимость светового потока люминесцентной лампы от времени.

Рис. 468. Диаграммы спектрального распределения для натриевой (а) и ртутной (б) ламп:

W — относительная энергия.

Кривая изображает чувствительность глаза. Заштрихованные площади соответствуют видимым яркостям. Полные площади показывают энергию излучения.

Световой к. п. д. рассматриваемых ламп в десятки раз превышает световой к. п. д. излучения ламп накаливания. Однако к. п. д. превращения электрической энергии в энергию излучения газосветных ламп ниже, чем ламп накаливания. У последних 80% подводимой электроэнергии превращается в излучение, но оно в основном невидимое — инфракрасное.

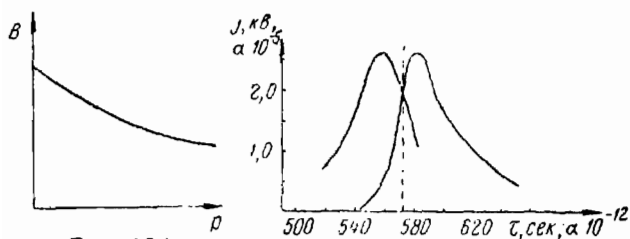


Рис. 464

Рис. 465

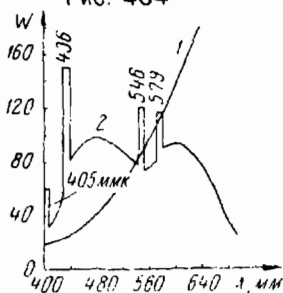


Рис. 466

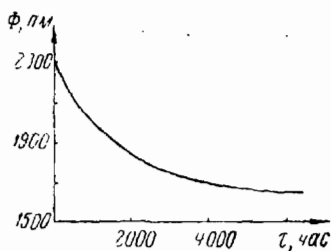
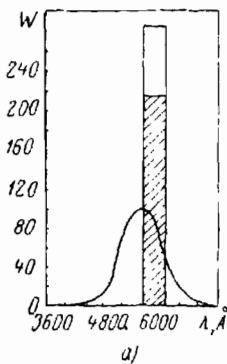
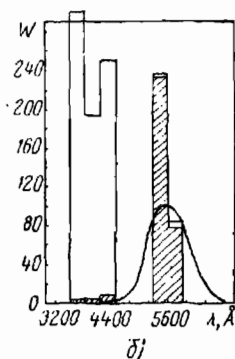


Рис. 467



а)



б)

Рис. 468

§ 72. ФОТОЭФФЕКТ

Рис. 469. График закона Эйнштейна для внешнего фотоэффекта:

$$\frac{mc^2}{2} = h\nu - A.$$

На графике приведены данные экспериментальных исследований Лукирского и Прилежаева. Для различных металлов получают параллельные линии M_1 , M_2 с угловым коэффициентом, равным h . При частоте света $\nu = \nu_0$, при которой $h\nu_0 = A$ и кинетическая энергия электрона равна 0, фотоэффект не наблюдается. ν_0 называется красной границей фотоэффекта (ν_0 "красная граница для двух различных металлов").

Рис. 470. Зависимость величины тока от длины волны для нормального фотоэффекта (λ_0 соответствует красной границе).

Рис. 471. Зависимость величины тока от длины волны в области селективного (избирательного) фотоэффекта.

Селективность фотоэлектрических явлений напоминает резонансные эффекты. Получается так, как будто бы электроны в металле обладают собственным периодом, так что по мере приближения частоты возбуждающего света к собственной частоте электронов амплитуда колебания их возрастает и они преодолевают работу выхода.

Рис. 472. Зависимость селективного фотоэффекта от угла падения.

Величина селективного максимума резко возрастает по мере увеличения угла падения.

§ 73. ФОТОЭЛЕМЕНТЫ

Рис. 473. Зависимость величины фототока от напряжения для вакуумного фотоэлемента в случае разных интенсивностей освещения ($E_1 > E_2$).

Рис. 474. Световые характеристики селенового фотоэлемента при различных сопротивлениях внешней цепи.

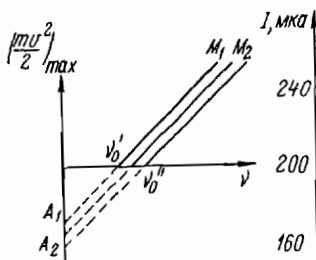


Рис. 469

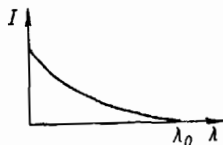


Рис. 470

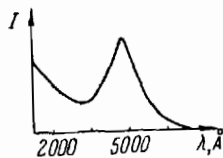


Рис. 471

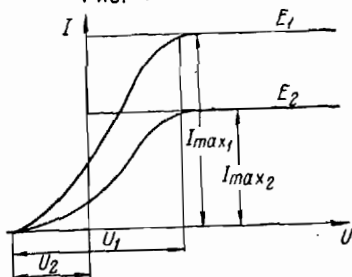


Рис. 473

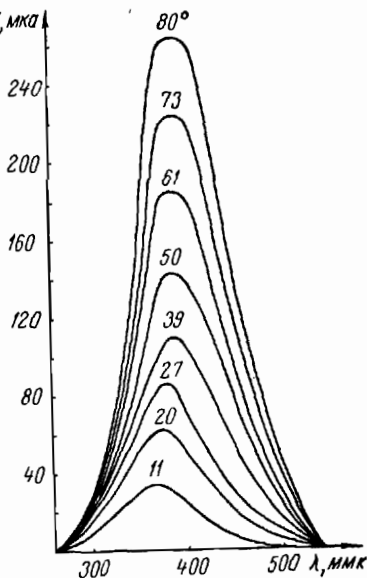


Рис. 472

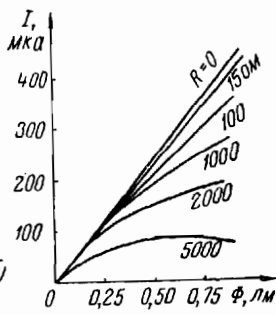


Рис. 474

Р и с. 475. Спектральное распределение собственной фотопроводимости в германии.

Р и с. 476. Спектральное распределение примесной фотопроводимости в германии (с примесью меди).

Р и с. 477. Влияние поляризации света на спектральную чувствительность фотокатода.

График показывает, что при освещении плоского фотоэлемента поляризованным светом наблюдается сильное изменение формы кривой спектральной чувствительности в зависимости от угла между плоскостью поляризации и плоскостью падения.

Р и с. 478. Спектральные характеристики селеновых фотоэлементов:

1 — чистый селен, 2 — селен с примесью теллура, 3 — селен с примесью серы.

Р и с. 479. Спектральная характеристика ФЭСС (1).

Для сравнения приведена спектральная характеристика селенового фотоэлемента (2).

Р и с. 480. Частотные характеристики некоторых вентильных фотоэлементов.

По оси абсцисс отложена частота падающего светового потока, по оси ординат — фототок.

Как видно из графика, при падении на вентильный фотоэлемент переменного светового потока с определенной частотой возникающий ток зависит от этой частоты: с увеличением частоты фототок уменьшается. Характер этого уменьшения различен для разных фотоэлементов.

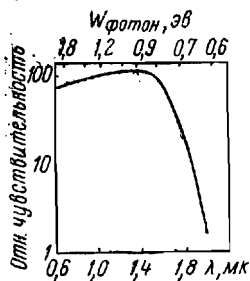


Рис. 475

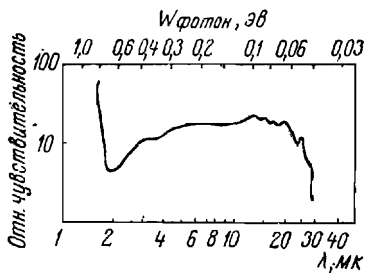


Рис. 476

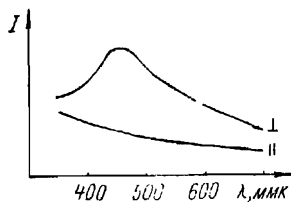


Рис. 477

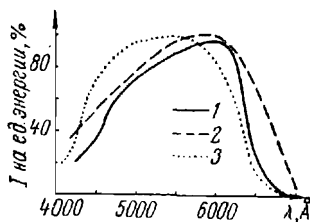


Рис. 478

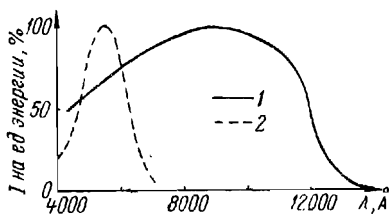


Рис. 479

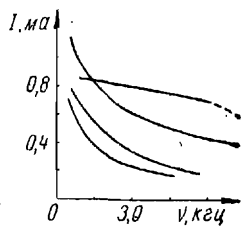


Рис. 480

§ 74. ФОТОСОПРОТИВЛЕНИЯ

Рис. 481. Свойства фотосопротивлений:

1 — сильное освещение, 2 — слабое, 3 — темновой ток.

В отличие от фотоэлемента с внешним фотоэффектом фотосопротивления не обладают током насыщения. На рисунке дана вольт-амперная характеристика фотосопротивления (а). При значительных освещенностях в фотосопротивлениях утрачивается линейная зависимость между величиной фототока и световым потоком (б).

Рис. 482. Характер спектральной зависимости фотосопротивления.

Рис. 483. Кривая инерционности фотосопротивления.

Инерционность проявляется в том, что при освещении фототок достигает своего конечного значения не сразу, а через некоторое время. То же самое происходит и при затемнении фотосопротивления; с момента выключения света фототок снижается сравнительно медленно и достигает своего конечного значения иногда через значительные промежутки времени.

Рис. 484. Кривая стабильности фотосопротивлений типа ФС-К1.

§ 75. РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Рис. 485. Спектры тормозного излучения при различном напряжении.

При повышении напряжения интенсивность рентгеновского излучения растет.

Рис. 486. Характеристическое излучение:

1 — характеристическое излучение, 2 — тормозное.

При больших напряжениях в рентгеновской трубке, кроме сплошного спектра, возникает линейчатый, который налагается на сплошной спектр, как показано на рисунке. Линейчатый спектр представляет собой резко выделяющиеся линии *a*, *b* и т. д. Этот спектр называют характеристическим, так как каждое вещество имеет свой спектр характеристического излучения. Сплошной спектр не зависит от вещества анода и определяется только напряжением.

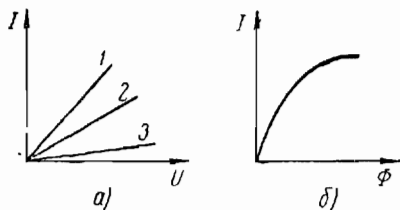


Рис. 481

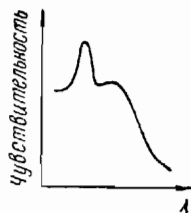


Рис. 482

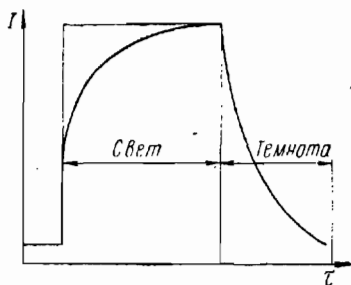


Рис. 483

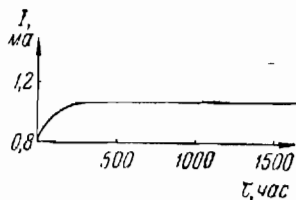


Рис. 484

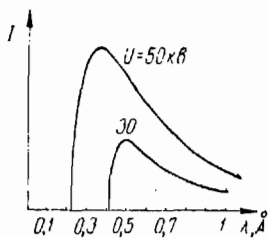


Рис. 485

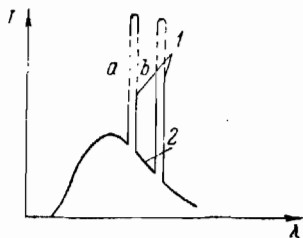


Рис. 486

VII. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

- A — массовое число
- a — активность
- d — толщина слоя
- h — высота
- J — интенсивность
- N — мощность
- q — коэффициент ослабления
- s — расстояние
- W — энергия
- Δ — дефект масс
- σ — эффективное сечение
- τ — время

§ 76. СТРОЕНИЕ АТОМА

Рис. 487. Потенциальная яма для гармонически колеблющейся частицы.

На графике прямая, параллельная оси абсцисс, изображает полную энергию (W), т. е. сумму потенциальной и кинетической энергии. Так как кинетическая энергия всегда положительна, то, согласно законам классической механики, частица не может испытывать таких смещений, в результате которых ее потенциальная энергия $W_{\text{потенц}} = W - W_{\text{кинет}}$ оказалась бы больше полной энергии W . Область дозволённых смещений определяется неравенством $W_{\text{потенц}} < W$. Эта область ограничена двумя прямыми, параллельными оси ординат. Они проходят через точки, где $W_{\text{потенц}} = W$.

Энергетическую диаграмму подобного типа называют потенциальной ямой.

Рис. 488. Потенциальная яма для электрона, связанного с ядром.

По оси абсцисс отложено расстояние от электронов до ядра, по оси ординат — значение потенциальной энергии $W_{\text{потенц}}$. В данном случае потенциальная энергия отрицательна.

Рис. 489. Потенциальная яма ядра для нейтронов (1) и протонов (2).

Рис. 490. Относительная вероятность встретить электрон на различных расстояниях от положения равновесия, когда он совершает колебания, находясь в самом низком квантовом состоянии $n = 0$:

a_0 — классическая амплитуда при $W = h\nu/2$.

Кривая показывает вероятность нахождения колеблющегося электрона на том или ином расстоянии от положения равновесия, согласно законам классической механики, когда электрон обладает энергией $h\nu/2$. На графике приведена кривая относительной вероятности смещения электрона (ψ^2), вычисленная по уравнению Шредингера при $W = h\nu/2$. Здесь видно резкое расхождение с классической теорией.

Рис. 491. Относительная вероятность встретить электрон на различных расстояниях от положения равновесия, когда его колебательное состояние характеризуется квантовым числом $n = 1$ (а) и $n = 2$ (б):

a_1 — классическая амплитуда при $W = 3h\nu/2$, a_2 — классическая амплитуда при $W = 5h\nu/2$.

По мере возрастания квантового числа вероятность присутствия электрона в данном месте все ближе и ближе подходит к вероятности, даваемой классической теорией.

Например, для массы, равной массе гири маятника, даже едва заметное качание происходит с энергией, значительно большей $h\nu$, и поэтому соответствует огромному квантовому числу. В таком случае заметить разницу между классической и квантовой теориями совершенно невозможно.

Рис. 492. Зависимость между числом нейтронов (N_n) и протонов (N_p) в устойчивых ядрах (зависимость приближенная).

§ 77. РАДИОАКТИВНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Рис. 493. Уменьшение активности (a) радиоактивного вещества с течением времени.

Активность данного вещества равна 1 *кюри*, если в нем, как и в 1 г радия, происходит $37 \cdot 10^9$ распадов в 1 *сек.*

Рис. 494. Закон радиоактивного распада:

N_0 — число атомов в начальный момент, N — число атомов, оставшихся по истечении времени t .

Дифференциальная форма закона распада

$$dN = -\lambda N dt,$$

где λ — постоянная распада, равная отношению уменьшению числа атомов в единицу времени, или вероятность распада атомов за 1 *сек.*

§ 78. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ С ВЕЩЕСТВОМ

Рис. 495. Эффект Комптона.

На рисунке представлены итоги измерений Комптона. В спектре рассеянных лучей, кроме линии, имеющей длину волны излучения, падающего на графит, появляется еще одна линия с большей длиной волны, сдвиг которой растёт с увеличением угла рассеяния (θ).

Верхний график изображает линию источника монохроматических лучей k_α молибдена с длиной волны $0,7126 \text{ \AA}$.

Рис. 496. Зависимость относительного числа (M) рассеянных в определенном направлении α -частиц от угла,

составленного данным направлением с направлением первоначального пучка:

i — угол отклонения.

Р и с. 497. Схематическое изображение результатов опытов по рассеянию α -частиц:

A — кривая группировки пучка без фольги, B — кривая рассеяния одним листком фольги, C — двумя листками s — расстояние от центра.

Р и с. 498. Флуктуация числа испускаемых α -частиц.

По оси абсцисс отложено число сцинтилляций (n), замеченных в течение 15 сек, по оси ординат — частота повторяемости групп (N) (200 раз отмечено по 1 сцинтилляции за 15 сек, 400 — по 2 и т. д.).

Р и с. 499. Кривая поглощения α -частиц:

N — число частиц, прошедших расстояние s .

Р и с. 500. Зависимость энергии α -распада (в относительных единицах) от массового числа (кривыми соединены изотопы одного элемента).

Р и с. 501. Зависимость энергии кулоновского взаимодействия α -частицы с ядром от расстояния между ними:

z — заряд ядра, R — радиус ядра, s — расстояние между α -частицей и ядром, W — энергия α -частицы.

Р и с. 502. Кривая поглощения β -частиц.

Поглощение β -частиц с данной максимальной энергией происходит по экспоненциальному закону

$$N = N_0 e^{-\alpha d},$$

где N_0 — число частиц, падающих на слой вещества, α — коэффициент поглощения, d — толщина слоя. На рисунке дана опытная кривая поглощения β -частиц.

Р и с. 503. β -спектр нейтрона (пример β -спектра легкого элемента).

По оси абсцисс отложена кинетическая энергия электронов $W_{\text{кин}}$, по оси ординат — число электронов N в относительных единицах.

Р и с. 504. β -спектр RaE (пример β -спектра тяжелого элемента):

N — число импульсов.

β -спектр принадлежит к числу запрещенных спектров, т. е. таких, которые не описываются выражениями, следующими из теории Ферми для разрешенных переходов, а связаны с запрещенными переходами.

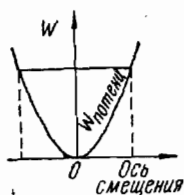


Рис. 487

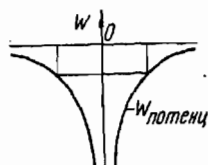


Рис. 488

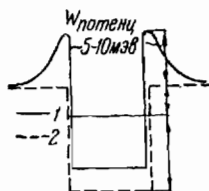


Рис. 489

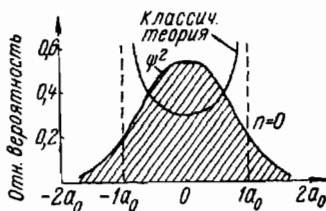


Рис. 490



а)



б)

Рис. 491

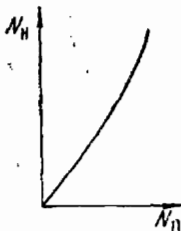


Рис. 492

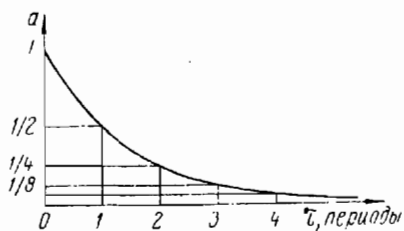


Рис. 493

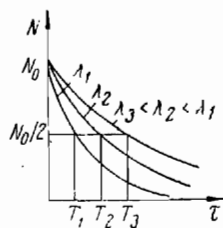


Рис. 494

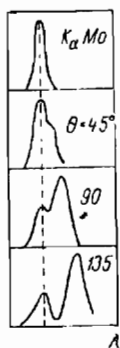


Рис. 495

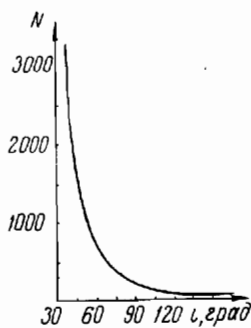


Рис. 496

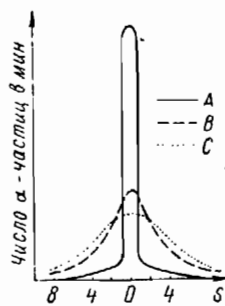


Рис. 497

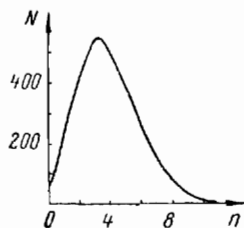


Рис. 498

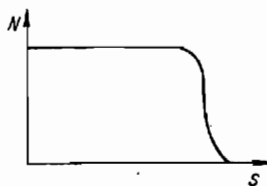


Рис. 499

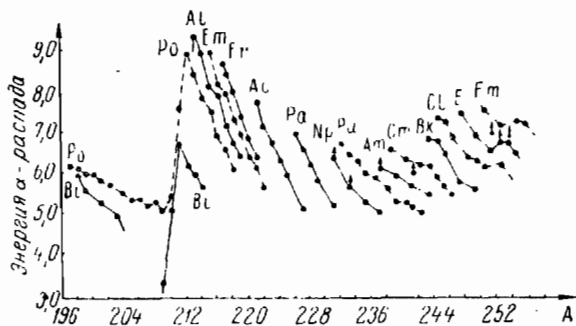


Рис. 500

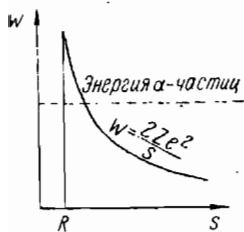


Рис. 501

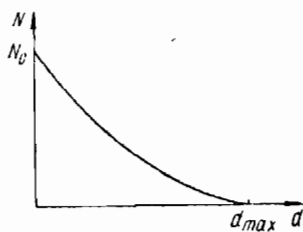


Рис. 502

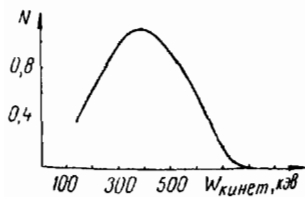


Рис. 503

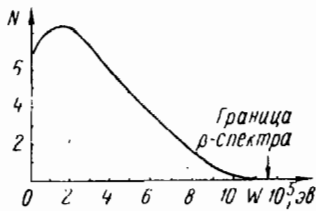


Рис. 504

Р и с. 505. Энергетический спектр β -лучей.

На кривой можно непосредственно определить долю β -лучей (N), испускаемых с энергией, заключенной между какими-нибудь значениями, например W_1 и W_2 . Доля β -лучей, испускаемых с энергией, заключенной в пределах от W_1 до $W + dW$, равна $\omega(W) dW$. Эта функция называется β -спектром данного радиоактивного элемента. На рисунке приведена кривая, выражающая эту функцию.

Р и с. 506. β -спектры фосфора (P^{30}) и алюминия (Al^{28}):

N — число импульсов.

Для β -электронов характерно непрерывное распределение энергии (вплоть до некоторой максимальной величины). Эти β -электроны имеют ядерное происхождение.

Р и с. 507. Спектр γ -лучей, возникающих при радиоактивном превращении кальция (Ca^{47}) в скандий (Sc^{47}).

Спектр получен при помощи сцинтилляционного γ -спектрометра. По оси ординат отложено число импульсов (N) в единицу времени (в произвольных единицах), по оси абсцисс — величина импульса (W), пропорциональная энергии γ -лучей.

Р и с. 508. Кривая поглощения γ -лучей.

γ -лучи, проходя через вещество, поглощаются постепенно, согласно закону

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

где μ — линейный коэффициент ослабления, зависящий от энергии лучей и свойств среды, I_0 — интенсивность падающего параллельного пучка, I — интенсивность после его прохождения через слой вещества толщиной x , см. На графике $d_{1/2}$ — толщина слоя, уменьшающего интенсивность пучка вдвое.

Р и с. 509. Зависимость полного коэффициента ослабления (q) γ -лучей (эффективного сечения на атом) и его составляющих (эффект Комптона и фотоэффект) в свинце от энергии γ -лучей.

Р и с. 510. Зависимость толщины слоя вещества от энергии γ -лучей.

При прохождении через слой вещества интенсивность пучка γ -лучей уменьшается вдвое (слой половинного ослабления). Кривые даны для бериллия (1), алюминия (2), олова (3) и свинца (4).

§ 79. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ И АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ

Р и с. 511. Зависимость эффективного сечения от скорости нейтронов (v_n).

Характерная кривая для реакций, вызываемых медленными нейтронами.

График показывает, что эффективное сечение уменьшается почти обратно пропорционально скорости налетающего нейтрона.

Р и с. 512. Вероятность просачивания протона через кулоновский барьер легкого, среднего и тяжелого ядер.

По оси ординат отложены вероятность просачивания (P), а по оси абсцисс отношения кинетической энергии протона к высоте кулоновского барьера (x). Цифры на кривых показывают массу ядра (A).

Р и с. 513. Зависимость дефекта массы и коэффициента упаковки от атомного номера.

Под дефектом массы Δ понимают разность между массой атома M , выраженной в физической шкале масс, и массовым числом A

$$\Delta = M - A,$$

т. е. под дефектом массы понимают отступление действительной массы атома, выраженной в физической шкале масс, от ближайшего целочисленного значения.

Дефект массы считается положительным, если массовое число меньше массы атома. Это наблюдается у наиболее легких атомов (водорода, гелия, бериллия, углерода). В противоположном случае дефект массы считают отрицательным. Он отрицателен для всех атомов с массой, превышающей 20 и меньшей 185.

Отношение дефекта массы к массовому числу называют упаковочным коэффициентом

$$p = \frac{M - A}{A}.$$

Иначе говоря, дефект массы — это убыль массы, вызываемая выделением энергии при возрастании связи между частицами.

Р и с. 514. Зависимость удельной энергии связи E/A от массового числа.

§ 80. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Р и с. 515. Различный характер временного режима атомного реактора в зависимости от знака коэффициента реактивности:

k_p — коэффициент реактивности, численно равный изменению реактивности при изменении величины мощности на единицу.

Р и с. 516. Установление заданной мощности (N) при пуске атомного реактора.

§ 81. КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

Р и с. 517. Потеря энергии быстрыми электронами на ионизацию (1) и тормозное излучение (2).

При большой скорости движения электрона через вещество потеря его энергии на ионизацию (W_1) весьма мала в сравнении с потерей энергии на излучение тормозных фотонов. Для других быстро движущихся заряженных частиц, например протонов, потеря энергии на тормозное излучение ничтожна, так как она обратно пропорциональна квадрату массы движущейся частицы.

Пролетая в веществе вблизи атомного ядра, электроны, позитроны и другие заряженные частицы испытывают изменение своей скорости по величине и направлению, следовательно, они должны излучать энергию. Это излучение называют тормозным излучением заряженных частиц в поле атомных ядер.

Р и с. 518. Ионизационные потери энергии в воздухе для частиц, тяжелее электронов, в зависимости от энергии.

Р и с. 519. Изменение интенсивности космических лучей с высотой над уровнем моря.

Р и с. 520. Поглощение космических лучей в атмосфере: N — число ионов.

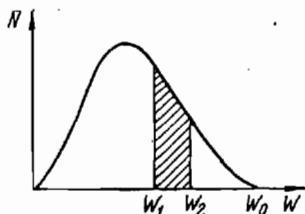


Рис. 505

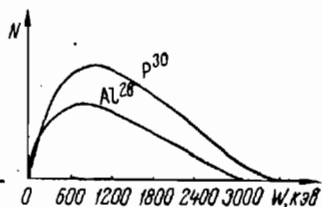


Рис. 506.

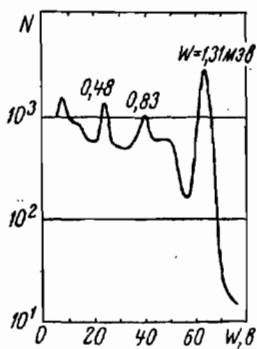


Рис. 507

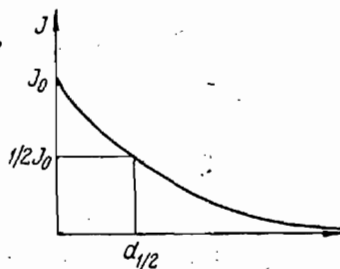


Рис. 508

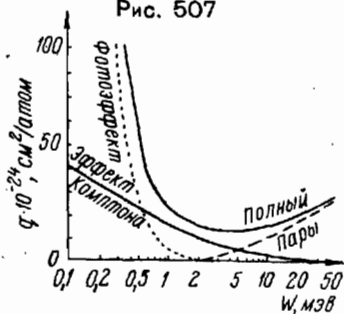


Рис. 509

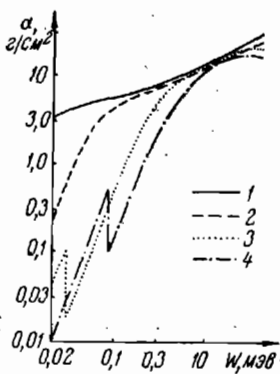


Рис. 510

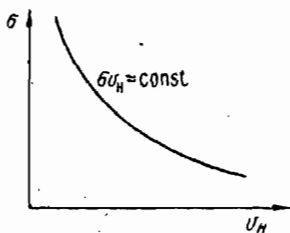


Рис. 511

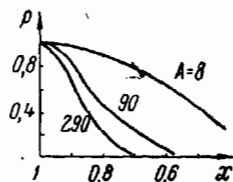


Рис. 512

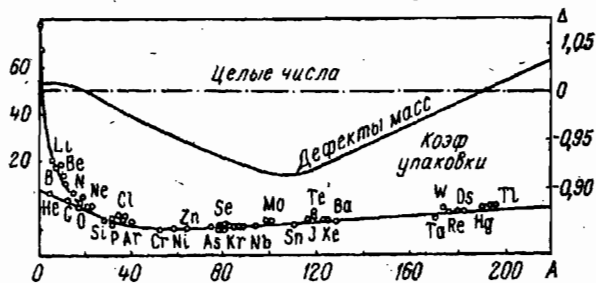


Рис. 513

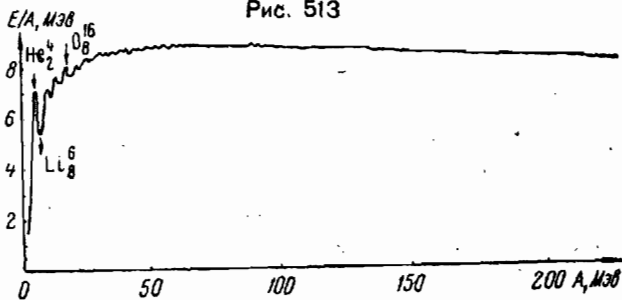


Рис. 514

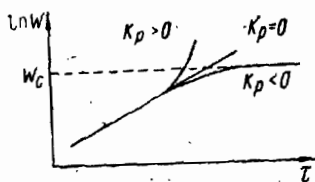


Рис. 515

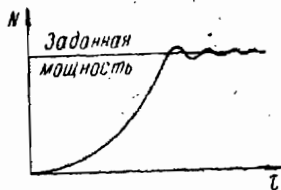


Рис. 516

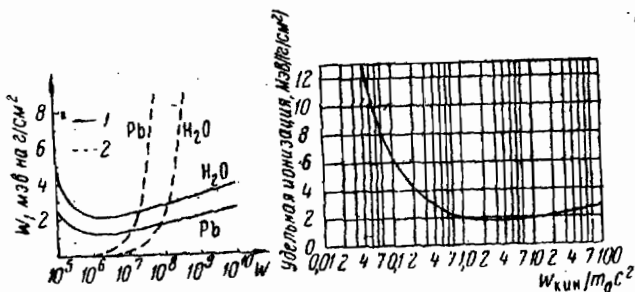


Рис. 517

Рис. 518

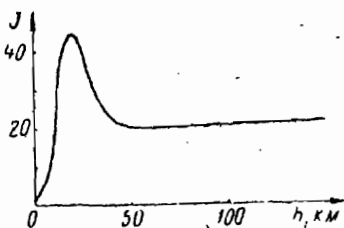


Рис. 519

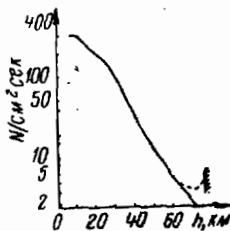


Рис. 520

Рис. 521. Широтный эффект для частиц, проходящих через слой свинца толщиной 10 см:

1, 2 — широта соответственно 50 и 30°, 3 — экватор; N — число частиц.

В средних широтах интенсивность космических лучей у поверхности Земли на 10—15% больше, чем у экватора. На высоте 5 км широтный эффект составляет 30—40%. Число проникающих в земную атмосферу космических частиц в средних широтах в несколько раз больше, чем у экватора. Космическое излучение состоит из заряженных частиц, которые должны испытывать отклоняющее действие в магнитном поле Земли.

Рис. 522. Интенсивность жесткой компоненты (1), мягкой компоненты (2) и суммарная кривая (3) космических лучей для геомагнитной широты 50°:

N — число частиц.

Часть вторичных космических лучей состоит из электронов, позитронов и фотонов, которые почти полностью задерживаются слоем свинца толщиной 10 см. Эту часть называют мягкой компонентой космических лучей; другую, проходящую через указанный фильтр без существенного ослабления, — жесткой компонентой. На уровне моря космические лучи на $\frac{2}{3}$ состоят из жесткой компоненты, но на высоте 14 км, наоборот, интенсивность мягкой компоненты более чем в 3 раза превышает интенсивность жесткой.

Рис. 523. Широтный эффект космических лучей.

Из графика видно, что степень ионизации возрастает с увеличением высоты над уровнем моря.

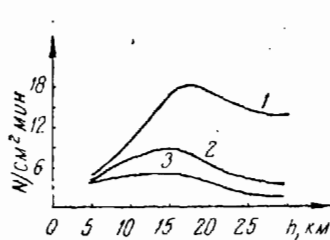


Рис. 521

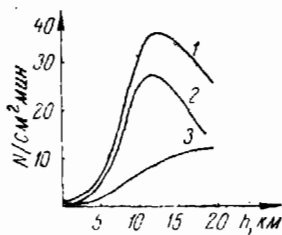


Рис. 522

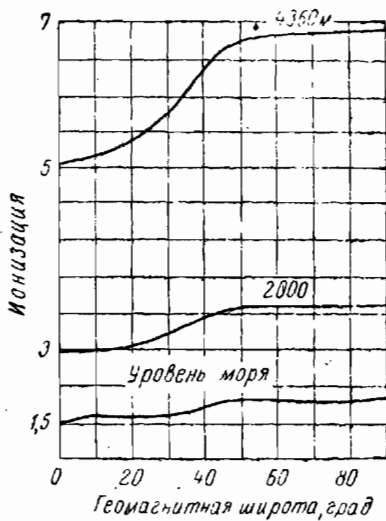


Рис. 523

ЛИТЕРАТУРА

- Архангельский М. М. Курс физики (механика). М., 1961.
- Арцыбышев С. А. Курс физики, ч. 1. М., 1956; ч. 2. М., 1955; ч. 3. М.—Л., 1945.
- Богданов С. В. Сегнетоэлектрики и их применение в технике. М., 1959.
- Вавилов С. И. Собр. соч., т. 1. М., 1954; т. 2. М., 1952.
- Вонсовский С. В. Современное учение о магнетизме. М.—Л., 1952.
- Вул Б. М. Сегнетоэлектричество. М., 1956.
- Геворкян Р. Г., Шепель В. В. Курс общей физики. М., 1959.
- Гольдштейн Л. Д., Зернов Н. В. Электромагнитные поля и волны. М., 1956.
- Гримзель Э. Курс физики. М.—Л., 1930.
- Длужневский Г. И. Постоянный электрический ток. М., 1956.
- Длужневский Г. И. Электростатика. М., 1957.
- Жданов Л. С., Хлебников Н. И. Курс физики, ч. 1. М., 1958; ч. 2. М., 1961.
- Жданов Г. С. Физика твердого тела. М., 1962.
- Зисман Г. А., Тодес О. М. Курс общей физики, т. 1. М., 1958; т. 2. М., 1959; т. 3. М., 1961.

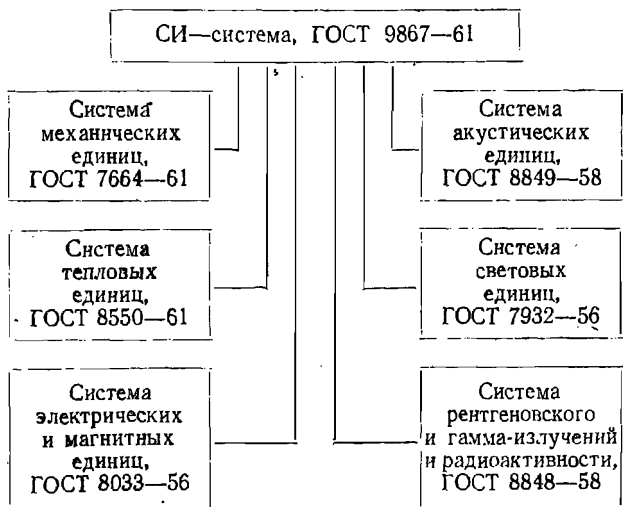
- Иоффе А. Ф. Физика полупроводников. М.—Л., 1957.
- Калашников С. Г. Электричество. М., 1956.
- Капцов Н. А. Электрические явления в газах и вакууме. М.—Л., 1950.
- Карякин Н. И., Быстров К. Н., Киреев П. С. Краткий справочник по физике. М., 1962.
- Кашин Н. В. Курс физики, т. 1. М., 1960; т. 2. М., 1951; т. 3. М., 1956.
- Кельмаи В. М. Электронная оптика. М., 1955.
- Киселев Б. А. Стеклопласты — материал будущего. М., 1961.
- Китайгородский А. И. Введение в физику. М., 1959.
- Клочков В. Н. Учебник физики. М., 1955.
- Королев Ф. А. Курс физики (оптика, атомная и ядерная физика). М., 1962.
- Красильников В. А. Звуковые и ультразвуковые волны. М., 1960.
- Кронеберг П. М. Элементы физики. М., 1950.
- Кудрявцев Б. Б. Курс физики (теплота и молекулярная физика). М., 1960.
- Курс физики. Под редакцией Н. Д. Папалекси, т. 1, 2. М.—Л., 1948.
- Ландсберг Г. С. Оптика. М.—Л., 1960.
- Ливенцев Н. М. Курс физики для медиков. М., 1960.
- Миннарт М. Свет и цвет в природе. М., 1958.
- Михельсон В. А. Физика. М., 1930.
- Млодзеевский А. Б. Краткий учебник молекулярной физики. М.—Л., 1933.
- Полиэтилен низкого давления. Под редакцией Н. М. Егорова. Л., 1960.
- Поль Р. В. Механика, акустика и учение о теплоте. М., 1957.
- Поль Р. В. Учение об электричестве. М., 1962.
- Путилов К. А., Фабрикант В. А. Курс физики, т. 3. М., 1960.
- Путилов К. А. Курс физики, т. 1, 2. М., 1962.
- Резников Л. И. Графический метод в преподавании физики. М., 1960.

- Русинов Л. Техническая оптика. М.—Л., 1961.
- Садиков Б. А. Электромагнетизм. М., 1954.
- Сканави Г. И. Физика диэлектриков. М., 1958.
- Смолеиский Г. А. Сегнетоэлектрики. Л., 1957.
- Соминский М. С. Полупроводники. М., 1961.
- Стрелков С. П. Механика. М., 1956.
- Тамм И. Е. Основы теории электричества. М., 1957.
- Телеснин Р. В., Яковлев В. Ф. Курс физики (электричество). М., 1960.
- Третьяков Н. П. Курс физики. М., 1952.
- Физический энциклопедический словарь, т. 1. М., 1960.
- Фриш С. Э., Тиморева А. В. Курс общей физики, т. 1—3. М.—Л., 1962.
- Чечулин А. А. Электричество и магнетизм. Л., 1947.
- Шифрина В. С., Самосатский Н. Н. Полиэтилен высокого давления. Л., 1958.
- Штрауф Е. А. Молекулярная физика. Л.—М., 1949.
- Штрауф Е. А. Электричество и магнетизм. М.—Л., 1950.
- Элементарный учебник физики. Под редакцией Г. С. Ландсберга, т. 1. М., 1956; т. 2,3. М., 1957.
- Эйхенвальд А. А. Электричество. М.—Л., 1933.
- Яворский В. М., Детлаф А. Л., Милковская Л. Б., Сергеев Г. П. Курс лекций по физике, т. 1. М., 1958; т. 2. М., 1960.
-

ПРИЛОЖЕНИЕ

МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ

Международная система единиц установлена ГОСТ 9867—61 как система, предпочтительная во всех областях науки, техники и народного хозяйства, а также при преподавании. Эта система обозначается символом SI, или в русском написании СИ, по начальным буквам слов The International System of Units. Международная система единиц включает системы единиц, предназначенные для различных областей измерения:



Основные единицы системы СИ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование величины	Единица измерения	Сокращенное обозначение
Длина	метр	<i>м</i>
Масса	килограмм	<i>кг</i>
Время	секунда	<i>сек</i>
Сила электрического тока	ампер	<i>а</i>
Термодинамическая температура	градус Кельвина	$^{\circ}\text{К}$
Сила света	свеча	<i>св</i>

Международная система единиц включает две дополнительные единицы: для плоского угла и телесного угла (табл. 2).

Таблица 2

Наименование величины	Единица измерения	Сокращенное обозначение
Плоский угол	радиан	<i>рад</i>
Телесный угол	стерадиан	<i>стер</i>

В табл. 3 в соответствии с ГОСТ 7663—55 приведено образование кратных и дольных единиц Международной системы.

Таблица 3

Приставка	Числовое значение	Сокращенное обозначение
Пико	10^{-12}	<i>п</i>
Нано	10^{-9}	<i>н</i>
Микро	10^{-6}	<i>мк</i>
Милли	10^{-3}	<i>м</i>
Сантн	10^{-2}	<i>с</i>
Деци	10^{-1}	<i>д</i>
Дека	10^1	<i>да</i>
Гекто	10^2	<i>г</i>
Кило	10^3	<i>к</i>
Мега	10^6	<i>М</i>
Гнга	10^9	<i>Г</i>
Тера	10^{12}	<i>Т</i>

МЕХАНИКА

В табл. 4 в соответствии с ГОСТ 7664—61 даны основные и важнейшие производные единицы для измерения механических величин в системе МКС.

Таблица 4

Наименование величины	Единица измерения	Сокращенное обозначение
Основные единицы		
Длина	метр	<i>м</i>
Масса	килограмм	<i>кг</i>
Время	секунда	<i>сек</i>
Производные единицы		
Площадь	квадратный метр	<i>м²</i>
Объем	кубический метр	<i>м³</i>
Частота	герц	<i>гц</i>
Плотность	килограмм на кубический метр	<i>кг/м³</i>
Скорость	метр в секунду	<i>м/сек</i>
Угловая скорость	радиан в секунду	<i>рад/сек</i>
Ускорение	метр на секунду в квадрате	<i>м/сек²</i>
Угловое ускорение	радиан на секунду в квадрате	<i>рад/сек²</i>
Сила	ньютон	<i>н</i>
Давление	ньютон на квадратный метр	<i>н/м²</i>
Удельный вес	ньютон на кубический метр	<i>н/м³</i>
Динамическая вязкость	ньютон-секунда на квадратный метр	<i>н·сек/м²</i>
Кинематическая вязкость	квадратный метр на секунду	<i>м²/сек</i>
Работа, энергия, количество теплоты	джоуль	<i>дж</i>
Мощность	ватт	<i>вт</i>
Момент инерции	килограмм-метр в квадрате	<i>кг·м²</i>

В табл. 5 даны соотношения между некоторыми механическими единицами системы СИ и допускаемыми ГОСТ 7664—61 единицами других систем и внесистемными единицами.

Таблица 5

Наименование величины	Единица измерения	Сокращенное обозначение	Размер единицы в системе СИ
Длина	сантиметр	<i>см</i>	10^{-2} м
Длина	микрон	<i>мк</i>	10^{-6} м
Длина	ангстрем	А°	10^{-10} м
Масса	грамм	<i>г</i>	10^{-3} кг
Масса	тонна	<i>т</i>	10^3 кг
Масса	центнер	<i>ц</i>	10^2 кг
Масса	карат	—	$2 \cdot 10^{-4}$ кг
Время	час	<i>ч</i>	3600 сек
Время	минута	<i>мин</i>	60 сек
Плоский угол .	градус	$^\circ$	$\pi/180$ рад
Плоский угол .	минута	'	$\frac{\pi}{108} \cdot 10^{-2}$ рад
Плоский угол .	секунда	"	$\frac{\pi}{648} \cdot 10^{-3}$ рад
Площадь . . .	квадратный сантиметр	<i>см²</i>	10^{-4} м ²
Площадь . . .	ар	<i>а</i>	100 м ²

Продолжение

242

ПРИЛОЖЕНИЕ

Наименование величины	Единица измерения	Сокращенное обозначение	Размер единицы в системе СИ
Площадь	гектар	га	10^4 м^2
Объем	кубический сантиметр	см ³	10^{-6} м^3
Объем	литр	л	10^{-3} м^3
Сила	дина	дин	10^{-5} н
Сила	килограмм (сила)	кг	9,81 н
Сила	тонна (сила)	Т	$9,81 \cdot 10^3 \text{ н}$
Давление	дина на квадратный сантиметр	дин/см ²	0,1 н/м ²
Давление	килограмм (сила) на квадратный метр	кг/м ²	9,81 н/м ²
Давление	бар	бар	10^5 н/м^2
Давление	миллиметр ртутного столба	мм рт. ст.	133,3 н/м ²
Давление	миллиметр водяного столба	мм вод. ст.	9,81 н/м ²
Давление	техническая атмосфера	ат или кг/см ²	$0,981 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$

Давление	физическая атмосфера	<i>атм</i>	$1,013 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ (760 мм рт. ст.)
Работа, энергия	эрг	<i>эрг</i>	10^{-7} дж
Работа, энергия	килограмм (сила)-метр	<i>кГм</i>	9,81 дж
Работа, энергия	ватт-час	<i>вт·ч</i>	$3,6 \cdot 10^3 \text{ дж}$
Работа, энергия	электрон-вольт	<i>эв</i>	$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ дж}$
Количество теплоты . .	калория	<i>кал</i>	4,19 дж
Количество теплоты . .	килокалория	<i>ккал</i>	$4,19 \cdot 10^3 \text{ дж}$
Мощность	эрг в секунду	<i>эрг/сек</i>	10^{-7} вт
Мощность	килограмм (сила)-метр в секунду	<i>кГм/сек</i>	9,81 вт
Мощность	лошадиная сила	<i>л. с.</i>	736 вт (75 кГм/сек)

АКУСТИКА

В табл. 6 в соответствии с ГОСТ 8849—58 приведены основные и некоторые производные акустические единицы системы МКС.

Таблица 6

Наименование величины	Единица измерения	Сокращенное обозначение
-----------------------	-------------------	-------------------------

Основные единицы

Длина	метр	<i>м</i>
Масса	килограмм	<i>кг</i>
Время	секунда	<i>сек</i>

Производные единицы

Звуковое давление	ньютон на квадратный метр	<i>н/м²</i>
Объемная скорость	кубический метр в секунду	<i>м³/сек</i>
Интенсивность звука	ватт на квадратный метр	<i>вт/м²</i>
Плотность звуковой энергии	джоуль на кубический метр	<i>дж/м³</i>

В табл. 7 приведены некоторые акустические единицы системы СГС и их размер в системе МКС.

Таблица 7

Наименование величины	Единица измерения	Сокращенное обозначение	Размер единицы в системе МКС
Звуковое давление	дина на квадратный сантиметр	<i>дин/см²</i>	$0,1 \text{ н/м}^2$
Объемная скорость	кубический сантиметр в секунду	<i>см³/сек</i>	$10^{-6} \text{ м}^3/\text{сек}$
Интенсивность звука	эрг в секунду на квадратный сантиметр	<i>эрг/сек·см²</i>	10^{-3} вт/м^2
Плотность звуковой энергии	эрг на кубический сантиметр	<i>эрг/см³</i>	$0,1 \text{ дж/м}^3$

В табл. 8 приведены некоторые внесистемные акустические единицы, допускаемые ГОСТ 8849—58.

Таблица 8

Наименование величины	Единица измерения	Сокращенное обозначение единицы	Определение единицы измерения
Уровень звукового давления	децибел	<i>дб</i>	Уровень звукового давления, двадцать десятичных логарифмов отношения которого к условному порогу давления, равному $2 \cdot 10^{-5} \text{ н/м}^2$, принимаемому за нулевой уровень, равен единице
Уровень громкости	фон	<i>фон</i>	Уровень громкости звука, для которого уровень звукового давления равногромкого с ним звука частоты 10^3 гц равен 1 дб

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕПЛОТА

Составной частью системы СИ является система МКСГ, предназначенная для измерения тепловых величин (ГОСТ 8550—61). В табл. 9 в соответствии с ГОСТ 8550—61 приводятся основные и некоторые производные единицы для измерения тепловых величин в системе МКСГ.

Таблица 9

Наименование величины	Единица измерения	Сокращенные обозначения
Основные единицы		
Длина	метр	<i>м</i>
Масса	килограмм	<i>кг</i>
Время	секунда	<i>сек</i>
Температура	градус	$^{\circ}\text{K}$, <i>град</i> $^{\circ}\text{C}$, <i>град</i>
Важнейшие производные единицы		
Количество теплоты	джоуль	<i>дж</i>
Теплоемкость системы	джоуль на градус	<i>дж/град</i>
Энтропия системы		
Удельная теплоемкость		
Удельная энтропия	грамм-градус	<i>дж/кг·град</i>
Удельная теплота фазового превращения	джоуль на килограмм	<i>дж/кг</i>
Температурный градиент	градус на метр	<i>град/м</i>
Тепловой поток	ватт	<i>вт</i>
Плотность теплового потока	ватт на квадратный метр	<i>вт/м²</i>
Поверхностная плотность излучения		
Теплопроводность	ватт на метр-градус	<i>вт/м·град</i>
Температуропроводность	квадратный метр на секунду	<i>м²/сек</i>

Единицы мольных величины образуются из перечисленных в табл. 9 и 10 удельных единиц путем замены в них грамма грамм-молем (*моль*) и килограмма киломолем (*кмоль*), где за киломоль принимается количество вещества, масса которого в килограммах равна молекулярному весу.

В табл. 10 приведены внесистемные единицы для измерения тепловых величин, допускаемые стандартом.

Таблица 10

Наименование величины	Единица измерения	Сокращенное обозначение	Размер единицы в системе СИ
Количество теплоты	{ калория килокалория	<i>кал</i> <i>ккал</i>	$4,19 \text{ дж}$ $4,19 \cdot 10^3 \text{ дж}$
Теплоемкость системы	{ калория на градус килокалория на градус	<i>кал/град</i> <i>ккал/град</i>	$4,19 \text{ дж/град}$ $4,19 \cdot 10^3 \text{ дж/град}$
Энтропия системы	{ калория на грамм-градус килокалория на килограмм-градус	<i>кал/г-град</i> <i>ккал/кг-град</i>	$4,19 \cdot 10^3 \text{ дж/кг-град}$
Удельная теплоемкость	{ калория на грамм килокалория на килограмм	<i>кал/г</i> <i>ккал/кг</i>	$4,19 \cdot 10^3 \text{ дж/кг}$
Удельная теплота фазового превращения	{ калория на сантиметр-секунду-градус килокалория на метр-час-градус	<i>кал/см-сек-град</i> <i>ккал/м-ч-град</i>	$4,19 \cdot 10^3 \text{ вт/м-град}$ $1,163 \text{ вт/м-град}$
Теплопроводность			

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО. МАГНЕТИЗМ

Составной частью Международной системы единиц (СИ) является система МКСА, предназначенная для измерений электрических и магнитных величин (ГОСТ 8033—56).

Основными единицами этой системы являются метр (*м*), килограмм (*кг*), секунда (*сек*) и ампер (*а*). Производные единицы системы МКСА образуются на основании законов, устанавливающих связь между физическими величинами (табл. II).

Таблица II

Наименование величины	Единица измерения	Сокращенное обозначение
-----------------------	-------------------	-------------------------

Основные единицы

Длина	метр	<i>м</i>
Масса	килограмм	<i>кг</i>
Время	секунда	<i>сек</i>
Сила электрического тока	ампер	<i>а</i>

Производные единицы

Работа и энергия . .	джоуль	<i>дж</i>
Мощность	ватт	<i>вт</i>
Количество электри- чества	кулон	$к = а \cdot сек$
Разность потенциалов и электродвижущая сила	вольт	$в = вт/а$
Напряженность элект- рического поля . .	вольт на метр	$в/м$

Продолжение

Наименование величины	Единица измерения	Сокращенное обозначение
Электрическая емкость	фарада	$\phi = \kappa/\nu$
Электрическая индукция (электрическое смещение)	кулон на квадратный метр	$\kappa/\text{м}^2$
Электрическое сопротивление	ом	$\text{ом} = \nu/a$
Поток магнитной индукции	вебер	$\text{вб} = \nu \cdot \text{сек}$
Магнитная индукция	тесла (вебер на квадратный метр)	$\text{тл} = \nu \cdot \text{сек}/\text{м}^2$ ($\text{вб}/\text{м}^2$)
Индуктивность	генри	$\text{гн} = \nu \cdot \text{сек}/a$
Напряженность магнитного поля	ампер на метр	$a/\text{м}$

Кроме системы МКСА, ГОСТ 8033—56 допускает для электрических и магнитных измерений также применение системы СГС (системы Гаусса).

Так как в системе СГС большинство единиц не имеет наименований, то единицу какой-либо физической величины мы будем обозначать символом этой системы с соответствующим индексом. Например, единицу силы тока — символом СГС_I, единицу емкости — СГС_C и т. д.

В табл. 12 даны соотношения между единицами системы СГС для нерационализованной формы уравнений и единицами системы МКСА для рационализованной формы уравнений электромагнитного поля.

Таблица 12

Наименование величины	Наименование единицы измерения в системе СГС	Сокращенное обозначение	Размер единицы в системе МКСА
Сила тока	—	—	$1 \text{ СГС}_I = 10 \frac{a}{c}$
Количество электричества	—	—	$1 \text{ СГС}_q = 10 \text{ Кл}$
Поток электрического смещения (поток электрической индукции)	—	—	$1 \text{ СГС}_{ND} = 10 \text{ Кл/4}\pi\text{с}$
Электрическая индукция (электрическое смещение)	—	—	$1 \text{ СГС}_D = \frac{10^5}{4\pi c} \text{ Кл/м}^2$
Разность потенциалов	—	—	$1 \text{ СГС}_U = c \cdot 10^{-8} \text{ в}$
Напряженность электрического поля	—	—	$1 \text{ СГС}_E = c \cdot 10^{-6} \text{ в/м}$
Электрическое сопротивление	—	—	$1 \text{ СГС}_R = c^2 \cdot 10^{-9} \text{ ом}$

Электрическая емкость	—	—	$1 \text{ СГС}_C = \frac{1}{c^2} \cdot 10^9 \text{ ф}$
Магнитный поток	максвелл	мкс	$1 \text{ мкс} = 10^{-8} \text{ вб}$
Магнитная индукция	гаусс	гс	$1 \text{ гс} = 10^{-4} \text{ тл}$
Индуктивность	—	—	$1 \text{ СГС}_L = c^2 \cdot 10^{-9} \text{ гн}$
Напряженность магнитного поля . . .	эрстед	э	$1 \text{ э} = \frac{1}{4\pi} \cdot 10^3 \text{ а/м}$

Примечание. В соотношениях между единицами СГС и единицами МКСА c — численное значение скорости света в пустоте, выраженное в сантиметрах в секунду.

ОПТИКА

В табл. 13 в соответствии с ГОСТ 7932—56 приведены основные и некоторые производные единицы, предназначенные для световых измерений в системе СИ.

Таблица 13

Наименование величины	Единица измерения	Сокращенное обозначение
-----------------------	-------------------	-------------------------

Основные единицы

Длина	метр	<i>м</i>
Время	секунда	<i>сек</i>
Сила света	свеча	<i>св</i>

Производные единицы

Световой поток . . .	люмен	<i>лм</i>
Светность (светимость)	люмен на квадратный метр	<i>лм/м²</i>
Яркость	нит (свеча на квадратный метр)	<i>нт (св/м²)</i>
Световая энергия . .	люмен-секунда	<i>лм·сек</i>
Освещенность	люкс	<i>лк</i>
Количество освещения	люкс-секунда	<i>лк·сек</i>

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

В табл. 14 в соответствии с ГОСТ 8848—58 приведены основные и наиболее часто применяемые производные единицы для измерений в области рентгеновского и гамма-излучений и радиоактивности.

Таблица 14

Наименование величины	Единица измерения	Сокращенное обозначение
-----------------------	-------------------	-------------------------

Основные единицы

Длина	метр	<i>м</i>
Масса	килограмм	<i>кг</i>
Время	секунда	<i>сек</i>
Сила тока	ампер	<i>а</i>

Производные единицы

Доза рентгеновского и гамма-излучений .	рентген	<i>р</i>
Мощность дозы . . .	рентген в секунду	<i>р/сек</i>
Поглощенная доза излучения	рад	<i>рад</i>
Активность радиоактивного изотопа . .	кюри	<i>кюри</i>
Радиевый гамма-эквивалент препарата	миллиграмм-эквивалент радия	<i>мг-экв радия</i>
Интенсивность излучения	ватт на квадратный метр	<i>вт/м²</i>

Примечания:

1. Доза рентгеновского или гамма-излучений является мерой излучения, основанной на его ионизирующей способности.

2. Применение рентгена в качестве единицы дозы допускается для измерения излучений с энергией квантов до 3 Мэв.

3. Под поглощенной дозой излучения понимается энергия ионизирующего излучения, поглощенная единицей массы облучаемого вещества.

В табл. 15 даются определения единицы рентгеновского и гамма-излучений и радиоактивности.

Таблица 15

Единица измерения	Определение единицы
Рентген	Доза рентгеновского и гамма-излучений в воздухе, при которой сопряженная корпускулярная эмиссия на $1,293 \cdot 10^{-6}$ кг воздуха производит в воздухе ионы, несущие заряд, равный $1 \text{ СГС}_q = 1,3 \cdot 10^9$ к каждого знака
Рад	Поглощенная доза излучения, равная $0,01 \text{ Дж}$ на килограмм облученного вещества
Кюри	Активность препарата данного изотопа, в котором в одну секунду происходит $3,7 \cdot 10^{10}$ актов распада
Миллиграмм-эквивалент радия	Гамма-эквивалент радиоактивного препарата, гамма-излучение которого при данной фильтрации при тождественных условиях измерения создает такую же мощность дозы, что и гамма-излучение одного миллиграмма радия государственного эталона радия СССР при платиновом фильтре толщиной $0,5 \text{ мм}$

Примечание. Число $1,293 \cdot 10^{-6}$ представляет значение массы в килограммах $1 \text{ см}^3 = 10^{-6} \text{ м}^3$ атмосферного воздуха при температуре 0°С и давлении $760 \text{ мм рт. ст.} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

(ссылки сделаны на номер рисунка)

- Аберрация 415
Автоколебания 94, 95
Адаптация 424
Адсорбция 269
Альфа-частицы (α -частицы) 496—499, 501
Аккумулятор свинцовый 345
— щелочной 346
Антенна 406
Антисегнетоэлектрики 293, 296
Антиферромагнетики 368
Артикуляция 134
Атомный реактор 515, 516
Аэродинамическая труба 59
Бета-частицы (β -частицы) 502
Бизения 80
Варистор 337
Взаимодействие молекул 243, 244
Винт 68
Волны 96—98, 104, 124, 125, 400—402
Выпрямитель 332—334, 395
Вязкость 205, 215—217, 219, 220
Газ идеальный 172—177
Газотрон 393, 395
Гамма-лучи (γ -лучи) 507—510
Гармоника 119
Гистерезис 294—296, 369—371, 373
Глаз 422—428
Годограф 9—13
Громкость 127—129, 131—133, 135

- Давление 132, 183, 184, 195—199
 Движение 2—5, 7, 65, 71—74, 140
 Дефект массы 513
 Деформация 38—40
 Диаграмма 64, 247—251, 260—265
 Диамантики 360
 Дисперсия света 416—421
 Дифракционная решетка 106, 431, 432
 Дифракция света 429—432
 Диффузия 268
 Диэлектрическая проницаемость 279—286, 289—293
 Длина свободного пробега 181, 182
 Закон Авогадро 318
 — Бойля — Марриотта 167—169
 — Бугера 455
 — Вавилова 462
 — Гей-Люссака 170
 — Гука 40
 — Ньютона второй 19
 — Ома 297, 342
 — Стокса 460, 461
 — Шарля 171
 — Эйнштейна 469
 Звук 99—103, 115, 116, 124
 Звуковой импульс 112, 113
 Излучение радиоактивное 493, 494
 — рентгеновское 485, 486
 — света 442—447, 450—452, 454
 Изопроецессы 166
 Изотермы 191, 192
 Индукция 362, 364—366, 374—378
 Интерференция 97, 433—436
 Каустика 107
 Колебательный контур 383
 Колебания 75, 76, 383—386, 397—399, 403
 Космические лучи 517—523
 Коэффициент отражения 407—410
 — подъемной силы 63
 — полезного действия 301, 395, 448, 449
 — температурный сопротивления 309
 — термоэлектродвижущей силы 317, 331
 Кристаллизация 254, 258
 Кристаллическая решетка 233—242
 Кюри точка 293, 294, 296
 Лампы электронные 387—392
 Линза 412

- Лобовое сопротивление 60, 61, 63, 64
 Люминесценция 458—468
 Магнитная восприимчивость 368
 — проницаемость 362, 363
 Маятник 11, 74
 Мощность 27
 Наклеп 41
 Намагниченность 360, 361
 Напряженность поля 20, 358, 367
 Натяжение поверхностное 208—214
 Обертон 118, 119
 Отражение света 407—410
 Парамагнетики 360
 Плавление 245—253
 Плотность пара и жидкости 200—202
 Поглощение света 456, 457
 Показатель преломления 416—419
 Полиэтилен 43, 44, 48, 49
 Полупроводники 327
 Поляризация 278, 287, 288, 437—441
 Поляризационные устройства 438—441
 Порог болевой 126
 — слышимости 126
 Потенциальная яма 487—489
 Преломление света 411—414
 Проводники 277
 Призма 413, 414, 421
 Проницаемость 50
 Путь 6, 8
 Работа 25, 26
 Разряд газовый 347—357
 Распределение молекул 185—190
 Растворы 222—228
 Расширение тел 141—148
 Реверберация 137—139
 Сверхпроводимость 312—315
 Свободное падение 8
 Сдвиг фаз 379—382
 Сегнетоэлектрики 287—292, 294
 Сейсмограмма 125
 Сжимаемость 206, 229, 259
 Скорость 6, 8, 150
 Соны 133
 Сопротивление 304, 305, 307—315, 322—324, 328—330
 Спектр 90—93, 117—123, 135
 Стеклопласты 46, 47
 Стеклотекстолит 45, 52—54
 Температура среднесуточная 151

- Теорема Остроградского—
Гаусса 274—276
— Фурье 82, 93
Теплоемкость 152—165
Теплопроводность 207, 230
Теплота 203, 204, 231, 232
Термосопротивление 335
Термоэлектричество 316—
319
Термоэлектродвижущая
сила 316, 318, 319
Тиратрон 394, 396
Ток 303, 320, 321, 327
342, 349
Трение 36, 37
Удар тел 31—33
Ферриты 373
Ферромагнетики 361—367
Фигуры Лиссажу 88, 89
Фоны 133
Форманта 118, 121
Фотосопротивление 341
481—484
Фотоэлементы 338—340,
473—480
Фотоэффект 469—472
Фугоида 24
Центростремительная сила
21, 22
Цикл 270—273
Циклоида 14
Число Рейнольдса 65—67
— центров кристаллиза-
ции 258
Чувствительность гальва-
нометров 299
Электропроводность 306,
325, 326, 343, 344
Энергия 28—30, 178—180,
514
Эпицентр 13, 125

*Михаил Семенович Цедрик,
Евгения Васильевна Бирич,
Галина Павловна Макеева,
Инесса Федоровна Савицкая*

Ф И З И К А В Г Р А Ф И К А Х

Редакторы *Вережкина Н. М., Молчанова А. К.*
Худож. редактор *Кононов А. А.*
Техн. редактор *Моргунова Г. М., Кислякова М. Н.*
Корректоры *Макацевич Ж. И., Сушко К. В.*

АТ 05151. Сдано в набор 2/IX 1963 г. Подписано
к печати 20/II 1964 г. Формат 70 × 90^{1/32}.
Печ. л. 8,125(9,50625). Уч.-изд. л. 9,4.
Тираж 15 000 экз. Изд. № 851. Заказ 490.
Цена 57 коп.

Издательство «Высшая школа»
Государственного комитета Совета Министров БССР
по печати
Типография издательства «Звезда»
Минск, Ленинский проспект, 79