

P182656

И. И. СОКОЛОВ

КУРС ФИЗИКИ

часть 2

**УЧЕБНИК
ДЛЯ 9 КЛАССА
СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ**

Цена 2 р. 40 к.

УЧПЕДГИЗ . 1945

Проф. И. И. СОКОЛОВ

КУРС ФИЗИКИ

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

БОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ. ТЕПЛОТА

**УЧЕБНИК
ДЛЯ 9-го КЛАССА СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ**

ИЗДАНИЕ 6

Утверждено Наркомпросом РСФСР

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ
УЧЕБНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
НАРКОМПРОСА РСФСР**

МОСКВА ★ 1945

СОДЕРЖАНИЕ.

I. Колебания и волны.

1. Гармоническое колебание	5	20. Звук	24
2. Величины, определяющие колебание	7	21. Тон. Громкость и высота тона. Сигна	25
3. Связь колебательного движения с вращательным	—	22. Отражение и преломление звуковых волн	27
4. График расстояния в гармоническом колебании	9	23. Интерференция звуковых волн	28
5. <i>Лабораторная работа 1.</i> Исследование законов колебания маятника	10	24. Биения	—
6. Законы колебания маятника	—	25. Собственный тон тела	—
7. Физический маятник	11	26. Основной тон тела	29
8. Применение маятника в часах	—	27. Высшие гармонические тоны	30
9. Применение маятника к измерению ускорения свободного падения	12	28. Тезис	30
<i>Упражнение 1.</i>	12	29. Звуковой резонанс	—
10. Колебание упругих тел	—	30. <i>Лабораторная работа 2.</i> Измерение скорости звука в разных веществах	31
11. Распространение колебаний в упругом теле	13	31. <i>Лабораторная работа 3.</i> Определение длины звуковой волны по способу резонанса	32
12. Поперечное колебание	14	32. Граммофон	33
13. Продольное колебание	15	33. Ультразвук	—
14. Длина волны	16	34. Борьба с шумами	34
15. Отражение и преломление волн	17	35. Использование звуковых явлений в военной технике	—
16. Интерференция волн	18	<i>Упражнение 2.</i>	37
17. Стоячая волна	19	Вопросы	38
18. Резонанс	21		
19. Явление резонанса и техника	22		
Вопросы	23		

II. Теплота и молекулярная физика.

1. Теплота — энергия.

36. Развитие учения о теплоте	38
37. Единица количества теплоты	40
38. Удельная теплоемкость вещества	—
39. Формула количества теплоты при нагревании и остывании	—
40. Уравнение теплового баланса	41
<i>Упражнение 3.</i>	44
41. Теплота и работа	—
42. Механический эквивалент теплоты	46
43. Определение механического эквивалента теплоты Джоулем	47
44. Распространение закона превращения и сохранения энергии на тепловые явления	48
45. <i>Лабораторная работа 4.</i> Определение удельной теплоемкости вещества	51
46. <i>Лабораторная работа 5.</i> Определение температуры сильно нагретого тела калориметрическим способом	52
47. Источники теплоты	—
48. Теплотоворная способность топлива и пищи	56

<i>Упражнение 4.</i>	57
Вопросы	59

2. Расширение тел от нагревания.

49. Линейное и объемное расширение тел	—
50. <i>Лабораторная работа 6.</i> Измерение коэффициента линейного расширения твердого тела	60
51. Формула коэффициента линейного расширения твердых тел	61
52. Формула длины тела при любой температуре	62
53. Формула коэффициента объемного расширения тел	63
54. Формула объема тела при любой температуре	64
55. Изменение плотности тела с изменением температуры	—
56. Использование в технике теплового расширения	65
<i>Упражнение 5.</i>	67
Вопросы	68

III. Молекулярные явления в газах, жидкостях и твердых телах.

1. Основы молекулярно-кинетической теории.

57. Молекула	68
58. Молекулы тела разделены промежутками	70
59. Сцепление	72
60. Диффузия	74
61. Броуновское молекулярное движение	75
62. Кинетическая теория	—
63. Объяснение теплового состояния по молекулярно-кинетической теории	77
Вопросы	77

2. Свойства газов.

64. Развитие учения о газах	—
65. Лабораторная работа 7. Вывод соотношения между объемом и давлением одной и той же массы газа при постоянной температуре (закон Бойля-Мариотта)	78
66. Закон Бойля-Мариотта	80
67. График зависимости объема и давления	82
68. Зависимость плотности газа от давления	—
68а. Решение задач на основании закона Бойля-Мариотта	83
69. Закон Гей-Люссака	—
70. Лабораторная работа 8. Измерение коэффициента объемного расширения воздуха (при постоянном давлении)	85
71. Термический коэффициент давления газа	86
72. Идеальный газ	87
73. Газовый термометр	—
74. Абсолютная температура	88
Упражнение 6	89
75. Формула газового состояния	91
Уточнение 7	—
76. Молекулярно-кинетическая теория газа	—
77. Грамм-молекула газа и число молекул в ней	94
78. Технические применения свойств газов	—

Вопросы	96
-------------------	----

3. Свойства жидкостей

79. Форма поверхности жидкости под действием внешней силы	—
80. Поверхностный слой жидкости	97
81. Сжимаемость жидкостей	99
82. Потенциальная энергия поверхностного слоя. Поверхностное натяжение	99
83. Опыты, обнаруживающие свойства поверхностного слоя	101
84. Смачивание	103
85. Мениск	104
86. Зависимость поверхностного давления от формы мениска	105
87. Капиллярность	106
88. Лабораторная работа 9. Определение величины поверхностного натяжения	108
89. Кинетическая теория жидкости	—
Упражнения 8	109
Вопросы	—

4. Свойства твердого тела.

90. Кристаллическое состояние	110
91. Аморфное состояние	111
92. Пространственная решетка кристалла	112
93. Деформации	114
94. Зависимость величины деформации от деформирующей силы	117
95. Вязкость, хрупкость, пластичность	119
96. Допускаемое напряжение	—
97. Закон Гука	120
98. Лабораторная работа 10. Исследование зависимости между величиной деформации и деформирующей силой	121
99. Превращение энергии при деформациях	122
100. Кинетическая теория твердого тела	—
Упражнение 9	123
Вопросы	124

IV. Изменение агрегатного состояния вещества.

1. Плавление и отвердевание.

101. Температура плавления и отвердевания	124
102. Теплота плавления	126
103. Уравнение теплового баланса при плавлении или отвердевании	127
104. Изменение объема тела при плавлении и отвердевании	—
105. Влияние давления на точку плавления	128
106. Лабораторная работа 11. Определение удельной теплоты плавления льда	129
Упражнение 10	130
Вопросы	131

2. Парообразование.

107. Парообразование	—
--------------------------------	---

108. Испарение	—
109. Объяснение испарения по молекулярно-кинетической теории	132
110. Теплота испарения	133
111. Зависимость между объемом и давлением пара при постоянной температуре	134
112. Зависимость давления насыщенных паров от температуры	135
113. Закон Дальтона	138
114. Кипение	139
115. Уравнение теплового баланса при парообразовании и конденсации	140
116. Лабораторная работа 12. Определение при помощи калориметра удельной теплоты парообразования воды	141

117. Способы обращения ненасыщающих паров в насыщающие	142
118. Критическая температура	143
119. Сжижение газов	—
120. Способы получения низких температур	144
121. Применение сжиженных газов	146
Упражнение 11.	147
Вопросы.	—

2. Влажность воздуха.	
122. Влажность воздуха	148
123. Точка росы	150
124. Гигрометр	—
125. Психрометр	151
126. Волосной гигрометр	152
Упражнение 12.	—
Вопросы	153

V. Работа газа и пара.

127. Работа газа при постоянном давлении	153
128. График работы расширения газа	154
128а. Работа газа при переменном давлении	155
129. Паровые двигатели	155
130. Топка	156
131. Котёл	158
132. Паровые машины до Уатта и машины Уатта	160
133. Золотник	161
134. Усовершенствования паровой машины Уатта	163

135. Индикаторная диаграмма паровой машины	165
136. Коэффициент полезного действия паровой машины	167
137. Паровые турбины	168
138. Двигатели внутреннего сгорания	169
139. Применение двигателей внутреннего сгорания	170
Упражнение 13	173
Вопросы.	174
Приложения	175

1. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ.

1. Гармоническое колебание. Наравне с изученными раньше видами движения часто встречается колебательное движение,

Тело совершает колебания, если оно движется по прямой или по дуге то в ту, то в другую сторону от начального положения, в котором тело находилось до начала колебания.

Оттянутая вниз спиральная пружина, закреплённая на верхнем конце, будучи отпущена, совершает колебательное движение. Все экипажи, имеющие рессоры, приходят в колебательное движение от толчков на неровностях дороги. Колеблется ветка, с которой слетела птица. Колеблются деревья, фабричные трубы, вода озёр и морей под действием ветра. В колебательном состоянии находятся все звучащие тела. Совершает колебания поршень работающей паровой машины. Приведённые примеры, далеко не исчерпывающие всех возможных видов колебания, свидетельствуют о распространённости этого вида движения в природе и технике.

Величины, характеризующие это движение, могут быть изучены проще всего на примере колебания математического маятника.

Математическим маятником называется подвешенное на нерастяжимой нити тело, обладающее конечной массой, но размерами которого можно пренебрегать (так называемая „материальная точка“). Осуществить

математический маятник можно в достаточной мере точно, если подвесить на длинной тонкой нити маленький шарик.

Пока маятник и точка подвеса лежат на одной вертикали, маятник находится в покое. Выведенный из положения равновесия по дуге CA в точку A на высоту h по вертикали над прежним уровнем (рис. 1), маятник обладает в этой точке добавочной

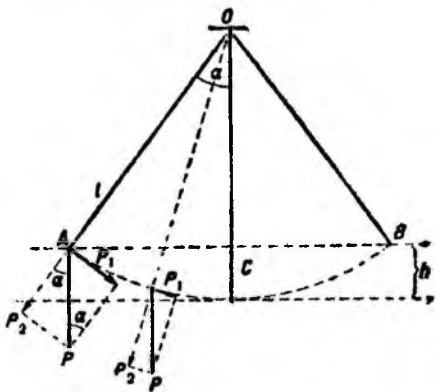


Рис. 1. Математический маятник.

потенциальной энергией $Ph = mgh$, где m — масса маятника. В этой точке вес маятника P уже не будет уравниваться сопротивлением точки опоры; последнее уравновесит только одну слагающую веса P_2 , направленную вдоль нити, другая же слагающая P_1 , направленная по касательной в сторону равновесия, будет движущей силой и приведёт маятник в движение, как только он будет предоставлен самому себе.

Если угол отклонения маятника AOC обозначить через α [в радианах¹⁾], то $\angle P_2AP = \angle APP_1 = \alpha$ и движущая сила $P_1 = P \sin \alpha = mg \sin \alpha$.

Всякая сила по второму закону механики выражается через произведение массы на ускорение. В выражении для P_1 масса обозначена буквой m , следовательно, величина $g_1 = g \sin \alpha$ выражает ускорение колебательного движения маятника. Так как при малых углах $\sin \alpha$ с ничтожной погрешностью может быть заменён через α , а угол α в радианах равен длине дуги $CA = x$, делённой на радиус l , то $\alpha = \frac{x}{l}$.

Когда отклонение маятника происходит вправо от положения равновесия, вектор ускорения направлен влево; когда же маятник отклоняется влево, вектор ускорения направлен вправо. Смещение точки от положения равновесия и ускорение в колебательном движении всегда направлены в противоположные стороны; поэтому они имеют противоположные знаки. Принимая во внимание знаки, следует написать предыдущие равенства так:

$$P_1 = mg_1, \text{ где } g_1 = -\frac{g}{l} \cdot x. \quad (1)$$

При колебании маятника, в случае достаточно малых размахов качаний, ускорение прямо пропорционально отклонению от положения равновесия и имеет противоположное с этим отклонением направление.

На пути от A до C ускорение непрерывно убывает, но постоянно направлено в сторону скорости, почему скорость возрастает, и в положении равновесия C , где ускорение обращается в нуль, скорость достигает наибольшей величины, вычисляемой по формуле кинетической энергии $\frac{mv^2}{2} = mgh$, или $v^2 = 2gh$. На пути от C до B ускорение по абсолютной величине увеличивается, будучи постоянно направлено по касательной в сторону равновесия, т. е. против скорости; движение будет замедленным, и скорость обратится в нуль, когда вся кинетическая энергия маятника превратится в потенциальную энергию подъёма на вы-

¹⁾ Радиан — центральный угол, дуга которого равна радиусу.

соту h_1 . При отсутствии затраты энергии на преодоление каких-либо сопротивлений $mgh_1 = \frac{mv^2}{2}$. Из сравнения двух последних формул следует, что высота подъёма слева равна высоте подъёма справа ($h_1 = h$) и, следовательно, $BC = CA$. Начиная от точки B , все явления снова повторяются в том же порядке.

Движение, в котором ускорение прямо пропорционально отклонению материальной точки от положения равновесия и всегда направлено в сторону равновесия, называется простым гармоническим колебанием.

Движение математического маятника под действием одной только силы тяжести (силы сопротивления отсутствуют) является простым гармоническим колебанием.

2. Величины, определяющие колебание. Наибольшее отклонение от положения равновесия AC называется амплитудой колебания.

Время, в течение которого маятник проходит туда и обратно дугу AB , или, другими словами, время прохождения пути, равного четырём амплитудам, называется периодом полного колебания (T). Половина периода полного колебания называется периодом простого колебания ($T_1 = \frac{1}{2} T$).

Вместо периода T колебание можно определять числом колебаний в секунду $\nu = \frac{1}{T}$; $T = \frac{1}{\nu}$.

В самом деле, если, например, число колебаний в секунду равно 10, то период одного колебания равен $\frac{1}{10}$. Если период равен $\frac{1}{2}$ секунды, то в секунду совершаются два колебания.

Как видно из предыдущего, при отсутствии сопротивления амплитуды по обе стороны от положения равновесия равны; колебания с постоянной амплитудой называются незатухающими; колебания с непрерывно уменьшающейся амплитудой называются затухающими.

3. Связь колебательного движения с вращательным. Если на ось вращательной машины насадить диск, на краю диска укрепить вертикально стержень, оканчивающийся шариком, и осветить всю установку пучком горизонтальных и параллельных лучей, то на экране, помещённом перпендикулярно к лучам, обрисовывается тень шарика. Когда шарик будет приведён в равномерное движение по окружности, то его тень будет совершать движение по прямой в одну и другую сторону (рис. 2).

Перед тем же экраном помещают маятник на очень длинном подвесе так, что бы его тень падала на ту же линию, по которой перемещается тень вращающегося шарика. Маятник приводят

в колебание в плоскости, параллельной экрану. Тогда оказывается возможным подобрать такую скорость вращения шарика, что движение его тени на экране будет во всех точках совпадать с тенью колеблющегося маятника.

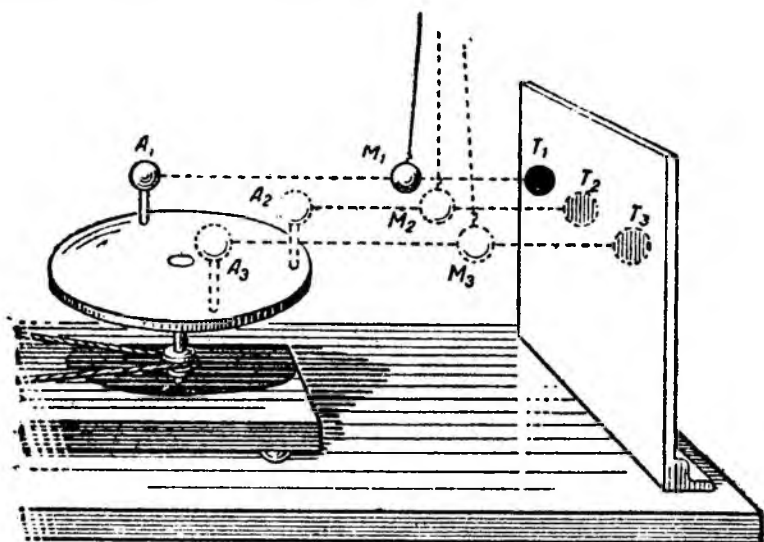


Рис. 2. A_1, A_2, A_3 — положения шарика, равномерно вращающегося по окружности; M_1, M_2, M_3 — положения колеблющегося маятника; T_1, T_2, T_3 — совпадающие тени шарика и маятника.

Описанное совпадение может быть получено только при малых амплитудах колебания маятника.

Это совпадение показывает, что колебательное движение точки вдоль прямой AB (рис. 3) может быть рассматриваемо, как движение проекции на эту прямую точки M , равномерно движущейся по окружности. Будем называть эту точку, равномерно движущуюся

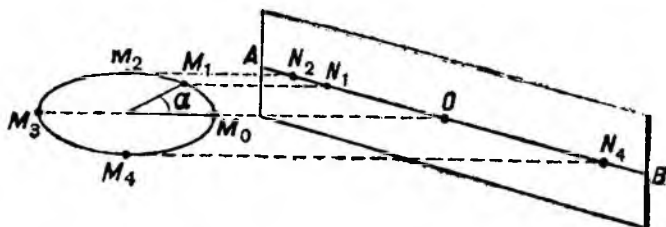


Рис. 3. Угол α , составляемый подвижным радиусом с начальным радиусом, называется фазой колебания.

по окружности, вспомогательной точкой, линию же, соединяющую вспомогательную точку с центром окружности, — подвижным радиусом.

Когда вспомогательная точка занимает на окружности начальное положение M_0 , её проекция попадает в середину O отрезка, вдоль которого происходит колебание. Когда вспомогательная точка переместится в M_1 и подвижной радиус повернётся на угол α , её проекция получится в N_1 . Через четверть периода вспомогательная точка отойдёт от начального положения на угол в 90° , и колеблющаяся точка переместится в N_2 . Через половину периода вспомогательная точка отойдёт от положения равновесия на угол в 180° , займёт положение M_3 , а колеблющаяся точка пройдёт через середину отрезка O . Через три четверти

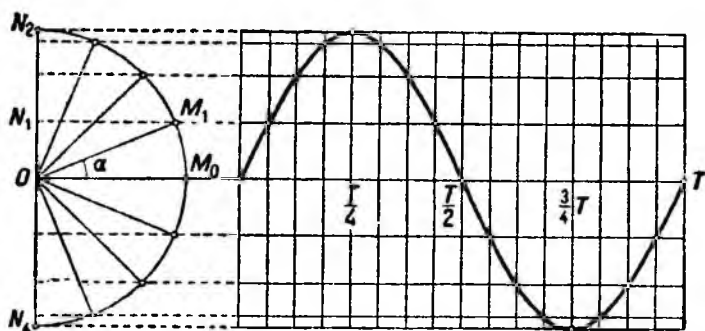


Рис. 4. График гармонического колебания и его построение.

периода или при отклонении на угол в 270° , вспомогательная точка займёт положение M_4 , а колеблющаяся — положение N_4 ; через целый период обе точки займут начальное положение.

Угол поворота подвижного радиуса, отсчитываемый от начального радиуса, называется фазой колебания.

Следовательно, на рисунке 3 в начальный момент в точке O фаза равна нулю; в точке N_2 фаза равна $\frac{\pi}{2}$ (90°), в точке O при обратном прохождении через неё от N_2 к N_4 фаза равна π (180°); в точке N_4 она равна $\frac{3}{2}\pi$ (270°) и, наконец, в точке O она станет 2π . На расстоянии от O до N_2 фаза изменяется от 0 до $\frac{\pi}{2}$; от N_2 до N_4 — изменяется от $\frac{\pi}{2}$ до $\frac{3}{2}\pi$, от N_4 до точки O — от $\frac{3}{2}\pi$ до 2π и т. д.

4. График расстояния в гармоническом колебании. Если на оси абсцисс откладывать равные отрезки, соответствующие

равным частям периода, и в каждой точке абсциссы восставлять ординаты, изображающие в каком-либо масштабе отклонения колеблющейся точки от положения равновесия, то концы всех ординат будут лежать на линии, называемой синусоидой (рис. 4). Синусоида представляет собой графическое изображение изменения расстояния колеблющейся точки от положения равновесия в зависимости от времени.

Б. Лабораторная работа I. Исследование законов колебания маятника. Приборы: 1) подставка с вбитыми в неё двумя гвоздями; 2) просверленные по диаметру шарики разной массы — железный, деревянный, пробковый и др.; 3) нитки; 4) деревянные клинышки для зажимания нитки в отверстии шарика; 5) часы; 6) масштаб.

I. Исследовать, зависит ли период колебания от амплитуды колебания.

Ход работы. 1. Привяжите один конец нити к одному гвоздю подставки и перекиньте её через соседний гвоздь; укрепите на нити при помощи клинышка шарик.

2. Отклонив шарик на какой-нибудь угол (небольшой, до 10°), пустите шар; заметьте по часам время (в секундах) 100 простых колебаний и вычислите период колебания.

3. Отклонив на новый, меньший, угол, сделайте новое определение периода и сравните оба числа. Какой можно сделать вывод из этого опыта?

II. Исследовать, зависит ли период колебания от массы колеблющегося маятника.

Ход работы. 1. Насаживайте на нить одной и той же длины шарики различных масс, отклоняйте их на малые углы и определяйте для каждого период колебания.

2. Сравнив результаты, сделайте вывод из опыта.

III. Найти зависимость между периодом колебания и длиной маятника.

Ход работы. 1. Возьмите маятники с длинами l (например 1 м) и l_1 (например $\frac{1}{4}$ м или $\frac{1}{9}$ м, или $\frac{1}{2}$ м) и определите для них периоды колебания t и t_1 .

2. Сравните $\frac{t}{l}$ и $\frac{t^2}{l^2}$. Какой вывод можно сделать из этого сравнения?

6. Законы колебания маятника. Из опытов можно сделать следующие выводы.

1. Период колебания маятника при малых амплитудах не зависит от амплитуды (это свойство называется изохронностью — равновременностью колебания).

2. Период колебания не зависит от массы маятника.

3. *Период колебания прямо пропорционален корню квадратному из длины маятника.*

4. *Период колебания обратно пропорционален корню квадратному из ускорения силы тяжести¹⁾.*

Следовательно, маятник вчетверо более длинный имеет период вдвое больший; маятник в 9 раз более короткий имеет период втрое меньший.

Теория даёт следующие формулы для периода простого и полного колебаний:

$$\boxed{T_1 = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}; \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.} \quad (\text{II})$$

Изохронность колебания маятника открыта Галилеем в 1583 г.

7. **Физический маятник.** Физическим маятником называется любое тело, колеблющееся вокруг оси, не проходящей через его центр тяжести. Отдельные частицы этого маятника, находящиеся на различных расстояниях от оси, могут быть рассматриваемы как математические маятники разной длины (рис. 5). Частицы, ближайšie к оси, должны были бы иметь меньший период колебания, частицы более отдалённые — больший. Так как физический маятник колеблется как одно целое, то его период лежит между наименьшим и наибольшим периодами его отдельных точек. Для всякого физического маятника всегда можно подобрать такой математический, который будет иметь одинаковый с ним период. *Длина математического маятника, имеющего одинаковый период с физическим, называется приведённой длиной физического маятника.* Формулы для периода колебания математического маятника применимы и для физического, если в них вставить приведённую длину физического маятника. Обыкновенно маятнику придаюг форму стержня с насаженной на него массивной чечевицей.

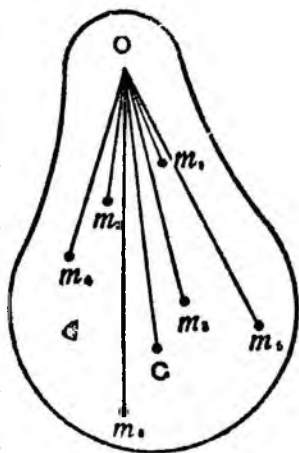


Рис. 5.

8. **Применение маятника в часах.** Маятник применяется в часах как регулятор их хода. Оси, движущие стрелки часов, приводятся во вращение или поднятой гирей, или закрученной пружины. Падение гири и раскручивание пружины происходят неравномерно; движения же стрелок часов должны отмечать равные промежутки

¹⁾ Последний вывод получается теоретически.

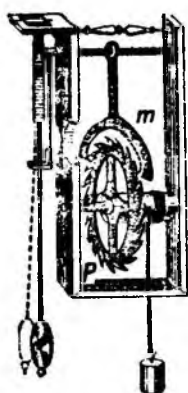


Рис. 5а. Регулирование маятником хода часов.

времени. Для регулирования хода часов пользуются изохронностью колебания маятника ¹⁾, который во время своих колебаний пускает в ход движущий часовой механизм через равные промежутки времени. Приспособление для такого регулирования изображено на рисунке 5а.

9. Применение маятника к измерению ускорения свободного падения. Из формулы периода простого колебания маятника можно найти:

$$g = \frac{\pi^2 l}{T_1^2}.$$

Чтобы вычислить ускорение силы тяжести для любого места Земли, надо: 1) измерить приведённую длину маятника; 2) измерить время нескольких сотен или тысяч колебаний маятника; по этим данным вычислить период колебаний его; 3) подставить значения l и T_1 в формулу и вычислить g .

Упражнение 1.

1. Почему массивная часть маятника делается в форме чечевицы?
2. Найти приведённую длину секундного маятника (т. е. маятника, период простого колебания которого равен 1 сек.) на полюсе $g=983, (24)$, на экваторе ($g=978,05$), в Париже ($g=980,94$), в Москве ($g=981,56$).

Отв. Для Москвы $l=99,55$ см.

3. Как будут идти часы с секундным маятником, установленным для Москвы, на полюсе и на экваторе?

4. Определить период простого колебания маятников в Париже длиной в 76 м, длиной в 300 м (подвешенных у вершины Эйфелевой башни).

Отв. 8,8 сек.; 17 сек.

5. Как и почему изменится период колебания железного шарика, подвешенного на нити, если под ним поместить магнит (рис. 6)?

6. Как изменится колебание маятника, если его перенести из воздуха в воду или в вязкое масло?

7. Как изменится период колебания маятника, если его длину удвоить, утроить?

8. Как надо передвинуть чечевицу маятника при отставании часов?

9. Как будет изменяться ход часов (рис. 5а) при наступлении летних жарких дней по сравнению с холодными зимними днями?

10. Колебание упругих тел. Колебание может происходить как под действием силы тяже-



Рис. 6.
К задаче № 5.

¹⁾ Применил маятник к часам голландский физик Гюйгенс в 1658 г.

сти, так и под действием упругих сил. Если отвести в сторону верхний конец зажатой в тиски стальной пластинки (рис. 7), то она придёт в гармоническое колебание. При выводе пластинки из положения равновесия происходит изменение формы; при изменении формы возникает так называемая сила упругости, восстанавливающая прежнюю форму тела по прекращении действия внешней силы. Силы упругости и сообщаемые ими ускорения прямо пропорциональны отклонению от положения равновесия¹⁾ и всегда направлены в сторону равновесия. По возвращении тела в положение равновесия сила упругости обращается в нуль, но сообщённая ею скорость достигает в этот момент наибольшей величины; за счёт приобретённой кинетической энергии частицы тела проходят через положение равновесия и отклоняются в противоположную сторону при отсутствии сопротивления на такое же расстояние. Таким образом устанавливается гармоническое колебание частей пластинки перпендикулярно её длине.

Если вместо изменения формы тела изменить объём его, например, сжав столб воздуха или подвешенную спиральную пружину вдоль её оси, то в теле возникнут силы упругости, восстанавливающие прежний объём по прекращении действия внешней силы и также прямо пропорциональные отклонению от равновесия. Предоставленные самим себе, части тела не сразу вернутся в равновесие, а будут совершать гармонические колебания вдоль длины тела.

Итак, гармонические колебания возникают в упругом теле при изменении его формы и при изменении его объёма.

11. Распространение колебаний в упругом теле. Колебание, вызванное в каком-либо одном месте упругого тела, не ограничивается этим местом, а распространяется вдоль всего тела.

Если, натянув горизонтально прикрепленную за один конец верёвку или резиновый шнур, сделать взмах рукой, держащей другой конец, то на этом конце сперва образуется выступ, затем возникнет впадина: эти два образования — выступ и впадина — проходят по всему шнуру до его конца (рис. 8).

Распространение колебаний в теле называется волнообразным движением. В нашем примере соседние выступ и впадина составляют волну.

Моделью волнообразного распространения колебаний в упругом

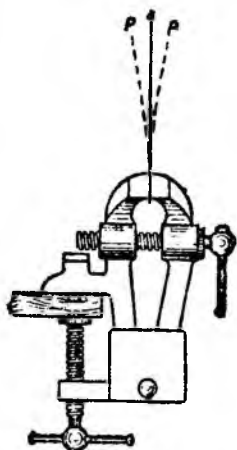


Рис. 7. Колебание упругой пластинки.

¹⁾ Если сила не превосходит предела упругости (см. § 94).

теле могут служить волны на поверхности воды, хотя эти волны вызываются не упругостью, а другими причинами ¹⁾. Брошенный на поверхность спокойного пруда камень образует под собой впадину в поверхностном слое; через некоторое время впадина заменяется выступом; в то же время можно наблюдать, что движение не ограничивается местом падения камня: вокруг цен-



Рис. 8. Движение волны по резиновому шнуру.

трального выступа образуется кольцевая впадина. Через такой же промежуток времени в центре опять появляется впадина, в первом кольцевом промежутке образуется выступ, дальше опять кольцевая впадина и т. д. По всему пруду распространяются от места падения камня круговые волны; как можно видеть по плавающим листьям, частицы жидкости не перемещаются по радиусу круга вдоль линии распространения волны. Распространяется только форма движения — колебание — без перемещения самого вещества.

12. Поперечное колебание. Чтобы ближе представить себе способ возникновения волны в упругом теле, выделим мысленно на горизонтальном стержне 17 его частиц на равных расстояниях друг от друга (рис. 9). Пусть на первую частицу подействует вертикально вверх мгновенная сила и выведет её из положения равновесия. В результате действия этой мгновенной силы первая частица будет двигаться кверху; но как только первая частица

выйдет из положения равновесия, на неё начнёт действовать сила упругости, вызываемая её сцеплением с соседними частицами и направленная в сторону положения равновесия. Ускорение от этой силы направлено против начальной скорости, и через некоторое время скорость обратится в нуль. Но первая частица после

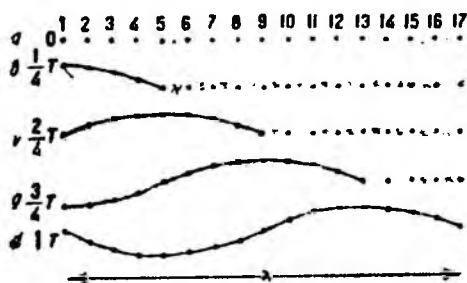


Рис. 9. Распространение поперечных колебаний

¹⁾ Волны на поверхности воды от брошенного камня поддерживаются силой тяжести; волны при ветре вызываются трением между воздухом и поверхностью воды.

выхода своего из положения равновесия потянет за собой вторую частицу, вторая — третью и т. д. Допустим, что через четверть периода, ко времени остановки первой частицы, успели прийти в движение четыре частицы, отклонившись от положения равновесия на разные расстояния (рис. 9, *b*).

После того как скорость первой частицы обратилась в нуль, частица под действием упругой силы будет двигаться со всё возрастающей скоростью к положению равновесия и достигнет его по истечении времени, равного также четверти периода. За это время вторая, третья, четвертая частицы успеют не только отойти на наибольшее расстояние, но и начнут возвращаться в положение равновесия, всё время запаздывая в своём движении относительно каждой предыдущей частицы. Под действием соседних частиц и следующие четыре двинутся вверх, причём пятая успеет пройти наибольшее расстояние, а остальные расположатся так, как показывает рисунок 9, *b*; но первая частица не остановится в положении равновесия, а вследствие накопленной кинетической энергии будет продолжать своё движение в противоположную сторону и пройдёт за $\frac{1}{4} T$ вниз такое же расстояние, на которое

она максимально отклонялась вверх. За это же время пятая частица вернётся в положение равновесия, девятая достигнет наибольшего отклонения вверх, и только тринадцатая будет ещё в покое (рис. 9, *z*). Ещё через четверть периода первая частица будет проходить снизу через положение равновесия, и все 17 частиц примут положение, показанное на рисунке 9, *d*. Затем будут приходить в колебание дальнейшие частицы, а ранее пришедшие будут продолжать своё колебание с постепенным затуханием.

Постепенное возникновение вдоль стержня выступов и впадин является волнообразным движением. Частицы стержня и здесь колеблются около своего положения равновесия, не двигаясь вдоль стержня; вдоль стержня происходит только передача формы движения, но не перемещение самих частиц. *Колебания, в которых перемещения направлены перпендикулярно к распространению волн, называются поперечными.* Поперечные колебания возникают в том случае, когда тело обнаруживает упругость при изменении формы. Так как собственную форму имеет только твёрдое тело и только оно обнаруживает упругость при изменении формы, то упругие поперечные колебания могут происходить только в упругих твёрдых телах.

13. Продольное колебание. Если выделить на горизонтальном стержне 17 частиц, лежащих на равных расстояниях друг от друга, и подействовать на стержень мгновенной силой по направлению длины стержня, например вправо, то первая частица выйдет из положения равновесия и увлечёт за собой ближайшие частицы (рис. 10); возникшая при изменении объёма сила упругости уменьшает началь-

ную скорость первой частицы до нуля, сообщив ей ускорение, направленное в сторону равновесия. Эти же силы упругости заставят частицу двигаться ускоренно к положению равновесия; накопив к положению равновесия кинетическую энергию, частица перейдёт

через это положение в противоположную сторону, отклонится на такое же расстояние и опять будет перемещаться силой упругости в сторону равновесия. Дальнейшие частицы будут повторять описанное движение с тем или другим запаздыванием. Последовательные положения точек через четверти периода изображены на рисунке 10.

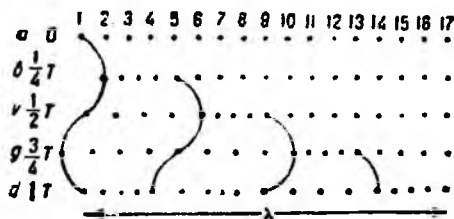


Рис. 10. Распространение продольных колебаний.

четверти периода изображены на рисунке 10.

Рисунок 11 показывает сгущения и разрежения, образовавшиеся на упругой пружине, а рисунок 12 даёт схему расположения отдельных частиц.

Распространение вдоль стержня сгущений и разрежений также является волнообразным движением. И здесь распространяется вдоль тела только упругая деформация, но не

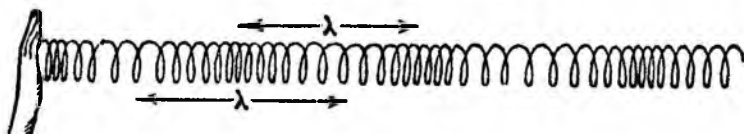


Рис. 11. Распространение продольных колебаний в спиральной пружине

самые частицы вещества. Частицы колеблются около положений равновесия, перемещаясь в ту и другую сторону по направлению распространения волны.

Колебания, в которых перемещения частиц происходят по направлению распространения волны, называются продольными. Продольные колебания возникают в телах, обнаруживающих упругость при изменении объёма. Следовательно, продольные колебания могут устанавливаться в твёрдых, жидких и газообразных телах. Для продольного колебания синусоида (рис. 4) уже не изображает действительного расположения частиц, как это было на рисунке 9 для поперечной волны, но служит графиком отклонений от положения равновесия различных частиц для одного и того же мгновения.

14. Длина волны. Расстояние между двумя соседними выступами в поперечной волне или расстояние между двумя соседними сгуще-

ниями в продольной волне называется длиной волны и обозначается буквой λ (лямбда). Очевидно, что расстояние между двумя соседними впадинами, а также расстояния между двумя соседними разрежениями также равны длине волны (рис. 8, 11, 12).

Другими словами, длина волны есть расстояние между двумя ближайшими точками (взятыми по направлению распространения волны), одновременно проходящими через положение равновесия и двигающимися в одну и ту же сторону (например точки 1 и 17 на рис. 9); эти же точки будут, очевидно, всё время

занимать по отношению к положению равновесия в одни и те же моменты одинаковое положение.

Про точки, занимающие одинаковое положение по отношению к положению равновесия и дви-

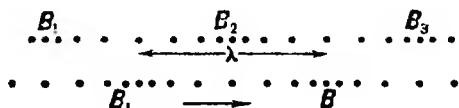


Рис. 12. Схема сгущений и разрежений в продольной волне.

гающиеся в одну и ту же сторону, говорят, что они находятся в одинаковых фазах; про точки, расположенные симметрично по отношению к положению равновесия и двигающиеся в разные стороны, говорят, что они находятся в противоположных фазах или имеют разность фаз в 180° .

Из рисунка 9 видно, что за период T одного колебания волна пробежала расстояние, равное длине волны. Путь, пройденный какой-либо фазой колебания, например вершиной выступа, за время в 1 сек., измеряет скорость распространения волны. Если скорость распространения волны равна v , то расстояние, на которое колебания распространяются за один период, равно vT и составляет длину волны λ .

Если обозначить число колебаний в 1 сек. через ν , то все упомянутые величины будут связаны следующими соотношениями:

$$\boxed{\nu = \frac{1}{T}; \quad T = \frac{1}{\nu}; \quad \lambda = vT; \quad v = \lambda\nu.} \quad (\text{III})$$

15. Отражение и преломление волн. Если, натянув горизонтально резиновый шнур или верёвку, сделать один взмах рукой, то, как описано в § 11, вдоль шнура начнёт распространяться одиночная волна поперечного колебания. Наблюдение показывает, что волна, дойдя до другого привязанного конца шнура, возвращается по нему обратно (отражается).

При отражении волны могут быть два случая: вторая среда, от поверхности которой происходит отражение, может быть более плотная или менее плотная, чем первая, в которой распространяется волна до отражения.

Привяжем резиновый шнур к стене и пошлём по нему одиночную волну выступом вперёд (рис. 13). Опыт показывает, что она, отражаясь, возвращается вперёд впадиной.

Если же привязать резиновый шнур к лёгкой верёвке и опять пустить по шнуру колебание выступом вперёд, то отражённая волна пойдёт в том же виде, как шла поступательная волна, т. е. выступом вперёд (рис. 14).

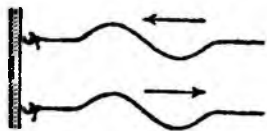


Рис. 13. Отражение волны с потерей полуволны.

Первый случай отражения называется отражением с потерей полуволны, второй — без потери полуволны.

Отражение волн можно показать на волнах, образуемых на поверхности воды. Если образовать волну на поверхности воды и поставить где-нибудь на пути волны плоскую вертикальную преграду, то от неё отражаются поверхностные волны так, как изображает рисунок 15.

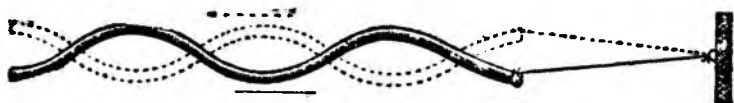


Рис. 14. Отражение волны без потери полуволны.

Преломление волн происходит при переходе волны из одной среды в другую, где скорость распространения волны оказывается иной.

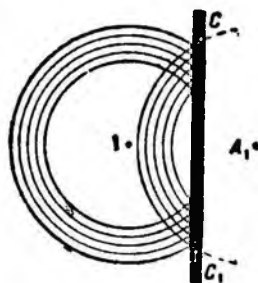


Рис. 15. Отражение волн, распространяющихся по поверхности воды: A — источник волн; CC_1 — преграда, от которой происходят отражения; A_1 — центр отражённых круговых волн; A_2 — изображение A .

Преломление волн заключается в следующем: если волна подходит наклонно к границе, разделяющей две среды с различными скоростями распространения волн, она, перейдя эту границу, меняет направление своего распространения.

16. Интерференция волн. Если до некоторой точки тела доходят одновременно две волны и приводят её в колебание, то смещения этой точки, вызываемые обеими волнами в каждый момент, должны складываться по правилу векторов.

Простейшим видом такого сложения будет тот случай, когда обе волны заставляют точку колебаться по одной прямой. Тогда смещения складываются алгебраически. На рисунке 16 приведены четыре случая алгебраического сложения смещений:

AB_1 от первой волны и AB_2 от второй; AB — алгебраическая сумма обоих смещений.

Если волны имеют одинаковые периоды и амплитуды, то, применяя вышеуказанный приём, мы найдём, что, в случае одинаковых фаз, смещения в сложном колебании удвоятся, и в результате получится колебание с двойной амплитудой (рис. 17); в случае противоположных фаз — смещения взаимно уничтожаются, и колебаний совершенно не будет (рис. 18).

Сложение колебаний, вызываемых двумя волнами, имеющими одинаковые периоды и одинаковое направление колебаний, называется интерференцией волн. При одинаковых амплитудах и противоположных фазах может произойти полное уничтожение колебаний; при разных амплитудах и при разных фазах — частичное.

Интерференцию можно наблюдать на поверхности воды, если пускать по ней две системы волн. Светлые полосы между двумя плавками на рисунке 19 показывают интерференционные полосы,

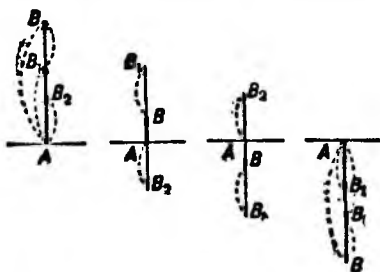


Рис. 16. Четыре случая алгебраического сложения смещений.

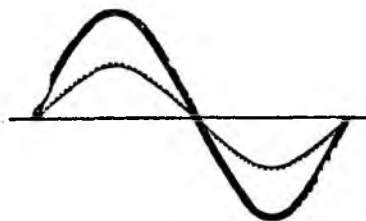


Рис. 17.

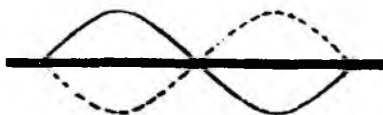


Рис. 18.

Рис. 17—18. Сложение колебаний одинаковой частоты с равными амплитудами; график результирующего колебания изображён жирной линией: на рис. 17 фазы обоих колебаний одинаковы, на рис. 18 фазы противоположны.

т. е. те точки, в которые колебания от обеих волн пришли с противоположными фазами, вследствие чего и произошло уничтожение колебаний в этих точках.

17. Стоячая волна. Если посылать по шнуру движением руки ряд волн, то подобный же ряд волн будет возвращаться от другого конца (рис. 20); таким образом одновременно по шнуру будут проходить два волнообразных движения с одинаковым периодом и амплитудой, но в противоположных направлениях.

Пути, проходимые каждой точкой шнура в обоих колебаниях, будут складываться по правилу сложения векторов, и получится некоторое сложное колебательное движение. Подобный случай прямой и обратной волны возникает во всяком колеблющемся теле ограниченных размеров (обратной волны нет только в бесконечно-большом теле).

Сложение двух волн, идущих в противоположных направлениях (поступательной и обратно отражённой), для ряда последовательных моментов показано на рисунке 21, на котором толстой линией показана сложная волна.

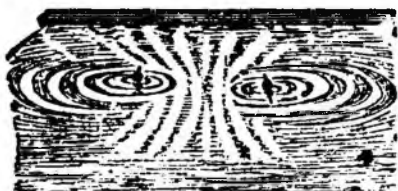


Рис. 19. Интерференция волн на поверхности воды.

Движение поступательной волны слева направо представлено перемещением букв *А* с различными значками, движение встречной волны — таким же перемещением букв *В* справа налево; коле-

бания в сложной волне — положением точек *С*. Если представить, что в некоторый момент (рис. 21, положение 1) синусоиды совпадают, то все точки тела будут иметь удвоенные смещения. Так же будут складываться смещения и через половины периода (положения 3 и 5). Через одну четверть и через три четверти периода (положения 2 и 4) отклонения всех точек в обоих колебаниях равны по величине, противоположны по направлению и взаимно уничто-

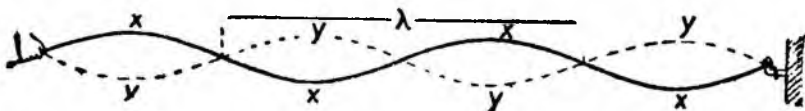


Рис. 20. Стоячая волна в резиновом шнуре.

жаются; весь шнур в эти моменты будет находиться в положении равновесия.

Если сравнить все пять положений, то можно видеть, что все чётные точки *С* в течение периода остаются в положении равновесия; они называются узлами. Все нечётные точки *С* проходят наибольшие амплитуды и называются пучностями. Система колебаний, в которой одни равноотстоящие точки являются узлами, а лежащие посередине между узлами точки являются пучностями, называется стоячей волной. Стоячая волна может получиться от сложения как поперечных, так и продольных колебаний. Расстояние между двумя соседними узлами CC_3 , или, что то же самое, между двумя соседними пучностями C_1C_3 , называется стоячей полуволной. В каждый момент точки двух смежных стоя-

чих полуволн имеют прямо противоположные направления колебаний. Длина стоячей полуволны равна половине длины поступательной волны (рис. 20).

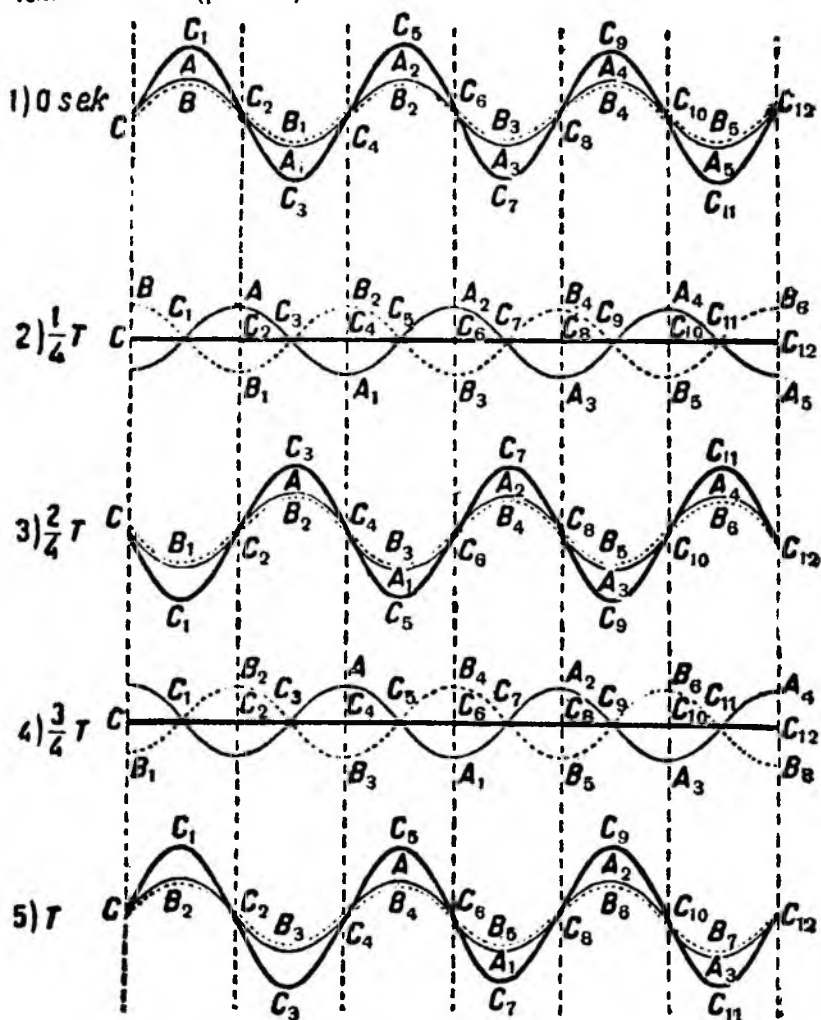


Рис. 21. Образование стоячих волн путём сложения прямой и обратной волн.

18. Резонанс. Если к одной горизонтальной нити или стойке привесить несколько маятников одинаковой и разной длины (рис. 22) и один из равных маятников *A* привести в колебание, то можно заметить, что одинаковый с ним по длине маятник *C* также начнёт

раскачиваться: маятники другой длины. *B* и *D*, придут только в едва заметное колебание.

Амплитуда качаний первого маятника уменьшается и доходит до минимума, в то время как амплитуда качаний второго маятника одинаковой длины достигает наибольшей величины. Затем начинается обратное изменение. Явление объясняется следующим образом.

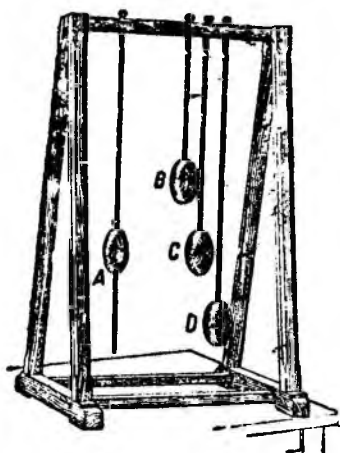


Рис. 22. Резонанс маятников.

Первый маятник, колеблясь с определённым периодом, раскачивает нить или стойку; колебания нити передаются каждому из привешенных маятников. Если период собственных колебаний этого второго маятника одинаков с периодом колебания первого, то амплитуда его качаний постепенно увеличивается, если же различен, то колебания затухают от того, что толчки, получаемые вторым маятником от первого, не всегда совпадают по направлению с направлением движения маятника.

Таким образом, запас энергии одного маятника передаётся другому и потом возвращается обратно (с неизбежными потерями). Переход происходит тем быстрее, чем больше связь между маятниками. Если два маятника одинаковой длины, привешенные к стойке, связать нитью (рис. 23) и нагружать эту нить грузами, то скорость передачи энергии от одного маятника другому возрастает с увеличением нагрузки.

Возбуждение колебаний в одном теле колебаниями другого тела, имеющего одинаковый с первым период колебания, называется резонансом.

19. Явление резонанса и техника. Во многих фабрично-заводских станках силы действуют периодически. Это имеет место в паровых машинах или штамповальных станках, делающих удар через равные промежутки времени, или в станках с неравномерным ходом. Эти периодически повторяющиеся толчки передаются другим частям машины,

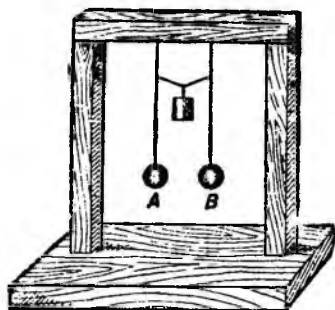


Рис. 23. Связанные колебания маятников.

основаниям станков, самому зданию. Если частота действия силы становится близкой или точно равной той частоте, с которой могут происходить колебания станка или здания, то наступает явление резонанса. Амплитуды колебаний могут увеличиться до такой степени, что может наступить поломка вала, расшатывание основания двигателя или станка и сотрясение стен.

Техника принимает особые меры для борьбы с упругими колебаниями в сооружениях вследствие резонанса. Для машин, с целью уменьшения колебаний, применяется войлочная подстилка, поглощающая энергию колебаний. В строительном деле укладка бетона между двумя балками приводит к той же цели. Военские части должны проходить мосты не в ногу; иначе от периодических толчков может получиться такое раскачивание, при котором произойдет разрушение моста.

Во многих других случаях резонанс имеет положительное значение и используется в науке и технике (например в радиотехнике).

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСВОЕНИЯ.

1. Что называется математическим маятником?
2. Как выражается ускорение маятника в зависимости от угла отклонения?
3. В какой точке пути маятника скорость наибольшая? Чему равно в этой точке ускорение?
4. В каких точках пути ускорение маятника наибольшее и какова в них его скорость?
5. Что называется гармоническим колебанием?
6. Что такое амплитуда и период колебания?
7. Что называется затухающими и незатухающими колебаниями?
8. Как связаны между собой период колебания и число колебаний в секунду?
9. Какой вид и какое название имеет график отклонения точки от положения равновесия в гармоническом колебании?
10. Каковы законы колебания математического маятника?
11. Что называется физическим маятником?
12. Что называется приведенной длиной физического маятника?
13. На каком свойстве маятника основано применение маятника в часах и каково его назначение в них?
14. Как маятник может быть применен для определения ускорения силы тяжести?
15. Под действием какой силы, кроме силы тяжести, могут еще возникать гармонические колебания?
16. Что называется волной?
17. Что называется поперечным колебанием? Каков график смещения точки в течение периода? Каково расположение для определенного момента различных точек колеблющегося тела?
18. Что называется продольным колебанием? Каков график смещения точки в течение периода?
19. В каких телах возможны поперечные и в каких продольные колебания?
20. Что называется длиной волны?
21. Каково соотношение между длиной волны, скоростью, периодом и числом колебаний в 1 сек.?

22. Какие два случая могут быть при отражении волны?
23. Что называется интерференцией волн?
24. Что получается при сложении двух колебаний по одному направлению одинакового периода с одинаковыми фазами?
25. Что получается при сложении двух колебаний по одному направлению с одинаковыми периодами и противоположными фазами в случае равных и неравных амплитуд?
26. Что называется стоячей волной и отчего она образуется?
27. Что называется узлами и пучностями стоячей волны?
28. Чему равно расстояние между двумя соседними узлами или пучностями?
29. В каких фазах находятся колеблющиеся точки, равноотстоящие по обе стороны от каждого узла?
30. В чём состоит резонанс маятников?
31. В чём состоит резонанс упругих колебаний?
32. Какое основное условие резонанса?

20. Звук. Источником звука является колеблющееся тело. Достаточно к любому звучащему телу, например к камертону, приложить подвешенный металлический шарик (рис. 24), как этот шарик начнет отскакивать от камертона, указывая тем самым на колебательное состояние звучащего тела.



Рис. 24. Колебания звучащего камертона.

Колебания звучащего тела передаются воздуху. Когда частицы звучащего тела движутся в сторону окружающего воздуха, они сжимают прилегающий слой его; при обратном движении частиц на месте сжатия возникает разрежение воздуха. Эти сжатия и разрежения распространяются в окружающем воздухе волнообразно, образуя звуковые волны.

Звук распространяется только через вещество. В безвоздушном пространстве звук не распространяется. Если подвесить под колоколом воздушного насоса электрический звонок (рис. 25), то по мере выкачивания воздуха громкость звука ослабляется.

Распространение звука от точечного источника происходит в виде сферических (шаровых) волн (рис. 26). Воздушная волна, достигая уха, приводит в колебание барабанную перепонку; эти колебания передаются во внутреннее ухо, раздражают слуховой нерв и тем вызывают восприятие звука — слышание.

В различных телах скорость распространения звука различна. Чтобы измерить эту скорость, надо по одним точным часам (хронометр) заметить время воспроизведения какого-либо короткого звука, по другим — время его восприятия на определенном расстоянии и разделить расстояние на измеренный промежуток

времени. Измерения дают следующие скорости в $\frac{см}{сек}$: 332—в воздухе при 0°; 340—в воздухе при 15°; в воде 1450; в еловом дереве от 4000 до 5000; в стали 5000. Ухо человека может воспринимать в виде звука колебания, лежащие в среднем между 16 и 20 000 колебаний в секунду в зависимости от силы звука.

Число колебаний в секунду измеряется в единицах, называемых герцами. Герцем называется одно колебание в секунду.

21. Тон. Громкость и высота тона. Сирена. Звуки разделяются на музыкальные звуки, или музыкальные тоны, и шумы.

Шум представляет совокупность многих кратковременных разнообраз-

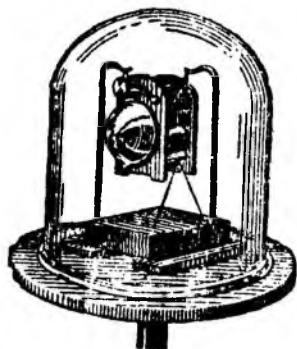


Рис. 25. Электрический звонок под колоколом воздушного насоса.

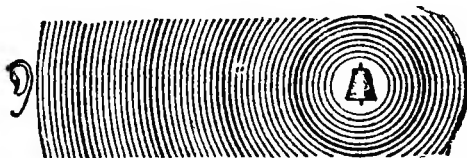


Рис. 26. Распространение шаровых волн от звучащего тела.

ных звуков. Таков шум леса при ветре, шум от сбрасываемых на мостовую брёвен или камней, шум от езды по каменной мостовой экипажей или вагонов трамвая и метро по рельсам.

Музыкальный звук дают: камертон, струна, певческий голос, музыкальные инструменты. В звуке слух различает три качества: громкость, высоту и тембр.

Громкость звука есть особое качество его, определяемое исключительно по слуховому ощущению. Она *зависит при прочих равных условиях от амплитуды колебания.*

Качественно в этом можно убедиться на звучащем камертоне или струне: с течением времени амплитуды убывают (подвешенный шарик отклоняется на меньший угол), и громкость звука уменьшается.

От амплитуды колебаний зависит энергия колебаний. С уменьшением колебания уменьшается и его энергия. Для средних частот в пределах от 1000 до 3000 герц ухо ещё может различать звуки при значении энергии, приходящейся на 1 см^2 в 1 сек. , равном $10^{-8} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}}$ (порог слышимости).

Высота звука зависит от числа колебаний в секунду. Число колебаний камертона легко определить, насаживая на камертон

лёгкое остриё и проводя равномерно по острию звучащего камертона закопчённой стеклянной пластинкой. За одно и то же время на одном и том же расстоянии (при одинаковой скорости движения пластинки) различные камертоны вычертят различные синусоиды (рис. 27). По этим синусоидам и времени движения пластинок можно рассчитать число колебаний в секунду или частоту колебаний.

Опыт показывает, что слух приписывает тем тонам большую высоту, у которых большее число колебаний в секунду.

Для измерения числа колебаний любого звука применяется прибор, называемый сиреной. Сирена — это цилиндрическая

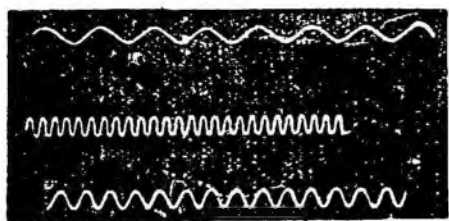


Рис. 27.

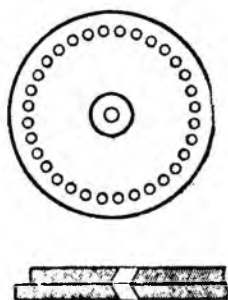


Рис. 28. Крышка сирены Каньяр-Латура.

коробка, на верхней крышке которой прорезано несколько равноотстоящих друг от друга отверстий (рис. 28). Оси отверстий наклонены к плоскости крышки. Сверху к крышке непосредственно прилегает другой, подвижной, круг с таким же числом отверстий, наклонённых к плоскости круга под таким же углом, только в противоположную сторону. В сирену при помощи мехов вдувается воздух; струи воздуха, выходя из отверстий в крышке и ударяясь под углом в стенки отверстий подвижного круга, дают слагающую давления, которая приводит весь круг во вращение вокруг оси. Когда отверстия подвижного круга приходятся над отверстиями неподвижного, над сиреной происходит сгущение воздуха; когда же промежутки подвижного закрывают отверстия неподвижного, — разрежение.

Эти сгущения и разрежения воздуха являются источниками звука. Число колебаний в секунду определяется произведением числа отверстий на круге на число оборотов в секунду. Для измерения числа колебаний в секунду любого звука заставляют звучать сирену, усиливая вдувание воздуха мехами до тех пор, пока оба звука — испытуемый звук и звук сирены — не сольются для нашего уха в один (т. е. наступает унисон). Тогда начи-

нается измерение за определённое время числа оборотов, для чего у сирены имеется счётный аппарат (рис. 29), и затем вычисляется число колебаний в секунду.

Чтобы понять физическое основание того качества звука, которое называется *тембром*, надо познакомиться с другими свойствами звука как волнообразного движения.

22. Отражение и преломление звуковых волн. Звуковая волна, подобно всякой волне упругого колебания, отражается от границы двух разнородных тел. Если на стену здания, берег реки, лес падает шаровая звуковая волна, то от этих границ отходит новая шаровая волна, направленная своей выпуклостью противоположно выпуклости падающей волны. Эта волна будет отражённой волной. Явление подобно изображённому на рисунке 15.

Если поверхность падающей волны плоская, то поверхность отражённой волны будет также плоской. Нормаль¹⁾ падающей и отражённой волн образуют с перпендикуляром к границе равные углы. Таким образом, и для отражения звука имеет место тот же закон, что и для отражения света: *угол отражения равен углу падения*.

Отражённый от какой-либо границы звук может быть слышен отдельно от произносимого звука, если он доходит до уха, после того как исчезло ощущение от только что непосредственно воспринятого звука, т. е. не раньше, как через 0,1 сек.

При скорости звука в $340 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$ отражающая поверхность должна находиться на расстоянии не ближе 17 м (в оба конца путь звука $L = vt = 340 \cdot 0,1 = 34 \text{ м}$) от говорящего человека, чтобы произнесённый звук и его отражение были слышны раздельно. Отдельно воспринятый отражённый звук называется *эхом*. В закрытом помещении отражённый звук сливается с произносимым звуком, удлиняя и усиливая его.

Остаточное звучание в закрытом помещении, сохраняющееся

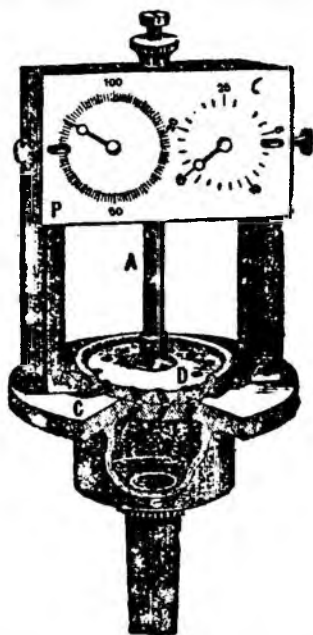


Рис. 29. Сирена Каньяр-Латура.

¹ Нормаль — перпендикуляр к поверхности в данной её точке.

после прекращения действия звучащего источника, называется реверберацией.

Звуковые волны при переходе из вещества одной плотности в вещество другой плотности меняют своё направление, т. е. испытывают преломление. Плоская звуковая волна при переходе в воздухе сверху вниз или обратно распространяется не прямолинейно, а по ломаной или даже кривой линии, так как проходит слои воздуха различной плотности.

23. Интерференция звуковых волн. Если привести в звучание камертон и вращать его около оси ножки, то слышны последовательные ослабления и усиления звука. Очевидно, звуковые волны, идущие от той и другой ветви камертона, то ослабляют друг друга, то усиливают. Такое усиление и ослабление звука звуком называется интерференцией звука. Основой интерференции звука служит интерференция волн (см. § 16).

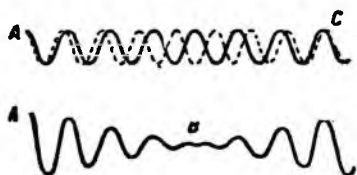


Рис. 30. Образование биений.

24. Биения. Особый случай представляет сложение волн, периоды которых отличаются друг от друга на очень малую величину. Возьмём два камертона с одинаковым числом колебаний и приведём их в звучание. Мы услышим один тон: камертоны звучат в унисон.

Теперь насадим на один из них небольшую изогнутую металлическую пластинку. Этим мы увеличим массу камертона и изменим очень немного высоту его основного тона. Если теперь привести в одновременное звучание оба камертона, то можно слышать последовательные усиления и ослабления звука. Усиления и ослабления звука при одновременном звучании двух тел с почти равными периодами называются биениями. Биения производят тягостное впечатление на слух, когда они повторяются от 30 до 130 раз в секунду.

Физическую причину биений легко понять, рассмотрев рисунок 30. На нём изображён тонкой сплошной линией график колебаний волны с числом колебаний $\nu = 512$ герц; пунктирной линией изображён график колебаний волны с числом колебаний $\nu_1 = 576$ герц. Нижняя сплошная толстая линия даёт сложную волну. Уже в пределах рисунка видны большие и меньшие амплитуды сложного движения, вызывающие усиление и ослабление звука.

Можно считать, что число биений (биение = усиление + ослабление) в секунду равно $\nu_1 - \nu = 64$.

25. Собственный тон тела. Если на одном конце тела возбуждено колебание, то по телу проходят волны, отражаются от его второго конца, возвращаются в виде обратных волн, снова отражаются от первого конца и т. д. От сложения прямой и

обратной волн могут образоваться стоячие волны. Если число их колебаний лежит в пределах от 16 до 20 000 герц, то они могут стать источниками звука. Так как обратная волна, дойдя до первого конца тела, отразится от него и пойдёт в первоначальном направлении, то в теле и по прекращении действия внешней колеблющей силы ещё долго могут держаться стоячие волны, происходящие от ранее возбуждённых колебаний путём сложения отражённых на каждом конце волн.

В различных телах возможны два случая установления стоячих волн: первый случай — концы тела или оба неподвижны, или оба свободны; тогда на них одновременно возникают или два узла, или две пучности, т. е. на протяжении тела укладывается целое число стоячих полуволн (чётное число четвертей волны); второй случай — один конец неподвижен, другой — свободен; тогда на первом образуется узел, на втором — пучность, и на протяжении тела может уложиться нечётное число четвертей волны.

Когда внешняя колеблющая причина такова, что на длине данного колеблющегося тела может уложиться чётное или нечётное число четвертей волны, то возбуждённые стоячие волны долго сохраняются в теле и по устранении внешней причины, лишь постепенно затухая от неизбежных сопротивлений. Все остальные колебания, не соответствующие вышеприведённым условиям, быстро затухают, погашаясь отражёнными волнами.

Собственными тонами тела называются такие тона, при которых на теле укладывается целое число четвертей поступательной волны.

26. Основной тон тела. Основным тоном тела называется собственный тон с наименьшим числом колебаний в секунду. При основном тоне в теле образуется наименьшее число узлов. При колебании зажатой на концах струны на них образуются узлы, а посередине пучность (рис. 31).

Длина струны l заключает стоячую полуволну, следовательно, длина волны основного тона $\frac{\lambda}{2} = l$, или $\lambda = 2l$.

При колебании стержня, зажатого с одного конца, на этом конце образуется узел (рис. 32), а на другом — пучность.

При колебании зажатого в середине стержня (рис. 33) посередине образуется узел, на концах — пучности, длина стержня опять-таки соответствует стоячей полуволне.

Таково же соотношение между длиной воздушного столба и длиной волны основного тона для звучащих духовых труб или ящиков, открытых с одного конца и закрытых с другого.

27. Высшие гармонические тоны. Опыты показывают, что в колеблющемся теле одновременно с основным могут возникать колебания, длина волн которых в целое число раз (2, 3, 4 и т. д. раз) меньше длины основного тона или числа

колебаний которых в соответствующее число раз больше. Тоны, числа колебаний которых составляют целые кратные от числа колебаний основного тона, называются высшими гармоническими, или обертонами. Так, для струны одновременно с ос-

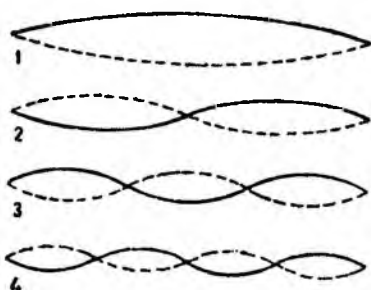


Рис. 31. Колебания звучащей струны, соответствующие основному тону и высшим гармоническим тонам.

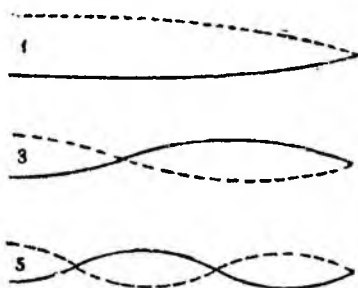


Рис. 32. Колебания стержня, зажатого на конце (основной и высшие гармонические тоны).

новным звучат высшие гармонические (рис. 31) тоны с числом колебаний в 2, 3, 4 и т. д. раз большим.

Для зажатого с одного конца стержня (рис. 32) верхние гармонические тоны имеют в 3, 5 и т. д. раз большее число колебаний, чем основной тон.

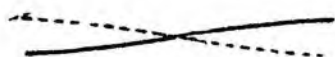


Рис. 33. Колебания зажатого посредине стержня (основной тон).

28. Тембр. Как в приведённых выше примерах, так и в других случаях звучания тел могут быть различны: число, высота и громкость высших гармонических тонов. При одном и

том же основном тоне в различных инструментах или голосах могут быть слышны различные обертоны, поэтому на слух такие тоны будут производить различное впечатление. Это различие выражают тем, что приписывают основному тону различный оттенок, или различный тембр. Таким образом, третье качество звука — *тембр* — зависит от числа, высоты и громкости обертонов, сопровождающих основной тон. Поэтому, например, тон *до*, как и всякий другой, взятый человеческим голосом или на скрипке, или на рояле, производит на слух различное впечатление.

29. Звуковой резонанс. Если перед открытой доской рояля взять какой-нибудь тон, то по прекращении взятого звука можно слышать звучание струны рояля: это резонируют струны, имею-

шие одинаковый период колебаний со взятым тоном. Если поставить на стол несколько камертонов с резонаторными ящиками, среди них два камертона с одинаковыми периодами колебания и один из последних привести в колебание, а затем заглушить, то можно ещё слышать звучание другого одинакового камертона.

Можно заставить резонировать на звук какого-нибудь камертона воздушный столб, заключённый в высоком цилиндре (рис. 34). Изменяя уровень воды в цилиндре, можно добиться того, что собственный период колебания остающегося воздушного столба станет одинаковым с периодом колебания камертона. Такой воздушный столб сильно резонирует на колебание камертона. Можно подобрать такой размер воздушного столба, что получится резонанс для обертонов камертона. Дальнейшее изменение уровня воды изменяет собственный период колебания воздушного столба и прекращает резонанс. Приборы, резонирующие на какой-либо звук, называются резонаторами.

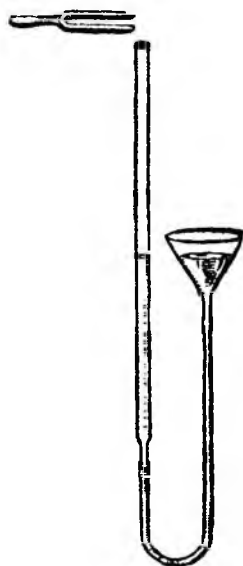


Рис. 34. Прибор для получения резонанса в воздушном столбе.

Резонатор Гельмгольца (рис. 35) представляет собою полое металлическое тело (шар, конус) с двумя отверстиями, из которых одно обращается в сторону звуковой волны, другое вставляется в ухо. В зависимости от размера резонатор отзывается на тон определённой высоты.

30. Лабораторная работа 2. Измерение скорости звука в разных веществах.

Приборы: 1) трубка Кундта (рис. 36); 2) тиски; 3) стержни из разных веществ; 4) картонный кружок; 5) масштаб; 6) пробковые опилки; 7) мокрая суконка.



Рис. 35. Резонатор Гельмгольца.

Ход работы. 1. Зажмите стержень в тиски посредине: на один конец его наденьте картонный (или пробковый) кружок и на этот кружок надвиньте стеклянную трубку, предварительно насыпав в неё равномерным слоем пробковые опилки.

2. Проводя мокрой суконкой вдоль свободного конца стержня, возбудите в нём продольные колебания; эти колебания вызывают волну в воздушном столбе внутри стеклянной трубки. Образуясь в ней стоячие волны оставляют в покое опилки в узлах и приводят их в наибольшие движения в пучностях. Передвигайте трубку до тех пор, пока расположение опилок не даст отчётливой картины узлов и пучностей в воздухе.

3. Отсчитав n_0 расстояний между узлами или между пучностями, измерьте по масштабу расстояние l между крайними отсчитанными точками и найдите длину стоячей полуволны в воздухе $l_0 = \frac{l}{n_0}$.

Выразите через l_0 длину волны в воздухе λ_0 , а через λ_0 и скорость звука в воздухе v_0 — число колебаний ν .

4. Выразите через длину стержня L (§ 26) длину волны в стержне λ и через λ и число колебаний ν — скорость волны в стержне v .

5. Так как число колебаний ν в стержне и воздухе одинаково, то вычислите v через v_0 , l_0 , L .



Рис. 36. Трубка Кундта.

6. Повторите несколько таких измерений для одного и того же вещества и возьмите среднее для v .

7. Сделайте такие же измерения со стержнями из других веществ.

8. Занесите измерения в таблицу.

№ по пор.	Вещество	Число полу-волн n_0 в воздухе	Длина l_0 полу-волн	Длина волны в воздухе λ_0	Длина волны в веществе λ	Отношение длин λ_0/λ
1	Стекло					
2	•					
3	•					
4	Мель					
5	•					
6	•					
						Среднее

31. Лабораторная работа 3. Определение длины звуковой волны по способу резонанса.

Приборы: 1) сообщающиеся сосуды (изображённые на рисунке 34); 2) камертон; 3) масштаб.

Ход работы. 1) Подняв воронку возможно выше, поднесите звучащий камертон к отверстию трубки и опускайте воронку по тех пор, пока воздушный столб в трубке не начнёт резонировать с камертоном.

2) Измерьте масштабом длину резонирующего воздушного столба.

3) Сообразите, какая часть волны укладывается в резонирующем столбе воздуха, и вычислите длину волны.

4) Продолжайте опускать сосуд с водой до тех пор, пока не наступит второй резонанс. Какая часть волны укладывается в этом случае в резонирующем столбе воздуха?

5) Измерьте масштабом столб воздуха и сделайте вычисление.

6) Найдите среднее из двух показаний и сравните с длиной волны, соответствующей числу колебаний, написанному на камертоне.

7) Какой части длины волны будет равна разность длин двух столбов воздуха в случае первого и второго резонансов?

8) Вычислите длину звуковой волны и сравните с предыдущим результатом.

32. Граммофон. Граммофон (рис. 37) представляет собой прибор для воспроизведения звуков. Главная часть его состоит из слюдяной пластинки — мембраны, к середине которой приделан рычажок, заканчивающийся острой иглой. Под иглой вращается при помощи часового механизма диск.



Рис. 37. Граммофон.

При записи звуков под иглу помещают восковой диск. Звуковые волны приводят в колебание мембрану; её колебания передаются игле, которая вычерчивает по спирали на вращающемся диске кривые разной формы.

С восковой пластинки, изрезанной бороздами, делается гальванопластический снимок. С этого металлического снимка делаются оттиски на эбонитовых кружках — граммофонных пластинках (рис. 38)¹⁾.



Рис. 38. Часть граммофонной пластинки (в увеличенном виде).

Для воспроизведения звука надо поставить эбонитовую пластинку под иглу и пустить её во вращение. Игла, двигаясь по борозде и описывая кривые разной формы, приводит в колебание мембрану, мембрана — прилегающий к ней воздух, а воздушные колебания передаются через рупор в пространство.

33. Ультразвуки. Если две противоположные грани пластинки из кристалла кварца покрыть металлическими обкладками и подводить к ним от генератора электрических колебаний пере-

менное электрическое напряжение, то под действием переменной электрической силы пластинки периодически сжимаются; если собственный

¹⁾ На рисунке изображена очень малая часть пластинки, отчего борозды кажутся прямыми, тогда как на самом деле они идут по спирали.

период упругих колебаний кварцевой пластинки совпадает с периодом электрических колебаний. то можно получить колебания окружающего воздуха с частотой от 50 000 до 5 000 000 герц и даже выше. Такие колебания получили названия ультразвуков. Они, конечно, не воспринимаются ухом, но производят на тела удивительное действие.

1. Если массивное твёрдое тело, например крупная металлическая отливка, имеет внутреннюю неоднородность, дефекты отливки, то в таких телах ультразвуки будут иметь различное затухание в местах различной плотности и позволят обнаруживать недостатки строения. Таким образом, удаётся „прозвучивать“ предметы толщиной до 1,5 м, которые не поддаются просвечиванию самыми мощными рентгеновскими установками.

2. Ультразвуки нагревают тело, через которое проходят.

3. Ускоряют химические реакции.

4. Взрывают некоторые взрывчатые вещества.

5. Распыляют твёрдые тела внутри жидкости, быстро образуя весьма стойкие эмульсии.

6. Ускоряют кристаллизацию.

7. Производят разрыв красных кровяных шариков, вызывая через 1—2 мин. смерть рыбок, головастики, лягушек (теплокровные животные не умирают).

8. Умерщвляют бактерии, например молочнокислые, отчего свёртывание молока задерживается на несколько суток. Биохимическое действие ультразвуков вызывается распадением белков и выделением растворённых газов из протоплазмы.

9. Применяются для сигнализации между судами и для исследования рельефа дна на ходу судна.

10. В последнее время в лаборатории Ленинградского электротехнического института найдена возможность „видения“ с помощью ультразвука в непрозрачной среде. От предметов, рассеивающих ультразвук, можно получить ультразвуковые „изображения“ и эти последние можно переводить в видимые изображения.

Область практического применения этого метода весьма широка: в будущем станет возможно осуществление „видения“ на экране дефектов металла; приложение этого „видения“ для определения местонахождения различных тел в воде и т. д.

34. Борьба с шумами. Шум даже небольшой силы, но постоянно повторяющийся, вызывает разрушение органов внутреннего уха, действует на пищеварение, вызывая в отдельных случаях рвоту, приводит к длительным расстройствам нервной системы. Поэтому современная техника и санитария усердно занимаются борьбой с шумом и изобретением противошумных установок.

35. Использование звуковых явлений в военной технике. При современных дальнобойных орудиях, при высоком искусстве маскировки, при углублении окопов в землю неприятель в войне не всегда заметен своему противнику. Но если противник невидим, то он может быть слышим, поэтому звуковые явления приобретают важное значение в военной технике, позволяя разрешать многие военные задачи.

Одной из первых задач является отыскание по звуку местоположения пулемёта, батареи или самолёта противника. Такое отыскание основано на способности наших слуховых органов отличать ничтожно малые промежутки времени, проходящие между восприятием звука

одним и другим ухом — так называемый бинауральный эффект, состоящий в определении направления прихода звуковых волн при восприятии звука двумя ушами. Определить направление звука одним ухом или вовсе невозможно, или это определение оказывается очень неточным. Благодаря бинауральной способности слушатель направляет голову так, чтобы восприятие звука обоими ушами совпало по времени. Тогда источник звука лежит в плоскости, перпендикулярной к середине линии, соединяющей оба уха. Если направление звука найдено в 3 различных точках, то по этим данным при помощи несложного построения можно найти довольно точно место источника звука.

Но для каждого уха существует предел восприятия звука от отдалённого источника, так как с расстоянием громкость звука уменьшается. При колебаниях около 2000 герц (к которым ухо наиболее чувствительно) восприятие звука прекращается, когда на каждый квадратный сантиметр воспринимающей поверхности падает в секунду меньше $\frac{1}{10^9}$ эрг. Поэтому невооружённым ухом удаётся подслушивать полёт самолётов на расстоянии не дальше 9 км.

Для улавливания более слабых звуков применяют так называемые рупоры — конически сходящиеся трубы (рис. 39), которые улавливают более значительную часть звуковой волны, чем ухо, и, концентрируя, направляют энергию в ушные раковины. Расстояние между рупорами как бы увеличивает расстояние между ушами и этим увеличивает точность определения направления звука, основанного на бинауральной способности (до $0,5^\circ$). С помощью рупоров дальность подслушивания увеличивается до 25 км.

Для отражения самолёта недостаточно знать только направление, по которому он приближается, надо знать и высоту полёта, поэтому прибор — звукоулавливатель — состоит из двух пар рупоров: горизонтальной пары и вертикальной. Звукоулавливатель обслуживают два наблюдателя: один по горизонтальной паре рупоров определяет направление на источник звука (например на самолёт), другой — по вертикальной паре находит высоту его (рис. 40).

Точно так же во время военных действий приходится принимать меры для своевременного обнаружения появления морских судов. С этой целью военная техника использует звукопроводность воды,



Рис. 39. Звукоулавливатель; пунктирная стрелка определяет вертикальную плоскость, проходящую через источник звука.

устроявая особые звукоулавливатели для наблюдения за движением неприятельских судов при помощи улавливания шума гребных винтов. Шумы гребных винтов и другие корабельные шумы состоят из множества звуков различных частот (в пределах от 300 до 1500 колебаний в сек.), составляющих звуковую смесь. Шумовые приёмники устрояются разного типа и основываются большей частью на электрических явлениях. На военных судах обыкновенно применяются электромагнитные (или электродинамические) приёмники. Электромагнитный приёмник представляет собой обыкновенный телефон увеличенных размеров. Если на борту судна имеются два

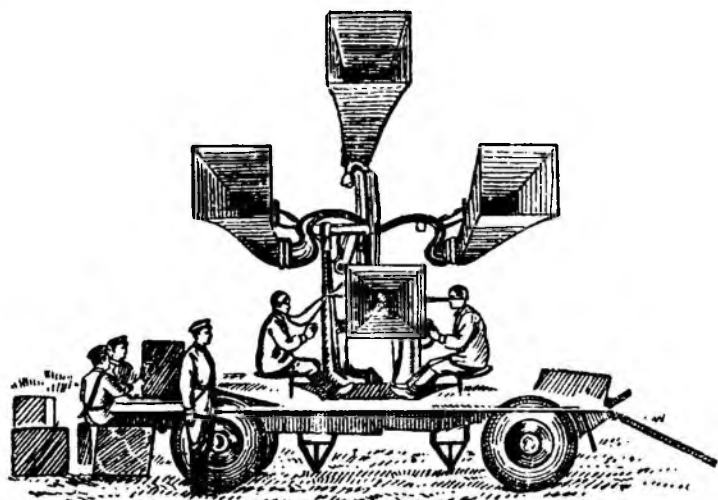


Рис. 40. Звукоулавливатель.

приёмника, то, меняя направление судна, можно установить оба приёмника на одинаковую громкость звука, и тогда искомое судно находится на перпендикуляре, восставленном из середины отрезка, соединяющего оба приёмника (подобно определению положения самолёта).

Но гидроакустические приёмники находят своё применение и в плавании в мирное время. При помощи их можно обнаруживать движение судов в ночное время или в тумане, обнаруживать по шуму рифы, ледяные горы и другие опасные для плавания места, поддерживать связь между судами и берегом и измерять морские глубины через отражение звука от дна.

Для предупреждения аварий судов опасные места обслуживаются звуковой сигнализацией. На маяках, рифах и тому подобных местах устанавливаются излучатели звуковой энергии

разного устройства. Простейшим видом является подводный колокол, язык которого приводится в движение давлением сжатого воздуха, электрическим током или автоматически — ударами морской волны. Частота колебаний его доводится до 1200 колебаний в сек., а дальность действия достигает 20 км. Звуковая техника находит очень широкое применение в военном деле. В учебнике нет возможности остановиться на этих интересных применениях. Познакомиться с ними можно по книгам Внукова, Брэгга, приведённым в списке литературы в конце главы.

Упражнение 2.

1. Через сколько времени происходит распространение звука в воздухе на расстояние 1 км при 0°?

2. На каком расстоянии от наблюдателя возникла молния, если он услышал первый удар грома через 10 сек. после вспышки молнии (температура воздуха 15°)?

3. Какова ширина озера, если звук по воздуху пришёл с другого берега на 10 сек. позже, чем по воде? *Отв. 4300 м.*

4. Какова скорость звука в веществе, если звук проходит в нём длину 4,5 м в 0,001 сек.?

5. Число колебаний в 1 сек. равно 512. Чему равна длина волны в воздухе при 0°?

6. Сколько колебаний в секунду совершается в звуковой волне, если её длина в воздухе равна 33 см при скорости $338 \frac{м}{сек}$? Ответ дать в целых числах.

7. Период колебания звуковой волны равен 0,004 сек. Найти длину волны в воздухе при 0°.

8. Длина волны в воздухе 17 см (при скорости в $340 \frac{м}{сек}$). Найти скорость распространения звука в теле, в котором при том же числе колебаний, что и в воздухе, длина волны равна 102 см. *Отв. $2040 \frac{м}{сек}$.*

9. Может ли звук передаваться через неупругие тела?

10. Какое влияние на слышимость звука оказывают занавеси и мягкая мебель в комнате?

11. Отчего происходит в горах многократное эхо?

12. Отчего происходит гром?

13. Движущийся снаряд гонит частицы воздуха перед собою. Колебания воздуха вызываются также вращением снарядов и пуль вокруг своей оси. За дном снарядов образуются сильные завихрения, так как воздух устремляется в разрежённое пространство, образующееся за снарядом. Эти-то вихревые явления и служат главным источником свиста снарядов и пуль. Свист снарядов и пуль распространяется во все стороны, как и всякий звук. Ружейная пуля через секунду имеет скорость около $500 \frac{м}{сек}$, через 2 секунды $350 \frac{м}{сек}$. Можно ли на расстоянии километра услышать свист пули раньше, чем подлетит сама пуля?

14. Определить, через сколько секунд после звука выстрела надо ожидать падения снаряда, если наблюдатель находится от орудия на расстоянии 4000 м, а средняя скорость снаряда при стрельбе на 4000 м равна $200 \frac{м}{сек}$ (из книги Внукова)

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСВОЕНИЯ.

1. В чём причина звука?
2. Как распространяется звук в воздухе от точечного источника звука?
3. Продольные или поперечные колебания у звуковых волн в воздухе? в воде? в твёрдом теле?
4. Как измерить скорость звука? чему она равна для воздуха?
5. Что такое *герц* и для измерения чего применяется эта единица?
6. В каких пределах частоты лежат слышимые звуковые колебания?
7. От чего зависит громкость звука?
8. Что такое предел слышимости?
9. От чего зависит высота звука?
10. Когда и как происходит отражение звука?
11. Что называется биением и отчего оно может возникнуть?
12. Что называется собственным тоном тела?
13. Что называется основным тоном тела?
14. Что называется высшими гармоническими тонами?
15. От чего зависит тембр звука?
16. В чём состоит звуковой резонанс? Приведите примеры его.
17. Как можно при помощи звукового резонанса в воздушном столбе определить длину звуковой волны или частоту колебаний?

Литература. Зернов, Колебания и волны, „Звук и музыка“, Массовый вечерний университет МГУ. Красиков, Ухо. Беликов, Речь и слух. Ржевкин, Слух и речь в свете современных исследований. Внуков, Физика и оборона страны. Брэгг, Мир звука. Вуд, Звуковые волны и их применение. Флемминг, Волны в воде, в воздухе, в эфире.

II. ТЕПЛОТА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА.

1. Теплота — энергия.

36. Развитие учения о теплоте. В отделе механики мы видели, что производственная деятельность привела человечество в очень давнее время к знакомству с механическими явлениями. Уже за пять тысяч лет до нашего времени постройка пирамид — этих грандиознейших мировых сооружений — потребовала применения машин. Великие войны древности, осады крупнейших городов того времени велись при помощи сложных механических приспособлений. Развитие торговли и промышленности всё более и более повышало требования к науке. Развитие науки привело на рубеже XVI—XVII вв. к открытию галилеево-ньютоновских законов механики.

До XVII в. для приведения в движение созданных к тому времени машин и транспортных средств пользовались исключительно мускульной энергией сперва рабов, потом наёмных рабочих, энергией животных и в меньшей мере механической энергией ветра и воды (водяная мельница в Средней Европе появилась около середины IV в., ветряные мельницы — с начала XI в.).

Развитие промышленности повышало спрос на металл. Древнее рудное дело начинает расширяться, закладываются новые рудники, углубляются старые. Углубление рудников делает всё более трудным откачивание воды, просачивающейся в рудники. Возникает потребность в двигателе более мощном, чем живые существа с их мускульной энергией. Технические искания направляются в сторону использования другого рода явлений природы — тепловых.

С первых дней своего существования человек пользовался теплотой

солнца без всякого усилия со своей стороны. Технически человек стал овладевать теплотой со времени открытия способа получения огня. Недаром это открытие положило начало хозяйственному развитию человечества и оставило неизгладимый след в умственном развитии людей. Нужно отметить, что первое освоение теплоты произошло в форме преобразования в теплоту работы посредством трения.

Следующий шаг в расширении применения теплоты был сделан во II в., когда Герон устроил двигатель, приводимый в движение паром, т. е. превратил обратно теплоту в работу. Но в век Герона, в век рабов, и в последующие века дешёвой мускульной энергии несовершенный паровой двигатель Герона, конечно, не мог состязаться с другими источниками механической энергии. Поэтому как двигатель, так и свойства самой теплоты остались вне внимания и любознательности научно-технической мысли. И только в XVII в., когда уже было почти закончено создание классической механики и когда, как сказано было вначале, явно обнаружилась недостаточность прежних источников механической энергии для обслуживания возрастающих потребностей рудного дела и зарождающихся мануфактур, научно-техническая мысль обращается к изучению тепловых явлений.

Около середины XVII в. голландцем Дреббелем устраивается сравнительно точный термометр с раствором медного купороса. С начала XVII в. возобновились попытки изобретения паровых двигателей. В конце XVII в. Папин получил от промышленных кругов заказов на построение целесообразной паровой машины. Ему принадлежит исследование свойств паров воды и устройство модели поршневой паровой машины. В 1712 г. появилась машина Ньюкомена и Каули, которая долгое время и применялась в рудниках. В 1714 г. Фаренгейт применяет ртуть при изготовлении термометра. В 1730 г. устраивает свой термометр Реомюр и в 1741 г. — Цельсий.

Пользуясь достаточно точными средствами для измерения температур, в 1757 г. Блек устанавливает понятие об удельной теплоёмкости и открывает существование скрытой теплоты. Эти открытия и наблюдения значительно расширили сведения о теплоте. Опираясь на них, ученик Блека — Уатт — в 1764 г. внёс усовершенствование в устройство паровой машины, присоединив к паровому котлу и поршневому цилиндру отдельный холодильник и тем самым придав паровой машине тот вид, который она в основном сохраняет до настоящего времени. С того времени паровая машина получила применение не только в рудничном деле, но и в фабричном производстве, в сухопутном и водном транспорте. Паровая машина, возникнув из потребностей техники, сама оказала громадное влияние на развитие производства, почему следующий за изобретением паровой машины век получил название века пара.

Одновременно с опытным изучением законов тепловых явлений шло и теоретическое истолкование их. В XVII в. крупнейшие физики — Ньютон, Бойль — признавали теплоту за вид движения в полном согласии с теми фактами практики, что теплоту можно получить за счёт механической работы при трении, ударе и, наоборот, за счёт теплоты можно получить работу в несовершенных в то время паровых двигателях. Но с начала XVIII в. (в связи с общим направлением мысли) устанавливается взгляд на теплоту как на особое невесомое вещество, называемое теплородом. Влияние теплорода в тело вызывает повышение температуры, убыль его — понижение. Отражением этого взгляда являются сохранившиеся до сих пор названия теплоёмкости (по сходству с ёмкостью сосудов для жидкости) и скрытой теплоты.

Но продолжающаяся развиваться техника вообще и теплотехника в частности постепенно разрушили представление о тепловых явлениях, как вызываемых особым веществом — теплородом.

Прежде чем перейти к вопросу о смене прежнего учения новым, вспомним из начального курса о тех величинах, которые введены для характеристики тепловых явлений и которые не зависят от теории теплоты.

37. Единица количества теплоты. Для измерения количества теплоты установлена единица — калория¹⁾.

Калорией называется количество теплоты, потребное для нагревания 1 г дистиллированной воды на 1°²⁾.

Сокращённое обозначение калории: *кал.*

1000 калорий составляют 1 килокалорию.

Сокращённое обозначение килокалории: *ккал.*

Килокалория есть то количество теплоты, которое потребно для нагревания 1 кг дистиллированной воды на 1°³⁾.

38. Удельная теплоёмкость вещества. Из начального курса физики известно, что различные вещества требуют разные количества теплоты для нагревания при одинаковых условиях; обратно, они нагреваются до разных температур от получения одинаковых количеств теплоты при прочих равных условиях.

Для характеристики нагреваемости различных веществ введена особая величина, называемая удельной теплоёмкостью.

Удельная теплоёмкость вещества измеряется тем количеством теплоты, которое требуется для нагревания 1 г вещества на 1°.

То же количество теплоты, численно равное удельной теплоёмкости, выделяется при остывании 1 г вещества на 1°.

Единица удельной теплоёмкости носит название

$$\frac{\text{калория}}{\text{грамм} \cdot \text{градус}} \left(\frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}} \right).$$

Легко сообразить, что число, характеризующее удельную теплоёмкость вещества, останется то же, если выражать её в

$$\frac{\text{килокалориях}}{\text{килограмм} \cdot \text{градус}} \left(\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \right).$$

39. Формула количества теплоты при нагревании и остывании. Из начального курса известно, что если удельная теплоёмкость свинца $0,03 \frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}$, то для нагревания 100 г свинца на 1° потребуется теплоты в 100 раз больше, чем для нагревания 1 г, т. е. $3 \frac{\text{кал}}{\text{град}}$. Для нагревания же 100 г свинца на 50° теплоты пойдёт ещё в 50 раз больше, т. е. $0,03 \cdot 100 \cdot 50 = 150 \text{ кал.}$

¹⁾ От латинского слова *калор* (calor) — жар.

²⁾ Точнее с 19°,5 до 20°,5.

³⁾ При остывании 1 г или 1 кг воды на 1° выделяют соответствующую калорию.

Следовательно, количество теплоты, потребной для нагревания данного тела на определённое число градусов, получается через перемножение трёх множителей:

Удельная теплоёмкость $\times$ масса тела $\times$ разность температур.

Это соотношение можно изобразить в виде формулы.

Обозначим удельную теплоёмкость тела через c , массу тела через m , начальную температуру через t_1 , конечную температуру через t_2 и количество теплоты, потребной для нагревания, через Q . В этом случае $t_2 > t_1$, и повышение температуры будет $t_2 - t_1$.

Для нагревания 1 г вещества на 1° требуется c кал

" " m " " 1° " cm
 " " m " " $t_2 - t_1$ " $cm(t_2 - t_1)$

Поэтому количество теплоты, потребной для нагревания от t_1 до t_2 , будет:

$$Q = cm(t_2 - t_1). \quad (IVa)$$

Если происходит остывание тела, то $t_1 > t_2$, и количество теплоты, отдаваемое при остывании, выразится следующим видоизменением предыдущей формулы:

$$Q = cm(t_1 - t_2). \quad (IVб)$$

Если масса тела m выражена в кг, то, повторяя рассуждения, аналогичные только что приведённым, получим те же формулы (IVa) и (IVб) с той разницей, что Q будет выражено в ккал.

Произведение cm показывает количество теплоты, получаемое всем телом при нагревании на 1° или отдаваемое им при остывании на 1°, и называется теплоёмкостью тела.

40. Уравнение теплового баланса. Тела, находящиеся при различных температурах, обмениваются между собой теплотой. В конечном счёте тела более нагретые отдают часть своей теплоты телам менее нагретым до тех пор, пока у тех и других не получится одинаковая температура.

При этом обмен теплотой между телами до выравнивания температур происходит на основании следующего закона:

Количество теплоты, отданной всеми остывающими телами, равно количеству теплоты, полученной всеми нагревающимися телами.

Применим это положение к смешению двух жидкостей разной температуры.

Назовём количество более холодной жидкости через m_1 , её удельную теплоёмкость через c_1 и её температуру перед смешением через t_1 . Те же величины для более нагретой жидкости будут: m_2 , c_2 , t_2 .

Окончательную температуру смеси принято обозначать буквой θ (произносится тэта). Тогда:

Количество теплоты, отданной остывающим телом:

$$Q = c_2 m_2 (t_2 - \theta).$$

Количество теплоты, полученной нагревающимся телом:

$$Q = c_1 m_1 (\theta - t_1).$$

Так как количество отданной теплоты остывающими телами равно количеству полученной теплоты нагревающимися телами, то:

$$c_2 m_2 (t_2 - \theta) = c_1 m_1 (\theta - t_1). \quad (\text{IVв})$$

Из этого основного уравнения можно найти любую величину; определим значение окончательной температуры смеси θ :

$$\begin{aligned} c_2 m_2 t_2 - c_2 m_2 \theta &= c_1 m_1 \theta - c_1 m_1 t_1; \\ c_1 m_1 t_1 + c_2 m_2 t_2 &= c_1 m_1 \theta + c_2 m_2 \theta; \\ c_1 m_1 t_1 + c_2 m_2 t_2 &= (c_1 m_1 + c_2 m_2) \theta; \end{aligned}$$

откуда

$$\theta = \frac{c_1 m_1 t_1 + c_2 m_2 t_2}{c_1 m_1 + c_2 m_2}.$$

Это уравнение было выведено для воды петербургским академиком Рихманом, современником Ломоносова.

Написанное первоначальное уравнение (IVв) носит название уравнения теплового баланса¹⁾.

Примеры. 1. Найти температуру при смешении $m_1 = 100$ г воды при температуре $t_1 = 40^\circ$ и $m_2 = 160$ г воды при температуре $t_2 = 16^\circ$; $c_1 = c_2 = 1 \frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}$:

$$\theta = \frac{1 \cdot 100 \cdot 40 + 1 \cdot 160 \cdot 16}{1 \cdot 100 + 1 \cdot 160} = \frac{4000 + 2560}{260} = \frac{6560}{260} \approx 25,2^\circ.$$

Из этого же уравнения можно определить любую другую величину: массу вещества, участвующего в смешении, или начальную температуру, или конечную температуру.

2. Сколько надо прилить к $m_1 = 100$ г воды, находящейся при температуре $t_1 = 16^\circ$, воды при температуре $t_2 = 80^\circ$, чтобы окончательная температура смеси была равна $\theta = 40^\circ$. Обозначим $m_2 = x$ и составим уравнение:
 $1 \cdot x (80 - 40) = 1 \cdot 100 (40 - 16)$; $40x = 2400$; $x = 60$; $m_2 = 60$ г.

Уравнение теплового баланса применяется при решении многих вопросов.

1. На уравнении теплового баланса основывается вычисление удельной теплоёмкости вещества. В лабораторной работе VII

¹⁾ При составлении всех последующих калориметрических уравнений не принято в расчёт количество теплоты, пошедшее на нагревание воздуха, термометра и других тел, а также потеря теплоты путём излучения.

которая измерялась удельная теплоёмкость вещества по способу смешения. Вспомним ход работы: мы находили массу калориметра m_1 , массу воды, влитой в калориметр m_2 , массу исследуемого тела m ; затем нагревали исследуемое тело в грелке, измеряли начальную температуру воды и калориметра t_1 , начальную температуру исследуемого нагретого тела t , опускали испытуемое тело в воду калориметра и измеряли окончательную температуру θ .

Обозначим удельную теплоёмкость калориметра через c_1 , воды — через c_2 и испытуемого тела — через c .

Составим уравнение теплового баланса, считая, что $t_1 < \theta < t$:

Теплота, отданная остывающим телом:

$$Q = cm(t - \theta).$$

Теплота, полученная нагревающимися телами:

$$\begin{array}{l} \text{калориметром } Q_1 = c_1 m_1 (\theta - t_1); \\ \text{водой } Q_2 = c_2 m_2 (\theta - t_1). \end{array}$$

$$Q = Q_1 + Q_2; cm(t - \theta) = c_1 m_1 (\theta - t_1) + c_2 m_2 (\theta - t_1),$$

откуда

$$c = \frac{c_1 m_1 (\theta - t_1) + c_2 m_2 (\theta - t_1)}{m(t - \theta)} = \frac{(c_1 m_1 + c_2 m_2)(\theta - t_1)}{m(t - \theta)}.$$

Применим эту формулу к определению удельной теплоёмкости свинца, если $m_1 = 60$ г и калориметр сделан из латуни с удельной теплоёмкостью $c_1 = 0,09$; $m_2 = 200$ г; $t_1 = 16^\circ$; $m = 120$ г; $t = 100^\circ$; $\theta = 17,4^\circ$; $c = x$:

$$x \cdot 120 (100 - 17,4) = (0,09 \cdot 60 + 1 \cdot 200) (17,4 - 16);$$

$$120 \cdot 82,6x = 205,4 \cdot 1,4; 9912x = 287,56; x \approx 0,03; c = 0,03 \frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}.$$

2. Калориметрическим способом можно определить температуру тела (например определённой части пламени газовой горелки).

С этой целью берут какое-либо твёрдое тело (например кусок железа), находят его массу ($m = 100$ г) и помещают его в пламя газовой горелки. Во время прогревания железа находят массу калориметра m_1 (например 90 г, латунь) и массу воды, влитой в калориметр ($m_2 = 250$ г), и измеряют перед самым опусканием тела в калориметр начальную температуру воды и калориметра ($t_1 = 16^\circ$). Затем опускают нагретое тело в воду калориметра и измеряют окончательную температуру смеси ($\theta = 45^\circ$).

Удельная теплоёмкость железа $c = 0,1$; латуни $c_1 = 0,09$; воды $c_2 = 1$.

Обозначим искомую температуру нагретого тела перед погружением через x .

Теплота, отданная остывающим телом:

$$Q = ct(x - \theta).$$

Теплота, полученная нагревающимися телами:

$$\begin{aligned} \text{калориметром } Q_1 &= c_1 m_1 (\theta - t_1); \\ \text{водой } Q_2 &= c_2 m_2 (\theta - t_1). \end{aligned}$$

$$Q = Q_1 + Q_2; \quad ct(x - \theta) = (c_1 m_1 + c_2 m_2) (\theta - t_1);$$

$$0,1 \cdot 100 (x - 45) = (0,09 \cdot 90 + 1 \cdot 250) (45 - 16);$$

$$10x - 450 = 7484,9; \quad 10x = 7934,9; \quad x = 793,5; \quad t \approx 793,5^\circ.$$

Упражнение 3.

1. На примусе нагрето 2 л воды с 16° до 100° в 15 минут. Сколько теплоты поглощала вода каждую минуту (нагревание предполагается равномерным)?

Отв. 11,2 ккал.

2. Сколько нужно теплоты для нагревания 40 кг свинца с 10 до 320° ?

3. 1 кг железа остыл с 600° до 24° . Сколько теплоты выделилось?

4. В ванну налито 300 л воды при $t_1 = 10^\circ$. Сколько надо прилить в эту ванну горячей воды при $t_2 = 90^\circ$, чтобы получить температуру смеси $\theta = 35^\circ$?

Отв. 136 л.

5. Смешано 20 л воды при $t_1 = 12^\circ$ с 40 л при $t_2 = 80^\circ$. Определить окончательную температуру смеси, если во время смешения 100 ккал ушло в воздух.

Отв. $\approx 56^\circ$.

6. Определить удельную теплоёмкость латуни, если 400 г латуни при 100° опустили в 300 г воды при 14° и её температура поднялась до $23,5^\circ$.

7. Найти начальную температуру куска железа в 500 г, если при опускании его в 500 г воды при 10° окончательная температура стала равной $18,9^\circ$.

Отв. 100° .

8. Сколько нужно теплоты, чтобы нагреть воздух комнаты размером $10 \text{ м} \times 5 \text{ м} \times 3 \text{ м}$ с 7° до 16° , если потеря теплоты через стены составляет 10% ?

Отв. ≈ 465 ккал.

9. В каком отношении находятся количества теплоты, потребные для нагревания одинаковых объёмов меди и железа на одно и то же число градусов?

41. Теплота и работа. Ещё в конце XVIII в. были сделаны наблюдения, которые не могли быть объяснены теорией теплорода.

Румфорд в 1798 г. обратил внимание на то, что при сверлении пушечных жерл развивается значительное количество теплоты. Когда погружали просверливаемую металлическую болванку и сверло в воду, то вода через 2 часа нагревалась до кипения.

Попытки сторонников теплорода объяснить это нагревание тем, что стружки имеют меньшую удельную теплоёмкость и, следовательно, выделяют излишний теплород, были опровергнуты измерением: оказалось, что и сплошной кусок металла и стружки от него имеют одну и ту же удельную теплоёмкость.

Румфорд пришёл к заключению, что теплота сама по себе есть форма движения.

Дальнейший удар теории теплорода нанёс Дэви в 1799 г. Он производил трение двух кусков льда, помещённых при температуре -2° в безвоздушном пространстве. Куски льда от

трения плавилась. Удельная теплоёмкость воды больше удельной теплоёмкости льда; поэтому плавление нельзя было объяснить выделением теплорода; здесь теплота появлялась за счёт работы.

Не продолжая разбора этого вопроса в историческом порядке, мы можем теперь привести некоторые из многочисленных примеров возникновения теплоты при затрате работы и получении работы за счёт теплоты. В самом деле, естественно спросить, во что же превращается кинетическая энергия тела в тех случаях, когда нет дальнейших видимых перемещений тела или его частей, например, при падении неупругого тела на землю, при ударе молота о кусок железа, при движении с трением, при ударе пули о каменную стену и т. п. При ударе пули о стену слышен звук; но если подсчитать возникшую звуковую энергию, то она будет значительно меньше кинетической энергии пули. Исследование пули обнаружит повышение её температуры. Необходимая для нагревания теплота и возникает за счёт неиспользованной в других отношениях кинетической энергии летевшего тела. Таким переходом кинетической энергии в теплоту техника пользуется с очень давних времён: молотобоец превращает энергию своих мускулов в потенциальную энергию поднятого молота; при падении молота на кусок железа потенциальная энергия молота превращается в его кинетическую энергию. В момент удара, когда прекращается движение молота, его кинетическая энергия переходит в теплоту, и кусок железа, а также и молот нагреваются (часть кинетической энергии всё-таки переходит в иные формы: в звуковую энергию, потенциальную энергию упругих изменений в молоте, вызывающих его отскакивание, в энергию движения отбиваемых частей, в работу деформации ударяемого тела).

Во всех механизмах имеется или трение скольжения, или трение катания, поэтому во всех механизмах неизбежно часть кинетической энергии затрачивается на работу против сил трения и за счёт этой части развивается нагревание трущихся частей. Так нагреваются оси всех колёс; при плохой смазке, т. е. при значительном трении, даже возможно загорание букс; нагреваются рельсы, по которым проходит поезд; нагреваются при работе пилы, рубанки, свёрла, топоры и другие инструменты. Не только в механизмах работа, затрачиваемая на преодоление трения, превращается в теплоту. Всякое движущееся тело в сопротивляющейся среде теряет часть своей кинетической энергии и нагревается за счёт неё. Так называемые „падающие“ звёзды суть не что иное, как носящиеся в межпланетном пространстве частицы вещества, которые, попадая в земную атмосферу, встречают сопротивление своему движению, теряют часть своей кинетической энергии и за счёт этой энергии получают такое количество теплоты, что сгорают в воздухе блестящей вспышкой на высоте от 100 до 200 км; они оставляют за собой след раскалённого воздуха и

производят впечатление падающей звезды. Как было отмечено выше первобытный человек умел трением двух кусков дерева друг о друга добывать огонь, превращая механическую работу в теплоту.

Итак, частичное превращение кинетической энергии и работы в теплоту происходит при всяком движении с сопротивлением.

С другой стороны, теплота может превращаться в работу. Теплота солнца, нагревая воду или через посредство земли — воздух, совершает работу по поднятию паров воды и воздуха, по образованию тех восходящих течений в атмосфере, которые являются причиной ветра, его кинетической энергии и круговорота воды на земле.

Такой же переход теплоты в работу осуществляется при помощи машин, изобретённых человеком. Паровые машины и двигатели внутреннего сгорания непрерывно производят преобразование теплоты, заимствуемой ими из топлива, в работу и кинетическую энергию. Надо здесь же отметить, что теплота, сообщаемая телу, не целиком обращается в работу; часть теплоты рассеивается в пространстве. Тепловые машины в лучшем случае превращают в работу около трети подводимой к ним теплоты. Из курса физики VII класса известно, что электрическая энергия переходит в теплоту; сейчас мы установили, что теплота переходит в работу, и наоборот; в дальнейшем мы познакомимся с тем, что за счёт притока теплоты можно получить электрический ток, т. е. опять электрическую энергию.

Эти взаимные переходы различных видов энергии в теплоту и, обратно, теплоты в другие формы энергии приводят к заключению, что теплота есть энергия.

42. Механический эквивалент теплоты. Качественные наблюдения над взаимными переходами работы и теплоты не давали ещё основы для научной теории теплоты. Необходимо было выяснить, существует ли определённое количественное соотношение между затрачиваемым количеством работы и возникающим количеством теплоты, и обратно. Только определённая и постоянная этого соотношения могли обосновать положение, что теплота есть энергия.

Для характеристики этого соотношения вводится особая величина, называемая механическим эквивалентом теплоты.

Механический эквивалент теплоты есть величина, измеряемая тем количеством работы, которое надо затратить, чтобы получить единицу количества теплоты.

Если обозначить количество затраченной работы через A , количество теплоты, полученной за счёт этой работы, через Q , механический эквивалент теплоты через I , то

$$I = \frac{A}{Q}.$$

(V)

Немецкий врач Роберт Майер в 1842 г. один из первых определил (теоретически) механический эквивалент теплоты.

После него эта величина определялась многими физиками самыми разнообразными методами. Особенно много работал (около 10 лет) в этой области английский физик Джеймс Джоуль, начавший свои работы с 1840 г.

В настоящее время приняты как наиболее точные следующие значения для механического эквивалента теплоты:

$$I = 427 \frac{\text{кГм}}{\text{ккал}},$$

$$I = 4,19 \frac{\text{кдж}}{\text{ккал}}, \text{ или } 4,19 \frac{\text{дж}}{\text{кал}} \left(\text{округлённо } 4,2 \frac{\text{дж}}{\text{кал}} \right).$$

При обратном переходе теплоты в работу за счёт каждой превращённой в работу килокалории теплоты получается 427 кГм работы.

Величина, обратная механическому эквиваленту теплоты, называется термическим эквивалентом работы.

Термический эквивалент работы есть величина, измеряемая количеством теплоты, потребным для получения единицы работы.

Если для того, чтобы произвести A единиц работы, пошло Q единиц теплоты, то на единицу работы потребуется $\frac{Q}{A}$ единиц теплоты.

Если термический эквивалент работы обозначить буквою B , то:

$$B = \frac{Q}{A} = \frac{1}{I}.$$

$$B = 0,00234 \frac{\text{ккал}}{\text{кГм}}, \text{ или } B = 0,24 \frac{\text{ккал}}{\text{кдж}}, \text{ или } 0,24 \frac{\text{кал}}{\text{дж}}.$$

43. Определение механического эквивалента теплоты Джоулем. Одним из первых произвёл измерение механического эквивалента теплоты английский физик Джоуль (1847 г.). По способу Джоуля работа, затраченная на преодоление трения, превращается в теплоту. Для вычисления эквивалента надо вычислить произведённую работу и полученную теплоту. Теплота измеряется при помощи калориметра, который видоизменяется так, чтобы внутри него легко было создавать трение. С этой целью внутри калориметра проходит ось (рис. 41), к которой прикреплены лопатки a , по 4 в одной вертикальной плоскости; эти лопатки размещаются между приделанными к стенкам калориметра выступами (b). Калориметр заполняется жидкостью, например ртутью. При вращении лопатки приводят в движение ртуть, в которой при движении происходит трение, отчего жидкость нагревается. Термометром, вставляемым в калориметр, измеряется начальная температура t_1^0

и конечная $\mathcal{E}_2$. Для вращения оси наматывают на барабан A (рис. 42) два шнура в одинаковом направлении, сходящие с поверхности барабана в двух противоположных точках. На свободные концы шнуров, перекинутые через блоки D и C , привешены равные грузы F и E весом каждый P килограммов. При падении грузов оба шнура одновременно сматываются с барабана и вращают его в одинаковом направлении. Путь падения грузов h метров может быть измерен по масштабам B и G . Вследствие сопротивления падение грузов является равномерным. Если грузы общим весом $2P$ падают на пути h метров, то совершённая работа $A = 2Ph$.



Джоуль ¹⁾ (1818—1889).

При равномерном падении грузов затраченная работа превращается в теплоту через трение. Если обозначить массу ртути через m , массу калориметра, оси и лопаток — через m_1 , удельную теплоёмкость ртути — через c и удельную теплоёмкость металла — через c_1 , то количество полученной теплоты:

$$Q = mc(t_2 - t_1) + m_1c_1(t_2 - t_1) = (mc + m_1c_1)(t_2 - t_1);$$

отсюда можно вычислить:

$$I = \frac{A}{Q} = \frac{2Ph}{(mc + m_1c_1)(t_2 - t_1)}.$$

44. Распространение закона превращения и сохранения энергии на тепловые явления. Итак, в явлениях природы постоянно происходит взаимное преобразование механической и тепловой энергии. Тщательные научные измерения показали, что эти переходы постоянно происходят в определённых соотношениях.

Механическая энергия в количестве 427 кГм оказывается равновеликой или эквивалентной одной килокалории теплоты (4,19 дж эквивалентны 1 кал).

¹⁾ Дж. П. Джоуль экспериментально определил механический эквивалент теплоты, открыл закон превращения энергии электрического тока в тепловую, вычислил скорость движения молекул водорода и тем положил основание кинетической теории газов; вместе с В. Томсоном экспериментально доказал, что между частицами газа действуют притягательные силы; получил очень сильные магнитные поля при помощи электромагнита, наблюдал удлинение железных и никелевых стержней при их намагничивании.

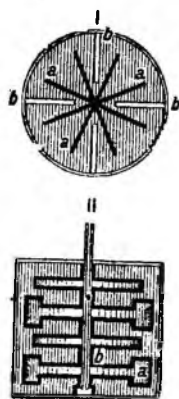


Рис. 41. I — горизонтальный, II — вертикальный разрез калориметра Джоуля.

Таким образом эти измерения показали, что при взаимных переходах обеих форм энергии не происходит ни потери, ни создания энергии.

Изучение с этой точки зрения тепловых явлений позволяет обобщить закон сохранения энергии в механических процессах и на случай тепловых явлений.

Это обобщение закона было сделано в трудах великих физиков: Роберта Майера (1842), Джоуля (1845), Гельмгольца (1847), Вильяма Томсона (1848).

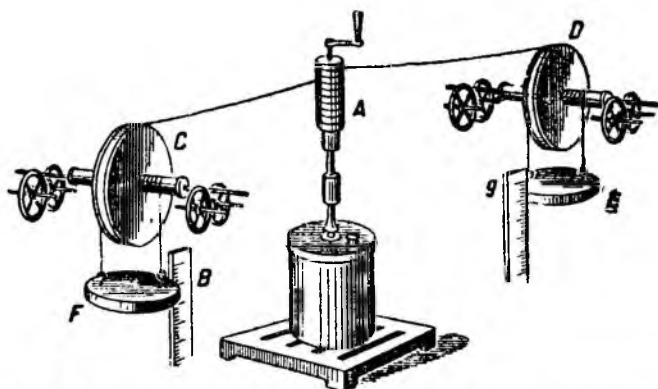


Рис. 42. Установка опыта Джоуля для определения механического эквивалента теплоты.

В общем виде закон превращения и сохранения энергии может быть выражен следующими словами:

В явлениях природы энергия не исчезает и не создаётся, а только превращается из одной формы в другую в равновеликих количествах.

Закон превращения и сохранения энергии имеет большое методическое значение. Постоянное применение этого закона к разбору отдельных частных явлений создаёт уверенность в неизменной закономерности всех явлений природы и воспитывает строго научное направление мысли.

Научное направление мысли служит лучшей опорой в борьбе с религиозным отношением к миру. Религия предполагает наличие существа, вмешивающегося в явления природы, действующего

на жизнь человека и ход явлений природы. Отсюда во всех религиях — вера в чудо как в проявление воли этого существа. Мысль, воспитанная на всеобщем характере закона сохранения энергии, на закономерности всех явлений природы, не найдёт места в природе



Гельмгольц ¹⁾ (1821—1894).



Майер ²⁾ (1814—1878).

для признания бога и для чуда и тем самым выбивает почву из-под основы религии — учения о высшем существе с проявлением его воли — чудом.

Дальнейший шаг в изучении природы теплоты можно сделать на основании данных о молекулярном строении вещества.

¹⁾ Герман Гельмгольц родился в Потсдаме близ Берлина. Врач по образованию, он с 1849 г. был профессором физиологии и анатомии в Кёнигсберге. Своими выдающимися работами в области физиологии и затем физики он выдвинулся на первое место среди физиков второй половины XIX в. В 1847 г. он теоретически установил основной закон природы — закон сохранения энергии. Опираясь на него, он вывел закон электромагнитной индукции. Определил величину элементарного электрического заряда. Разработал теорию вихревого движения в жидкости, которая была положена в основу учения о циклонах и погоде в метеорологии. Создал учение о восприятии звуков и цветов. В частности в учении о звуке обосновал современное учение о резонансе, дал объяснение тембра звука, диссонанса и консонанса звуков, произвёл при помощи изобретённых им резонаторов анализ гласных звуков, а затем при помощи камертонов и синтез звуков. Он изобрёл офтальмоскоп — прибор для определения кривизны различных поверхностей глаза, ставший принадлежностью врачебных кабинетов, развил учение об аккомодации глаза и создал теорию восприятия цветов. Он доказал, что возбуждение в нерве распространяется с большой скоростью, однако не бесконечно быстро, как думали до него. В своей работе о геометрических аксиомах он отстаивал ту мысль, что аксиомы являются результатом многовекового человеческого опыта.

²⁾ Роберт Майер, врач по образованию, за год до Джоуля и за пять лет до Гельмгольца формулировал закон сохранения энергии и вычислил в 1842 г. теоретически механический эквивалент теплоты.

45. Лабораторная работа 4. Определение удельной теплоёмкости вещества.

Приборы: 1) калориметр; 2) весы с разновесом; 3) термометр; 4) грелка; 5) куски различных металлов и колбы с жидкостями.

Задание 1. Определить удельную теплоёмкость вещества в твёрдом состоянии.

Ход работы. 1. Найдите массу исследуемого тела.

2. Запишите массу, а затем и другие данные в таблицу:

№ опыта	Масса калориметра без воды	Масса калориметра с водой	Масса воды	Масса тела	Температура воды и калориметра	Температура тела	Окончательная темп. смеси	Удельная теплоёмкость	Погрешности, выраженные в %

3. Привязав к испытываемому телу нитку, погрузите его в грелку, где и держите 10—15 минут.

4. Найдите массу калориметра (внутреннего сосуда).

5. Взвесьте калориметр с водой и определите массу воды.

6. Вставьте внутренний цилиндр калориметра во внешний.

7. Помешивая мешалкой воду в калориметре, определите температуру воды и калориметра.

8. Тотчас после определения температуры воды в калориметре, заметив температуру в грелке, быстро выньте тело из грелки и опустите его в калориметр.

9. Помешивая воду в калориметре мешалкой, заметьте наивысшую температуру; это будет окончательная температура.

10. По полученным данным вычислите удельную теплоёмкость вещества.

11. Сравните полученный результат с данными в таблице и выразите погрешность результата в % от табличных данных.

12. Прodelайте измерение с другими телами.

Задание 2. Определить удельную теплоёмкость какой-либо жидкости.

1. Найдите массу куска металла, удельная теплоёмкость которого известна.

2. Массу и другие данные работы запишите в таблицу. Схему записи составьте самостоятельно.

3. Взвесьте внутренний сосуд калориметра.

4. Налейте в калориметр столько жидкости, чтобы взятый кусок металла мог быть целиком погружён в жидкость, и найдите её массу в граммах.

5. Определите температуру жидкости, осторожно помешивая её мешалкой непосредственно перед опусканием нагретого тела в калориметр.

6. Тотчас после определения температуры жидкости, заметив температуру в грелке, быстро выньте из грелки нагретое тело и погрузите его в жидкость.

7. Помешивая мешалкой жидкость с погружённым телом, определите окончательную температуру.

8. Вычислите удельную теплоёмкость жидкости.

9. Сравните полученный результат с данными таблицы и найдите ошибку, выраженную в %.

46. Лабораторная работа 5. Определение температуры сильно нагретого тела калориметрическим способом.

Приборы: 1) калориметр; 2) весы с разновесом; 3) небольшой кусок металла (50—100 г железа); 4) проволока, согнутая на конце так, что при помощи её можно удерживать кусок металла; 5) термометр.

1. Взвесьте внутренний цилиндр калориметра и результат запишите в таблицу:

№ опыта	Масса калориметра	Масса калориметра с водой	Масса воды	Температура воды	Масса куска металла	Удельная теплоёмкость металла	Температура смеси	Температура нагретого тела

2. Налейте в калориметр холодной воды.

3. Взвесьте калориметр с водой и определите массу воды.

4. Взвесьте кусок металла.

5. Возьмите кусок металла проволокой, поместите его в пламя горелки или спиртовки.

6. Нагревайте несколько минут.

7. Определите температуру воды в калориметре, помешивая её мешалкой.

8. Тотчас после определения температуры воды подвиньте калориметр поближе к горелке и быстро перенесите в воду нагретый кусок металла.

9. Отодвиньте калориметр и определите окончательную температуру, помешивая воду мешалкой.

10. Какова температура металла перед погружением?

47. Источники теплоты. Мы видели, что теплота может быть получена за счёт затраченной работы. Удар, трение, сжатие, гнутие и другие механические действия превращают механическую энергию в теплоту.

Значительная часть теплоты получается за счёт лучистой энергии. Лучистой энергией называется энергия, испускаемая в виде лучей всяким телом при любой температуре. Когда температура тела станет выше 500° , часть испускаемой им лучистой энергии начинает действовать на глаз и воспринимается как свет (в этом случае — как красный свет). При температуре около 1200° та часть испускаемой энергии, которая действует на глаз, производит впечатление белого света. Испускаемая телами лучистая энергия кроме светового действия производит ещё и другие действия, описанные в третьей части курса.

Когда какая-либо часть лучистой энергии, испускаемой одним телом, поглощается другим телом, на которое она падает, она в значительном большинстве случаев превращается в теплоту, нагревая поглощающее её тело.

Земля получает лучистую энергию в громадном количестве от Солнца. В наших широтах на 1 см^2 земной поверхности, помещённой перпендикулярно к солнечным лучам, в среднем падает в 1 мин. около 1 малой калории, или $4,19 \text{ дж}^1$). Можно представить себе, как велико всё количество лучистой энергии, падающей на всю земную поверхность за год. Сравнительно с солнечным излучением количество лучистой энергии, получаемой от других солнц-звёзд, ничтожно 2). Приблизительно такое же количество солнечной лучистой энергии, которое достигает Земли, поглощается воздухом на всём протяжении атмосферы.

Часть полученной от Солнца лучистой энергии, и притом значительная, пропадает бесполезно для людей и Земли: она отражается от Земли, уходя обратно в пространство.

Другая часть поглощается Землёй и превращается в ней в теплоту; за счёт этой поглощённой Землёй солнечной энергии поддерживается средняя годовая температура земной поверхности около 15° . Теплота, полученная за счёт поглощённой лучистой энергии, вызывает испарение воды, поднятие водяных паров вверх и поддерживает тот круговорот воды на земной поверхности, одну из частей которого составляет течение воды в земных ручьях, реках. Она же создаёт тот круговорот в атмосфере, который проявляется в форме ветров.

Кинетическая энергия текущей воды и ветра обязана своим воз-

¹) На границу атмосферы падает $1,94 \frac{\text{кал}}{\text{см}^2 \text{ мин}}$ (солнечная постоянная*).

²) Совместное излучение на Землю всех звёзд и планет составляет $\frac{1}{30\,000\,000}$ долю солнечной радиации (по Ньюкомбу). Приток тепла из внутренней части Земли доставляет каждому квадратному сантиметру поверхности только 55 малых калорий в год, примерно десятитысячную долю солнечного излучения, падающего на ту же площадь.

никновением теплоте, получившейся от поглощённой Землёй лучистой энергии Солнца.

Гидравлическая мощность (мощность текущей воды) на земном шаре около 800 000 000 л. с. Человек в своей производственной деятельности широко пользуется, а в дальнейшем будет ещё шире пользоваться для приведения в движение машин кинетической энергией воды и ветра. Следовательно, можно сказать, что он в своих ветряных и водяных установках использует в конечном счёте солнечную энергию.

Теплота, в которую превратилась поглощённая солнечная лучистая энергия, отчасти сама превращается в лучистую энергию и излучается Землёй обратно в мировое пространство, что выражается в понижении температуры Земли в те промежутки времени, когда сокращается или прекращается падение на Землю солнечной энергии, т. е. зимой и ночью.

Небольшая, сравнительно с предыдущей, часть падающей на Землю лучистой энергии превращается ещё в иной вид энергии — в химическую энергию.

Химической энергией называется энергия, проявляющаяся при химических превращениях веществ. Например, распад молекулы углекислого газа на составные части требует сообщения ей значительного количества энергии (около 8000 кал на каждый грамм углерода). Поэтому 1 атом углерода и 2 атома кислорода, способные соединиться друг с другом, обладают запасом энергии (вида потенциальной энергии), которая называется химической. Для отделения друг от друга атомов водорода и атомов хлора требуется затрата 600 кал на каждый грамм хлористого водорода. Атом водорода и атом хлора, имеющие стремление соединиться, обладают запасом химической энергии. Во время их соединения при образовании каждого грамма хлористого водорода химическая энергия превращается в теплоту, и выделяется 600 кал. Так и в других химических явлениях или извне поглощается энергия и превращается в химическую энергию вновь образованных тел, или, наоборот, тела отдают свою химическую энергию, превращая её преимущественно в теплоту (а через неё — в другие формы энергии).

В химическую энергию превращается и та третья часть лучистой энергии, о которой говорилось выше.

Лучистая энергия, поглощаемая зёрнами хлорофилла, вещества, придающего зелёную окраску листьям растений, производит распад молекулы углекислого газа, находящегося в воздухе. При этом кислород выделяется, а углерод отлагается в растениях, образуя белки, жиры, углеводы. Вследствие сродства между углеродом и кислородом эти тела становятся носителями химической энергии в той мере, в какой затрачена лучистая энергия на их образование.

Когда создаются условия, благоприятствующие соединению атома углерода с двумя атомами кислорода, т. е. начинается так

называемое горение, то химическая энергия этой пары тел обращается в теплоту с выделением свыше 8000 кал на каждый грамм сгоревшего углерода.

На большой химической энергии углерода и лёгкой превращаемости её в теплоту основывается использование углеродных соединений в качестве топлива. Техника пользуется как топливом дровами, торфом, углём и нефтью, горючими сланцами. Торф, уголь и нефть получают в результате медленных химических процессов в отживших растениях, а нефть — и в животных, в условиях недостатка кислорода и при значительном давлении. Основное горючее вещество их содержит запас химической энергии, получившейся от накопленной некогда лучистой солнечной энергии.

Таким образом, подобно энергии воды и ветра, и энергия топлива представляет собой преобразованную солнечную энергию.

Но растения усваивают ничтожную часть падающей на них солнечной энергии. В период бурного роста растения зелёный лист может осваивать как наибольший предел 8% падающего на него излучения (8% — физиологический предел). В среднем усвоение излучения понижается до 2% излучения (2% — технический предел усвоения). По отношению же ко всей суше, а не только к площади, покрытой растительностью, процент использования спускается до 0,15.

Всё солнечное излучение ($1,34 \cdot 10^{24}$ кал на всю Землю в год) и его использование растениями может быть представлено следующей диаграммой¹⁾ (рис. 43).

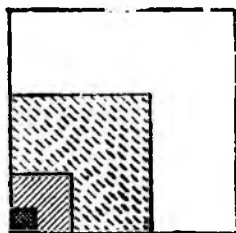


Рис. 43. Использование солнечной энергии

Вся площадь квадрата изображает полную солнечную энергию, падающую на сушу; прерывистые штрихи означают ту часть энергии, которая была бы усвоена зелёными листьями растений, если бы их к. п. д. был 100%; сплошные штрихи определяют, сколько зелёный лист усваивает в период бурного роста при самых благоприятных условиях; маленький чёрный квадратик изображает, какая доля падающей солнечной энергии усваивается растениями (2%) в среднем. Если же учесть, что значительная часть суши покрыта пустынями, то к. п. д. растительности суши упадёт до 0,15%.

Впрочем, до сих пор энергия, усваиваемая растениями на земном шаре, превосходит почти в 10 раз энергию, получаемую человеком от топлива и падающей воли.

Через растения солнечная энергия совершает ещё и другой путь превращения. Растения служат пищей животных, и запасённая в них солнечная энергия превращается в энергию животного орга-

¹⁾ Из книги В. М. Шулгина „Энергия Солнца“.

низма. Хищные животные черпают свою энергию из запасов солнечной энергии в теле тех животных, которыми они питаются. Сам человек с его двоякого рода пищей — растительной и животной — получает свою энергию из обоих источников. Таким образом, в живом организме происходит следующий ход преобразований энергии. В него поступает солнечная лучистая энергия в виде химической энергии углеродистых соединений растительной или животной пищи. Эти углеродистые соединения окисляются за счёт вдыхаемого кислорода; при этом химическая энергия превращается во внутреннюю энергию организма. Последняя превращается в энергию жизненных процессов самого организма (дыхания, сердцебиения и др.); значительная часть её тратится на излучение в пространство (для её уменьшения служат одежда и жилище), на нагревание вдыхаемого воздуха, на испарение воды с поверхности тела. И только малая часть полученной телом энергии ($15\text{—}20\%$)¹⁾ превращается в полезную работу, совершаемую человеком для обслуживания своих производственных потребностей.

48. Теплотворная способность топлива и пищи. Каждый килограмм горючего, сгорая, выделяет определённое число килокалорий. Это число называется теплотворной способностью топлива. Точно так же каждый килограмм пищи, сгорая внутри или вне организма, выделяет определённое число килокалорий. Последнее число называется теплотворной способностью, или калорийностью, пищи.

Теплотворной способностью топлива называется то число килокалорий, которое выделяет 1 кг топлива при сгорании.

Теплотворной способностью пищи называется то число килокалорий, которое выделяет 1 кг пищи при сгорании.

Если обозначить количество сжигаемого топлива через m , теплотворную способность топлива — через q и количество полученной от сжигания топлива теплоты — через Q , то количество теплоты вычисляется как произведение теплотворной способности на массу топлива, т. е.

$$Q = qm.$$

Для сравнения различных сортов топлива между собой устанавливается так называемое условное топливо с теплотворной способностью в $7000 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$.

В следующей таблице²⁾ даны теплотворные способности различных видов топлива и их сравнение с условным топливом (калорийные эквиваленты).

¹⁾ В короткие промежутки времени может превращаться в работу и большее количество.

²⁾ Таблица составлена по данным „Справочника технической энциклопедии“, т. III.

Вид топлива	Марка	Теплотворная способность в килокалориях на 1 кг	Эквивалент
Условное топливо	—	7 000	1,00
Донецкий каменный уголь	К	7 005	1,00
антрацит	АП	7 230	1,03
Подмосковный бурый уголь	С	3 000	0,43
Челябинский	—	4 755	0,68
Кузнецкий (Ленинский)	—	6 765	0,98
Сучанский	—	6 970	0,99
Дрова	—	3 005	0,43
Торф (в среднем для разных районов)	—	3 500	0,50
Нефть сураханская	—	10 900	1,50
балахинская	—	10 500	—
Бензин	—	11 230	—
Керосин	—	11 000	—
Машинное масло	—	10 899	—
Горючие газы	—	8000—9000	—

Упражнение 4.

1. Проследить возможный ряд превращений солнечной энергии, идущей на поверхность озера.

2. Проследить возможный ряд превращений энергии дождевого облака, дающего дождь в верховьях реки Волхова.

3. Найти коэффициент полезного действия примуса, если на доведение до кипения 3 л воды, бывших при температуре $t = 16^\circ$, налитых в медную кастрюлю с массой в 1 кг, понадобилось 80 г керосина. Удельная теплоёмкость меди равна $0,09 \frac{\text{кал}}{\text{г.град}}$. Отв. $\approx 29,5\%$.

4. Паровоз затрачивает 1,5 кг кузнецкого угля в 1 час на каждую лошадиную силу. Найти η — коэффициент полезного действия паровоза. Отв. $\approx 6\%$.

5. Вычислить расход нефти (теплотворная способность 10 500) на 1 час работы паровой машины в 240 л. с. при $\eta = 12\%$. Отв. ≈ 120 кг.

6. На сколько километров пути хватит автобусу 10 кг бензина (теплотворная способность 11 200), если коэффициент полезного действия $\eta = 15\%$; вес автобуса 3000 кг, а коэффициент трения по шоссе 0,02? Отв. ≈ 120 км.

7. Автомобиль в 40 л. с. при $\eta = 20\%$ имеет запас бензина в 16 кг (тепл. спос. 11 200). На сколько километров пути хватит этого запаса при скорости $60 \frac{\text{км}}{\text{час}}$? Отв. ≈ 85 км.

8. Свинцовая пуля летит со скоростью в $200 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$. На сколько градусов она нагреется, если сразу остановится и вся энергия пойдёт на её нагревание? Удельная теплоёмкость свинца равна $0,03 \frac{\text{кал}}{\text{г.град}}$. Отв. $\approx 160^\circ$.

9. Сколько стоит нагревание литра воды от 20° до 100° в кипяльнике с массой в 1,5 кг, с удельной теплоёмкостью $0,12 \frac{\text{кал}}{\text{г.град}}$ и коэффициентом полезного действия в 60%, если 1 гвт-ч стоит 2,5 коп.?

10. При высверливании отверстия в чугунной болванке налитая в отверстие вода в количестве 5 кг при $t = 10^\circ$ через 5 мин. закипела. Найти мощность сверлильного станка в лошадиных силах (пренебрегая потерями теплоты).

Отв. 8,5 л. с.

11. Поезд весом в 490 000 кг, шедший со скоростью $45 \frac{\text{км}}{\text{час}}$, останавливается тормозами. Какое количество теплоты при этом развилось?

Отв. ≈ 9148 ккал.

12. Давление пара в цилиндре паровой машины равно $p = 9 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$.

Площадь поршня $s = 300 \text{ см}^2$, ход поршня $l = 100 \text{ см}$; число оборотов махового колеса равно 60 в минуту; коэффициент полезного действия машины $\eta = 12\%$. Определить количество нефти с теплотворной способностью в $10\,000 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$, потребляемой в 1 час: а) всей машиной, б) на каждую лошадиную силу, учитывая, что за оборот колеса поршень делает 2 хода.

Отв. $\approx 3,8$ кг.

13. Найти коэффициент полезного действия дизель-мотора, если он потребляет на 1 л. с. в 1 час 0,2 кг нефти с теплотворной способностью

в $10\,000 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$.

Отв. $\approx 0,3$.

14. Скольким лошадиным силам равна мощность потока, в котором в 1 секунду протекает $5,6 \text{ м}^3$ воды со скоростью в $2,4 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$, и какое количество теплоты в секунду понадобилось бы для создания такой мощности?

Отв. ≈ 22 л. с.

15. Вычислить коэффициент полезного действия пулемёта Максима, имеющего заряд пороха в каждом патроне 3,2 г, пулю массой в 9,6 г и начальную скорость пули при вылете из дула $880 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$. Теплотворная

способность пороха $900 \frac{\text{кал}}{\text{г}}$.

Отв. $\approx 31\%$.

16. Скольким калориям равноценна работа в 1 л. с.-час?

Отв. ≈ 632 ккал.

17. Найти мощность примуса в лошадиных силах, если на нём в 10 мин. нагрели $2 \frac{1}{2}$ л воды от 0° до 100° , считая, что вся теплота пошла на нагревание.

18. Сколько стоит вскипятить в алюминиевой кастрюле массой в 500 г воды, взятой при 0° , если коэффициент полезного действия примуса 30% , плотность керосина $0,8 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$, его теплотворная способность

$11\,000 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$ и стоимость 47 коп. за 1 л, а удельная теплоёмкость алюминия $0,22 \frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}$?

19. При заряде бездымного пороха в 3,2 г в нашем 7,62 мм винтовочном патроне с пулей образца 1908 г. весом в 9,6 г полная энергия равна 1366 кгм. Из неё только 362 кгм идут на сообщение пуле начальной скорости.

а) Найти коэффициент полезного действия винтовки.

б) На что идёт бесполезно затрачиваемая работа?

в) Какова мощность винтовки, если время движения пули по каналу ствола $t = \frac{1}{680}$ сек.?

- г) Какова калорийность бездымного пороха?
д) Каково среднее ускорение в канале ствола? (Какие данные надо иметь для решения последнего вопроса?)

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСВОЕНИЯ.

1. Что такое калория и килокалория?
2. Что такое удельная теплоёмкость вещества?
3. Каково наименование единиц удельной теплоёмкости вещества?
4. Что такое теплоёмкость тела?
5. Как вычислить количество теплоты, потребное для повышения температуры данной массы тела на данное число градусов?
6. Какова формула количества теплоты, потребного для нагревания тела или отдаваемого им при его остывании?
7. Что такое калориметрическое уравнение и на чём основано его составление?
8. Как вычислить температуру смеси двух количеств воды и какие для этого нужны данные?
9. Как вычислить удельную теплоёмкость вещества, какие для этого нужны данные и как их можно получить?
10. Какие явления служат основанием для признания, что теплота есть вид энергии?
11. Что называется механическим эквивалентом теплоты?
12. В каких единицах разных систем выражается механический эквивалент теплоты?
13. Что называется термическим эквивалентом работы?
14. В каких единицах разных систем выражается термический эквивалент работы?
15. В чём состоит способ Джоуля для определения механического эквивалента теплоты?
16. В чём состоит закон превращения и сохранения энергии? Приведите примеры проявления этого закона.
17. Что такое теплотворная способность топлива?
18. В каких единицах выражается теплотворная способность топлива?
19. Что такое условное топливо?
20. Как рассчитывается и какой формулой выражается количество теплоты, получаемой при сжигании топлива?

2. Расширение тел от нагревания.

49. Линейное и объёмное расширение тел. Многочисленные опыты показывают, что различные вещества по-разному изменяют свои размеры от изменения температуры при прочих одинаковых условиях. Например, если склепать на концах одинаковые по размерам железную и медную пластинки (рис. 44), то при нагревании они примут изогнутую форму с медью на выпуклой стороне, при охлаждении — с медью на вогнутой. Этот опыт показывает, что медь и железо расширяются по-разному.

Так как расширяемость различных веществ различна, то для характеристики этого свойства вводятся особые величины, называемые коэффициентами расширения.

Так как твёрдые тела могут быть сделаны в форме проволок, стержней, балок труб, рельс и в других подобных формах, для

которых размер в одном направлении (длина) может быть чрезвычайно велик сравнительно с размерами по другим направлениям (толщиной и шириной), то по отношению к твёрдым телам можно принимать в расчёт при повышении температуры отдельно линейное расширение — изменение размера по одному направлению.



Рис. 44. Изгибание пластинки, склепанной из железа и меди, при нагревании и охлаждении.

Их в сосудах можно наблюдать только так называемое кажущееся объёмное расширение — разность между истинным объёмом жидкости, соответствующим данной изменённой температуре, и объёмом, который принял сосуд при той же температуре. Истинное расширение жидкости может быть вычислено по этим данным.

50. Лабораторная работа 6. Измерение коэффициента линейного расширения твёрдого тела.

Приборы: 1) прибор Лермантова (рис. 45); 2) несколько металлических трубок длиной около метра, имеющих на одном



Рис. 45. Прибор Лермантова для измерения коэффициента линейного расширения.

конце пластинку, прикреплённую перпендикулярно к трубке; 3) метровый масштаб с делениями на миллиметры; 4) толстостер; 5) колба; 6) треножник; 7) горелка; 8) резиновые трубки; 9) стакан для стока воды; 10) термометр (общий для всех групп).

Ход работы. 1. Измерьте по масштабу с точностью до 1 мм первоначальную длину трубки l_0 от одного конца до пластинки, заметьте начальную температуру t_1° трубки (комнатную) и занесите данные в таблицу.

2. Вставьте трубку в станок так, чтобы пластинки трубки (А) и станка (В) были сближены; другой конец трубки зажмите винтом С на второй пластинке станка. Измерьте толстостером рас-

Для всех остальных твёрдых тел, не имеющих преобладающего размера по какому-либо одному направлению, а также для жидкостей и газов, всегда заключённых в сосуды, рассматривается объёмное расширение — изменение объёма.

Что касается расширения жидкостей, то при нагревании

стояние между наружными краями двух пластинок A и B и запишите показание толстомера в таблицу.

3. Налейте в колбу заранее приготовленной горячей воды, соедините колбу резиновой трубкой с металлической трубкой, доведите воду в колбе до кипения и пропускайте пар через трубку, собирая воду из трубки в стакан.

4. По прошествии, примерно, минут 10 от начала кипения, когда можно рассчитывать, что трубка приняла температуру кипящей воды ¹⁾, измерьте толстомером расстояние между наружными краями пластинок и запишите его показание в таблицу. Также запишите в таблицу конечную температуру трубки t_2° , приняв её за температуру кипящей воды, т. е. за 100° ²⁾.

5. Вычитая из конечного показания толстомера начальное, узнайте удлинение всего стержня; вычислите изменение температуры стержня во время опыта.

6. Рассчитайте удлинение стержня при нагревании на 1° .

7. Рассчитайте удлинение каждой единицы начальной длины при нагревании на 1° .

Вещество трубки	Начальная температура t_1°	Начальная длина l_0	Начальное по- казание тол- стомера	Конечная тем- пература t_2°	Конечное по- казание тол- стомера	Приращение длины Δl	Изменение температуры $t = t_2 - t_1$	Приращение длины при на- гревании на 1° $\frac{\Delta l}{t}$	Приращение единицы дли- ны при нагрее- вании на 1° $\frac{\Delta l}{l_0}$	Погрешность в $\%$

8. Сравните вычисленный коэффициент с табличным и определите погрешность в $\%$. При этом помните, что за начальную длину в опыте была принята длина при комнатной температуре, а не при 0° .

9. Прodelайте опыт с трубкой из другого вещества.

51. Формула коэффициента линейного расширения твёрдых тел. Если бы в нашем распоряжении были данные, что железный стержень длиной в 1,5 м при нагревании от 0° до 20° удлинился на 0,36 мм, а медный стержень длиной в 1,2 м при нагревании от 0° до 15° удлинился на 0,31 мм, то непосредственно по числам абсолютного расширения 0,36 и 0,31 мм мы не могли бы сравнить расширяемость того и другого вещества. Сравнение стало бы возможным, если бы мы отнесли изменение длины к одинаковой на-

¹⁾ Чтобы убедиться в этом, можно делать повторные измерения толстомером расстояния между пластинками. Когда это расстояние перестанет изменяться, трубка прогрелась до температуры кипения.

²⁾ Для устранения остывания трубка обматывается сукном.

чальной длине и к одинаковому изменению температуры. Рассчитаем, на какую часть метра изменяется длина каждого метра того и другого вещества при нагревании на 1° :

$$\text{для железа: } \frac{0,00036 \text{ м}}{1,5 \text{ м} \cdot 20 \text{ град}} = 0,000012 \frac{1}{\text{град}}$$

$$\text{для меди: } \frac{0,00031 \text{ м}}{1,2 \text{ м} \cdot 15 \text{ град}} = 0,000017 \frac{1}{\text{град}}.$$

Этот расчёт показывает большую расширяемость меди. Полученные величины носят название коэффициентов линейного расширения.

Коэффициентом линейного расширения называется число, показывающее, на какую часть изменяется каждая единица первоначальной длины, взятой при 0° , от нагревания на 1° .

Измерение коэффициентов линейного расширения твёрдых тел производится по следующей схеме. Измеряется длина l_0 стержня из испытуемого вещества при 0° . Затем измеряется его длина l_t при температуре t° . Разность $l_t - l_0$ даёт приращение длины всего стержня от нагревания на t° ; частное $\frac{l_t - l_0}{t}$ даёт приращение длины всего стержня от нагревания на 1° ; частное же $\frac{l_t - l_0}{l_0 t}$ показывает, на какую часть изменяется каждая единица начальной длины при 0° от нагревания на 1° , т. е. коэффициент линейного расширения. Если обозначить коэффициент линейного расширения через α , то

$$\alpha = \frac{l_t - l_0}{l_0 t}.$$

Коэффициенты линейного расширения твёрдых тел, как показывает следующая таблица, очень малы¹⁾:

Железо	0,000012	Платина	0,000009
Латунь	0,000019	Сталь	0,000011
Медь	0,000017	Стекло	0,000010

52. Формула длины тела при любой температуре. Из формулы для коэффициента линейного расширения $\alpha = \frac{l_t - l_0}{l_0 t}$ можно найти, что $l_t = l_0 + \alpha t l_0$, или:

$$l_t = l_0 (1 + \alpha t). \quad (VI)$$

¹⁾ При нагревании на 1° в разных пределах, например от 0° до 1° или от 50° до 51° , или от 100° до 101° , получаются несколько различные друг от друга числа для коэффициентов. Следовательно, истинный коэффициент расширения зависит от температуры. Коэффициенты, приведённые в таблице, средние.

Двучлен $1 + \alpha t$ называется биномом линейного расширения. Отсюда, длина при любой температуре равна длине при 0° , умноженной на бином линейного расширения.

По этой формуле можно вычислить любую из четырёх величин l_t , l_0 , α , t , если даны три остальные.

Примеры. 1. Стальная балка при $t_1 = 15^\circ$ имеет длину $l_{15} = 10,5$ м; найти её длину l_{50} при $t_2 = 50^\circ$.

Решение в общем виде:

$$\begin{aligned} l_{t_1} &= l_0 (1 + \alpha t_1); \quad l_{t_2} = l_0 (1 + \alpha t_2); \\ l_{t_2} &= \frac{l_{t_1} (1 + \alpha t_2)}{1 + \alpha t_1}; \quad l_{t_2} \approx l_{t_1} [1 + \alpha (t_2 - t_1)]^1); \\ l_{50} &= 10,5 (1 + 0,000011 \cdot 35) = 10,504 \text{ м.} \end{aligned}$$

2. На сколько изменяется длина стального моста длиной $l_0 = 400$ м при 0° при изменении температуры от $t_1 = -20^\circ$ до $t_2 = +40^\circ$?

$$\begin{aligned} l_{t_2} &= l_0 (1 + \alpha t_2); \quad l_{t_1} = l_0 (1 + \alpha t_1); \quad l_{t_2} - l_{t_1} = l_0 \alpha (t_2 - t_1); \\ l_{40} - l_{-20} &= 400 \cdot 0,000011 \cdot 60 = 0,264 \text{ м.} \end{aligned}$$

53. Формула коэффициента объёмного расширения тел. Коэффициентом объёмного расширения называется число, показывающее, на какую часть изменяется каждая единица первоначального объёма, взятого при 0° , от нагревания на 1° .

Чтобы измерить коэффициент объёмного расширения, надо измерить объём V_0 при 0° и V_t при t° . Тогда разность $V_t - V_0$ даёт приращение объёма от нагревания на t° . Частное $\frac{V_t - V_0}{t}$ даёт приращение всего объёма от нагревания на 1° . Частное же $\frac{V_t - V_0}{V_0 t}$ показывает, какую часть единицы объёма при 0° составляет изменение единицы объёма от нагревания на 1° , т. е. коэффициент объёмного расширения. Если обозначить коэффициент объёмного расширения через β , то:

$$\beta = \frac{V_t - V_0}{V_0 t};$$

таким способом вычисляются коэффициенты объёмного расширения для жидкостей и газов.

При охлаждении на 1° каждая единица длины или объёма уменьшается на величину, равную численно линейному или объёмному коэффициенту.

Для твёрдых тел объёмные коэффициенты могут быть вычислены. Легко показать, что для всякого твёрдого вещества коэффициент

¹⁾ При делении $1 + \alpha t_2$ на $1 + \alpha t_1$ частное ограничено двумя членами.

объёмного расширения втрое больше коэффициента линейного расширения.

В самом деле, если вырезать из твёрдого тела куб (рис. 46) с ребром, равным единице длины при 0° , то его объём при 0° будет равен 1. При нагревании на 1° длина каждого ребра удлинится на α и станет равной $1 + \alpha$, а весь объём увеличится на β и станет равным $1 + \beta$. Тогда по формуле объём куба:

$$1 + \beta = (1 + \alpha)^3;$$

$$1 + \beta = 1 + 3\alpha + 3\alpha^2 + \alpha^3.$$

Так как коэффициенты линейного расширения всех твёрдых тел не превосходят сотых долей единицы, то их квадраты (α^2) и кубы (α^3) будут выражаться в долях единицы, выходящих за пределы точности наблюдений; при вычислениях такие доли обыкновенно отбрасываются. Вместо того, чтобы

это отбрасывание делать в отдельных вычислениях, можно заранее отбросить соответствующие члены формулы. Тогда

$$\beta = 3\alpha.$$

Коэффициенты объёмного расширения жидкостей.

Вода	0,00018	Ртуть	0,00018
Керосин	0,0010	Спирт	0,0011
Масло (оливковое) . .	0,00050	Эфир	0,0017

54. Формула объёма тела при любой температуре. Из формулы коэффициента объёмного расширения $\beta = \frac{V_t - V_0}{V_0 t}$ можно найти, что $V_t = V_0 + \beta t V_0$, или:

$$V_t = V_0 (1 + \beta t). \quad (\text{VII})$$

Двучлен $1 + \beta t$ называется биномом объёмного расширения.

Отсюда, объём при любой температуре равен объёму при 0° , умноженному на бином объёмного расширения.

55. Изменение плотности тела с изменением температуры. Плотность тела измеряется его массой в единице объёма. Если масса тела m занимает объём V_0 при 0° , то та же масса займёт объём $V_t = V_0 (1 + \beta t)$ при температуре t° . Если обозначить плотность этого вещества при 0° через D_0 и при t° — через D_t , то

$D_0 = \frac{m}{V_0}$ и $D_t = \frac{m}{V_0(1+\beta t)}$, так как масса тела не изменяется с температурой; отсюда:

$$\frac{D_t}{D_0} = \frac{m \cdot V_0}{V_0(1+\beta t) \cdot m} \quad \text{и} \quad \boxed{D_t = \frac{D_0}{1+\beta t}} \quad (\text{VIII})$$

Следовательно, плотность вещества при любой температуре равна плотности при 0° , делённой на бином объёмного расширения.

Такое же соотношение связывает и удельные веса тел при разных температурах.

При повышении температуры плотность и удельный вес тел уменьшаются, при понижении — увеличиваются. Исключение составляет вода, имеющая наибольшую плотность при 4° .

Вода при нагревании свыше 4° и охлаждении ниже 4° до 0° расширяется. Последнее обстоятельство имеет большое значение для существования водных животных и растений. При охлаждении ниже 4° слои воды, хотя и более холодные, но менее плотные, остаются наверху водоёмов, не опускаясь вниз. Поэтому в зимнее время в глубоких водоёмах устанавливается распределение температуры, показанное на рисунке 47, что обеспечивает существование в воде всего животного мира в течение холодного времени

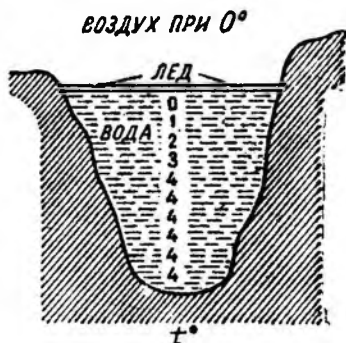


Рис. 47. Распределение температуры по вертикали зимой в глубоком озере.

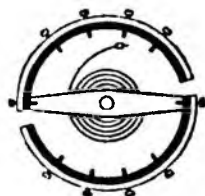


Рис. 48. Уравнительное балансное колесо в часах.

56. Использование в технике теплового расширения. Помимо многочисленных примеров технического использования теплового расширения, приводимых в начальном курсе, остановимся на следующих:

1. *Уравнительное балансное колесо в часах.* При переходе от зимней температуры к летней балансное колёсико точных часов расширилось бы (рис. 48), радиус его увеличился бы, сила упругости регулирующей пружины уменьшилась бы, и часы стали бы отставать. Для сохранения неизменным хода часов, т. е. для со-

хранения неизменным радиуса колёсика, оно делается склёпанным из двух металлов, из которых внутренний металл имеет меньший коэффициент расширения, чем наружный. От этого при повышении температуры происходит одновременное расширение металлов и закру-

чивание свободных концов внутрь колёсика. Можно так подобрать размеры и коэффициенты расширения, чтобы внутренний радиус от этих двух противоположных действий сохранился неизменным.

2. *Терморегулятор.* Подвижной конец свёрнутой в спираль пластинки, склепанной из двух металлов различной расширяемости,

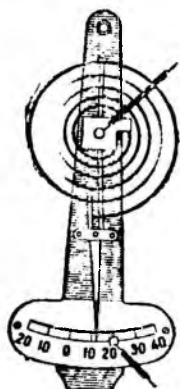


Рис. 49. Использование биметаллической пластинки в качестве сигнализатора.

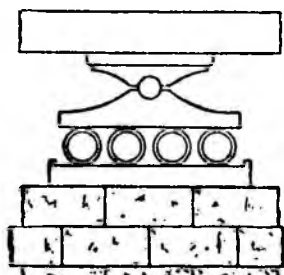


Рис. 50. Роликовые опоры металлического моста.

передвигается между двумя контактами двух различных электрических цепей (рис. 49). Другой конец пластинки закреплён неподвижно и тоже включён в цепь. При повышении температуры пластинка, искривляясь, прижимается к одному контакту и включает охлаждающий прибор, при понижении температуры она искрив-

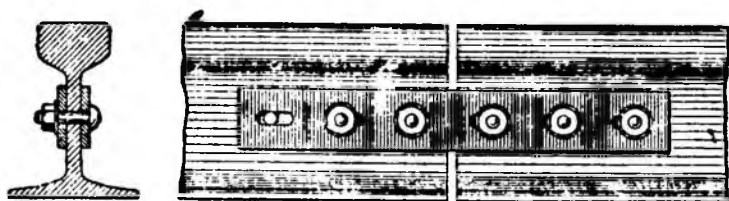


Рис. 51.

ляется в другую сторону, прижимается к другому контакту, не изображённому на рисунке, и включает нагревательный прибор. Так может поддерживаться постоянная температура.

Тот же прибор может быть проградуирован как термометр; им можно пользоваться как пожарным сигнализатором, замыкающим электрическую цепь при повышении температуры от пожара и передающим сигналы в пожарную охрану.

Расширение учитывается при постройке мостов и других длинных металлических сооружений (рис. 50, катки), при склёпке ме-

таллических частей или рельс (рис. 51, продолговатые отверстия для болтов), при прокладке паропроводов (рис. 52, изогнутые участки труб — компенсаторы).

Упражнение 5.

1. Приведите бытовые и технические примеры расширения тел при нагревании и сжатия при охлаждении.

2. Какой измерительный прибор основан на расширении тел?

3. Какое состояние тел — твёрдое, жидкое или газообразное — наиболее удобно для изготовления термометра и почему?

4. Какое изменение формы произойдёт при нагревании пластинки, составленной из сложенных по длине и скреплённых на концах железной и медной полос?

5. Какое значение в природе имеет та особенность воды, что её наибольшая плотность получается при 4° ?

6. Какой физический смысл имеют биномы расширения?

7. Длина стального рельса при 0° равна 8 м. На сколько изменяется его длина при изменении температуры от -25° до $+35^\circ$?

Отв. $\approx 5,76$ мм.

8. Длина стального рельса при 35° равна 8,00336 м. При этой температуре рельсы лежат на расстоянии 2 мм друг от друга. Какой зазор между отдельными рельсами получится при -15° ?

Отв. 6,8 мм.

9. Железная телеграфная проволока имеет наименьший размер между столбами в 20 м при -30° . На сколько она удлинится при нагревании до $+32^\circ$?

Отв. 15 мм.

10. Стальной мост через Днепр у Киева имеет длину 1082 м при 0° . На сколько изменится его длина при изменении температуры от -10° до $+20^\circ$?

Отв. 35,7 см.

11. Бидон в 12 л наполнен керосином при 0° . Сколько граммов керосина выльется при нагревании до 20° ? Расширение сосуда в расчёт не принимается. Для керосина $D_0 = 0,8 \frac{г}{см^3}$.

Отв. 188 г.

12. Вычислить плотность воды при 0° .

Отв. 0,9993.

13. Вычислить массу 1 $дм^3$ меди при 400° ($D_0 = 8,9 \frac{г}{см^3}$).

Отв. 8,83 кг.

14. Кусок свинца имеет объём в 100 $см^3$ при 0° и 101,74 $см^3$ при 200° . Найти коэффициент линейного расширения свинца.

Отв. 0,000029.

15. Какой объём при 200° имеет 100 г ртути ($D_0 = 13,6 \frac{г}{см^3}$)?

Отв. 7,6 $см^3$.

16. Сколько весит 1 л спирта при 20° ($d_0 = 0,78 \frac{г}{см^3}$)?

Отв. 764 г.

17. До какой температуры надо нагреть от 0° кусок платины, чтобы её объём увеличился на 0,01?

Отв. 370° .

18. Каков будет радиус медного шара массой в 1906 г при 300° ?

Отв. $\approx 3,7$ см.

19. Оказывает ли на горизонтальную дальность полёта пули изменение температуры воздуха и если оказывает, то почему и в каком направлении?

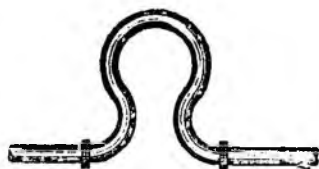


Рис. 52. Упругие компенсаторы в паропроводах.

20. При производстве непрерывной стрельбы из автоматов и пулемётов при первых 120 выстрелах начальная скорость пули сперва возрастает (прирост достигает $10 \frac{м}{сек}$), при дальнейшей стрельбе (свыше 120 выстрелов) начинает падать. Чем можно объяснить это падение, принимая во внимание развитие теплоты при выстреле?

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСВОЕНИЯ.

1. Что называется коэффициентом линейного и объёмного расширения?
2. Как определяется коэффициент линейного расширения твёрдых тел?
3. Какова формула для вычисления линейного расширения?
4. Как вычисляется коэффициент объёмного расширения твёрдых тел?
5. Каковы величины коэффициентов расширения жидких тел сравнительно с величинами коэффициентов твёрдых тел?
6. Какова формула для вычисления объёмного расширения?
7. Каково изменение плотности и удельного веса тел с изменением температуры?

Ш. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ГАЗАХ, ЖИДКОСТЯХ И ТВЁРДЫХ ТЕЛАХ.

1. Основы молекулярно-кинетической теории.

57. Молекула. Тепловые явления тесно связаны со строением вещества. По современным научным данным тела состоят из мельчайших частиц, называемых молекулами.

Молекулой называется наименьшее самостоятельно существующее при данной температуре и давлении количество вещества, обладающее основными химическими свойствами этого вещества в большом количестве.

Из каких наблюдений можно составить представление о существовании молекул?

Одна группа наблюдений показывает нам, что вещество способно делиться на очень мелкие части. Всякий знает из повседневных наблюдений, что несколько капель эфира, вылитого на стол, дают запах во всём помещении объёмом в сотни кубических метров. Также и запах всякого сильно пахучего газа, например хлора, случайно выпущенного в химической лаборатории, ощущается на большом расстоянии. Если оставить в комнате несколько кристаллов нафталина, употребляемого для предохранения от моли шерстяных вещей, то и его запах долго чувствуется по всей комнате. Ощущение запаха возможно только при действии частичек вещества на орган обоняния человека. Восприятие запаха в любом месте большого помещения указывает на наличие в нём таких частичек. Распространение запахов от ничтожных количеств вещества на большое пространство свидетельствует о делимости взятого количества вещества на ничтожно малые частицы.

Легко убедиться, что, вылив 1 см^3 чернил в 12—15 л воды, можно ими окрасить всю воду. Окрашивание зависит также от того, что в любом месте прозрачной воды присутствует частица красящего вещества. Наконец, в современные микроскопы можно рассматривать предметы длиной до $0,001\text{ мм}$, и нередко такие предметы являются органами какого-либо микроорганизма и в свою очередь делятся на составные части.

Таким образом, отчасти жизненные наблюдения, а главным образом научные исследования, приводят к выводу, что вещество, независимо от состояния, в котором оно находится, способно делиться на чрезвычайно малые частицы.

Но при обсуждении этих наблюдений возникает следующий вопрос: беспредельно ли такое деление на мельчайшие части или существует предел делимости.

Можно произвести такой опыт: на очень большую поверхность чистой воды пускают малую каплю масла; она расплывается на поверхности в широкое пятно, слой масла непрерывно утончается. Однако расплывание прекращается прежде, чем покроется масляной плёнкой вся свободная поверхность воды. Это означает, что утончение, т. е. делимость, в вертикальном направлении дошло до предела, хотя условие для расплывания — свободная водная поверхность — и сохраняется. Этим пределом является молекула.

Это наблюдение, легко осуществимое, совпадает с многочисленными научными данными, что все тела — твёрдые, жидкие и газообразные — состоят из молекул.

Научные расчёты показывают, что размеры молекул чрезвычайно малы — порядка десятых долей миллимикрона¹⁾. В 1 см^3 воздуха при 0° и нормальном атмосферном давлении содержится $2,7 \cdot 10^{19}$ молекул.

Теория, объясняющая свойства вещества и явления, в нём происходящие, на основании строения вещества из молекул, называется молекулярной теорией.

Хотя молекула и недоступна для непосредственного наблюдения глазом или оптическим прибором, но выводы, которые делаются на основании теории, проверены многими опытными исследованиями.

Молекула в свою очередь делится на частицы, называемые атомами.

Атом — то наименьшее количество химического элемента, которое входит в состав молекул самого элемента и его различных соединений. Сам атом обладает довольно сложным строением, как это было выяснено наукой в XX в. Об его строении можно составить представление только после ознакомления с его составными частями в дальнейших отделах курса.

¹⁾ 1 миллимикрон (м μ) равен $0,001\text{ микрона}$ (μ), или $0,000001\text{ мм}$:

58. Молекулы тела разделены промежутками. Приняв, что всякое тело состоит из молекул, естественно спросить, как молекулы располагаются в теле: сплошь ли заполняя всё пространство или отделяясь друг от друга пустыми промежутками? Ответ дают наблюдения и опыты.

1. Распространение пахучего газа по всему помещению указывает на то, что его молекулы могут находиться друг от друга на больших расстояниях; также имеются промежутки между молекулами воздуха, в котором газ распространяется.

2. Сжатие всех тел при увеличении давления, чрезвычайно сильное в газах и гораздо более слабое в жидкостях и твёрдых телах, легко станет понятным, если допустить существование промежутков, и трудно объяснимо, если считать, что вещество сплошь заполняет весь объём.

3. Помимо сжатия, и другие изменения формы тела — сдвиг, гнутие, кручение — также приводят к мысли о существовании пустых промежутков между молекулами.

4. К тому же выводу приводит и способность всех тел сжиматься при охлаждении и расширяться при нагревании.

5. Существование промежутков между молекулами обнаруживает и следующий опыт.

Наполним стеклянную трубку длиной около 1 м и диаметром около 2 см (рис. 53) наполовину водой, а сверху осторожно прильём подкрашенного спирта так, чтобы была отчётливо видна граница раздела. Верхний край спирта отметим резиновым кольцом или наклеенной бумажной лентой. Затем перемешаем обе жидкости. Теперь можно заметить, что верхний край жидкости стоит ниже, чем до смешения. Следовательно, объём смеси меньше суммы объёмов смешиваемых частей. Такое уменьшение объёма указывает на то, что теперь молекулы перегруппировались в более тесно составленные группы, что возможно только при наличии свободных промежутков между молекулами.

Все наблюдения приводят к заключению, что молекулы в любом теле находятся на расстоянии друг от друга.

59. Сцепление. Если тела состоят из отдельных молекул, разделённых промежутками, то почему они не рассыпаются, и тело (кроме газов) сохраняет свой объём, а твёрдое тело — и свою форму? Известно, что приходится приложить большую силу, чтобы сломать стеклянную палочку, отрубить от доски кусок дерева, разорвать металлическую проволоку и вообще тем или другим способом отделить одну часть твёрдого тела от другой.

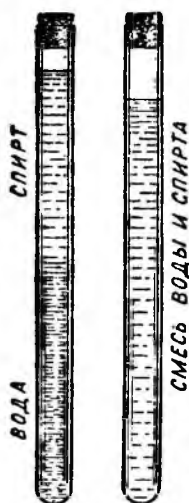


Рис. 53. При смешении воды и спирта объём уменьшается.

Это явление указывает на то, что между молекулами тела существуют силы, удерживающие их на определённых расстояниях друг от друга. Сила взаимодействия между молекулами тела называется сцеплением¹⁾.

Если попытаться восстановить целостность разломанного тела, опять приставив к нему отделённую часть, то обыкновенно это не удаётся; отсюда вывод, что силы сцепления обнаруживаются только на ничтожно малых расстояниях; за пределами этого расстояния они так быстро убывают, что не могут быть обнаружены.

Если наибольшее расстояние, на котором ещё обнаруживаются силы сцепления, принять за радиус и описать этим радиусом шар, то молекулы, которые взаимодействуют с молекулой, помещённой в центре, будут находиться только внутри этого шара.

Шар, охватывающий все молекулы, на которые действуют силы сцепления от молекулы, находящейся в центре, называется сферой молекулярного действия. По вычислениям на основании опытных данных радиус сферы молекулярного действия меньше $6 \cdot 10^{-6}$ см²⁾.

Но нельзя ли опытным путём обнаружить проявление сил сцепления при надлежащем сближении частей тела?

1. *Сцепление в твёрдом теле.* Прикрепим к концам свинцового цилиндра два кольца, затем разрежем его ножом по середине и сейчас же приложим друг к другу разрезанные части, надвигая и нажимая одну часть на другую так, чтобы удалить следы воздуха и возможно ближе сомкнуть обе части.

Если место разреза не успело окислиться³⁾ и воздушная прослойка была вытеснена, то обе части соединятся в одно целое. Теперь можно подвесить цилиндр за верхнее кольцо к подставке (рис. 54), а на нижнее — навешивать грузы, и цилиндр будет выдерживать довольно большую нагрузку, не разрываясь.

Так же можно вызвать сцепление и в других мягких телах: в воске, каучуке и т. п.

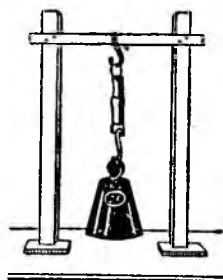


Рис. 54. Сцепление между двумя кусками свинцового цилиндра выдерживает вес гири.

¹⁾ Силу сцепления надо отличать от силы тяготения; по современным взглядам молекулярные силы — электрического происхождения. При сближении молекул ближе определённого расстояния между ними начинают действовать молекулярные отталкивания, препятствующие непосредственному соприкосновению всех молекул.

²⁾ $10^{-6} = 0,000001$; вообще $10^{-n} = \frac{1}{10^n}$.

³⁾ Если же произошло окисление или загрязнение, надо ножом тщательно отскоблить поверхность.

2. *Сцепление в жидкости.* Чтобы обнаружить сцепление между молекулами жидкости, можно подвесить на нитке к одной чашке весов стеклянную пластинку, тщательно очистив её предварительно от загрязнения, так, чтобы она висела горизонтально. Уравновесив её на весах, надо поднести к ней снизу сосуд с водой до соприкосновения её поверхности со стеклом (рис. 55). Если слегка опустить сосуд на подставку, стеклянная пластинка, притянутая водой, также опустится вниз, равновесие весов нарушится, что и обнаружит существование сцепления.

Будем насыпать на другую чашку весов очень осторожно дробь (под конец отдельными дробинками) до тех пор, пока пластинка не оторвётся от поверхности воды. Осмотр нижней поверхности пластинки покажет, что она покрыта каплями воды, следовательно, разрыв произошёл между двумя слоями воды.

Можно повторить опыт для других жидкостей, например, взяв цинковую или медную пластинку и приведя её в соприкосновение с ртутью.

3. *Сцепление в газах.* Что касается газов, то с первого взгляда кажется, что для газов нельзя говорить о сцеплении между их молекулами, так как последние очень быстро расходятся на далёкие расстояния друг от друга; но изучение явления расширения и сжатия газов косвенным

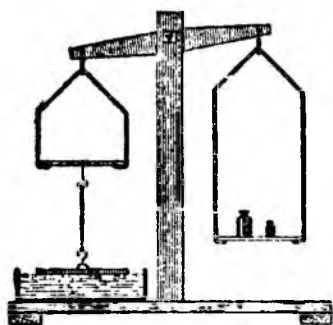


Рис. 55. Между слоями жидкости существует сцепление.

путём приводит к заключению, что и в газах существуют силы сцепления, только они очень малы.

60. *Диффузия.* Естественно поставить вопрос: находятся ли молекулы при неизменных внешних условиях в относительном покое одни по отношению к другим или и в этом случае происходят их относительные перемещения?

Опыты показывают, что в очень многих случаях молекулы двух разнородных тел, приведённых в соприкосновение, переходят через границы обоих тел.

Проникновение молекул одного тела в другое без воздействия какой-либо внешней силы называется *диффузией*¹⁾.

Познакомимся с явлением диффузии для различных состояний тел.

1. *Диффузия газов.* Если заполнить углекислым газом один стеклянный цилиндр (рис. 56) и на него поставить сверху — отверстием к отверстию — другой заполненный воздухом цилиндр, то

¹⁾ Название *диффузия* происходит от латинского глагола *диффундере*, означающего распространять.

через некоторое, сравнительно короткое, время можно обнаружить в верхнем цилиндре, хотя бы с помощью известковой воды или горящей лучины, присутствие углекислого газа.

Через незначительный промежуток времени в обоих сосудах получится однородная смесь воздуха и углекислого газа. Этот опыт показывает, что молекулы более тяжёлого газа — углекислого — переместились кверху, молекулы более лёгкого — воздуха — опустились вниз, несмотря на то, что первоначальное расположение слоёв — тяжёлый газ ниже лёгкого — по закону Архимеда должно было противодействовать смешению.

2. *Диффузия жидкостей.* Чтобы наблюдать диффузию жидкостей, можно влить в стеклянный цилиндр (рис. 57) до его половины очень крепкий раствор какой-нибудь окрашенной соли (например раствор медного купороса), сверху осторожно налить воды и поставить без толчков прибор на какую-либо подставку, где бы он находился в покое. В начале граница между водой и раствором очень резкая; через несколько дней в ближайшем к границе слое вода начинает постепенно голубеть, раствор бледнеть; с течением времени изменение окраски начинает распространяться всё дальше и дальше от границы; через несколько недель или месяцев, в зависимости от высоты цилиндра, смесь станет однородной. И здесь более тяжёлая жидкость перемещается вверх, более лёгкая — вниз.



Рис. 57:
Диффузия
жидкостей.



Рис. 56.
Диффузия
газов.

3. *Диффузия твёрдых тел.* Опыт с диффузией твёрдых тел не может быть произведён на занятиях, так как его продолжительность измеряется годами. Научные исследования показали, что если крепко сжать две пластинки разных металлов, например золота (плотность 19) и свинца (плотность 11), и более тяжёлую положить вниз, то по прошествии долгого времени в пограничном слое свинца можно обнаружить присутствие золота, в пограничном слое золота — присутствие свинца. И этот опыт указывает на перемещение молекул более тяжёлого тела вверх, более лёгкого — вниз, т. е. вопреки действию силы тяжести.

Диффузия происходит быстрее, если диффундирующие тела взяты при более высокой температуре.

4. *Проявление диффузии в природе.* Во всех случаях, когда выделяется на Земле более тяжёлый газ, например углекислый в трещинах земли, из фабричных труб, над вулканами, он не остаётся на месте своего выделения, а диффундирует в воздухе; вследствие диффузии в общем поддерживается одинаковый состав атмосферы по всей Земле в пределах слоя

определённой толщины. Так же может происходить диффузия растворов различных солей в почве.

61. Броуновское молекулярное движение. Движение молекулы непосредственно не может быть наблюдаемо, так как сама молекула недоступна наблюдению и в сильнейшие микроскопы. Тем не менее оно подтверждается множеством косвенных наблюдений. Среди них наблюдения, произведённые английским ботаником Броуном ещё в 1827 г., очень близко подводят как бы к непосредственному видению молекулярного движения.

Если взболтать в воде какой-нибудь лёгкий порошок, например краску гуммигут, и поместить каплю воды со взвешенными в ней частичками под покровное стёклышко микроскопа, то можно наблюдать, что видимая в микроскоп частичка порошка (значительно более крупная, чем молекула) находится в непрерывном движении по зигзагообразной траектории.



Рис. 58. Путь, проходимый за 30 секунд частицей в броуновском движении.

В каждый момент удары молекул по частице могут быть не одинаковыми со всех сторон, вследствие беспорядочности молекулярного движения. Тогда частица движется в сторону неуравновешенного удара. В следующий момент такой неуравновешенный удар может быть получен частицей с какой-либо другой стороны, и её движение изменит направление. При большом количестве таких изменений движения в единицу времени движение толкаемой частицы получит характер как бы дрожания.

Проверочные опыты показали, что это дрожание никогда не прекращается и не зависит от каких-либо внешних воздействий — механических, электрических и др., — но возрастает с повышением температуры.

Учёный Перен отмечал положение частицы в поле микроскопа через каждые $\frac{1}{2}$ мин. и отмеченные положения соединял прямыми; рисунок 58 позволяет судить о последовательных передвижениях частицы и, следовательно, о направлении равнодействующей от толчков движущихся молекул за определённый промежуток времени.

Подобные наблюдения можно произвести и в газе, в котором распылены мельчайшие частицы какого-либо вещества (пыль или капельки тумана в воздухе).

Эти опыты дают самое большое приближение к непосредственному наблюдению молекулярного движения.

62. Кинетическая теория. Постоянно происходящее явление испарения твёрдых тел (льда, иода, камфоры, нафталина) и жидкостей, очень распространённые явления диффузии и броуновское движение дают достаточное основание для признания постоянного движения молекул в телах, находящихся во всех трёх состояниях. Поэтому современное учение о строении вещества сводится к следующему основному положению: *тела состоят из молекул, находящихся в непрерывном беспорядочном движении.*

Медленность диффузии в твёрдых телах и постоянство их формы и объёма наводят на предположение, что молекулы твёрдого тела способны проходить очень малые пути, совершая колебания с малым размахом около своего положения равновесия. Большая скорость диффузии жидкостей, их удобоподвижность приводят к заключению о больших размахах колебательного движения их молекул и о способности групп молекул смещаться относительно друг друга. Очень быстрая диффузия газа, его способность к расширению заставляют принять, что молекулы газа находятся в непрерывном поступательном движении по всевозможным направлениям; при этих прямолинейных перемещениях возможны столкновения молекул друг с другом и со стенками сосуда, если газ заключён в сосуд; при каждом столкновении путь молекулы изменяется.

63. Объяснение теплового состояния по молекулярно-кинетической теории. Повышение скорости диффузии с температурой указывает на связь теплового состояния и скоростей движения молекул. Повысить температуру тела — это значит увеличить скорость движения молекул.

Если мы каким-либо способом увеличим скорости беспорядочного движения молекул, то температура тела поднимется.

Тепловое состояние тела связано с беспорядочным движением его молекул.

Хотя тепловые явления и связаны с механическим движением молекул тела; но теплота *не может быть целиком сведена к молекулярному механическому движению.* Движение каждой отдельной молекулы не создаёт теплового явления.

Для возникновения теплового явления необходимо множество участвующих в нём молекул. Но и этого одного признака — множественности или массовости — недостаточно для создания теплового явления. Тепловые движения молекул — беспорядочны, хаотичны: ни по одному направлению нет какого-либо преобладания в движении молекул, все направления равно вероятны, равноценны для движения.

Из этого рассуждения видно, что теплота есть более сложная форма сравнительно с механическим движением.

Механическое движение будет иметь место со всеми своими законами, если будет двигаться, т. е. обладать кинетической энергией, хотя бы одна молекула или даже какая-либо часть её.

Для существования теплового явления не только необходимо наличие механического движения мельчайших частей, но должны иметь место ещё множественность участников движения и хаотичность их движения. Эти два новых признака приводят к тому, что тепловое движение требует иных приёмов изучения, чем те, какие применялись при изучении механики.

Подтверждение того положения, что теплота связана с кинетической энергией молекул, будет встречаться при ближайшем раз-

боре тепловых явлений. Но уже одно явление, о котором упоминалось выше, находит в этом своё объяснение. Мы видели, что кинетическая энергия тел, хотя бы частично, вследствие трения, переходит в теплоту.

При механическом движении тела все точки его описывают определённые траектории: при поступательном движении — параллельные линии; при вращательном — concentрические окружности и т. п. (если не считаться с отклонениями вследствие молекулярных движений).

При переходе кинетической энергии в теплоту правильное движение тела переходит в неорганизованные, беспорядочные движения молекул.



Ломоносов М. В.¹⁾
(1711—1765).

Так как при наличии трения кинетическая энергия переходит в теплоту, то можно сказать, что в природе правильные движения могут переходить в движения неупорядоченные, хаотические.

1) Ломоносов Михаил Васильевич — гениальный естествоиспытатель, первый русский учёный, первый русский академик. Вследствие отсталости правительственной и общественной среды, в которой проходила его научная работа, его идеи не оказали на дальнейшее развитие науки и техники того влияния, которое должны были бы оказать по своей новизне и глубине.

Главнейшие его предвидения далеко опередили современную ему науку: он признавал, что все изменения тел происходят при помощи движения, за двадцать лет до Лавуазье настаивал на введении в химию взвешивания, открыл закон сохранения вещества в химических про-

Когда имеются биллионы биллионов молекул, то возникновение движения разных молекул по всевозможным направлениям гораздо вероятнее, чем одновременное движение всех молекул в одном определённом направлении.

Из двух видов движения молекул — упорядоченных и неупорядоченных — хаотические движения являются более вероятными.

Итак, тепловая форма движения материи отличается от других форм движения тем, что она представляет собой хаотическое движение мельчайших частиц тела.

Объяснение тепловых явлений на основе движения отдельных частиц тела впервые, хотя и не в современной форме, высказал великий русский учёный Ломоносов.

Выведенные из опыта общие положения молекулярно-кинетической теории положены в основу изучения строения и свойств каждого из трёх состояний тел: твёрдого, жидкого и газообразного.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСВОЕНИЯ.

1. Что такое молекула, атом?
2. Что называется силами сцепления и в чём они проявляются?
3. В чём проявляется диффузия?
4. Каковы основные черты молекулярно-кинетической теории?

Литература. Перельман, Физическая хрестоматия, вып. I (соответствующие статьи). Перрен, Броуновское движение и действительность молекул. Ми, Молекулы, атомы, мировой эфир. Полюсовский И. Г. И., Основы физических явлений, гл. II и IV.

2. Свойства газов.

64. Развитие учения о газах. Начало учения о газах относится к тому же XVII в., в котором механика получила своё научное обоснование. На развитие учения о газах оказала влияние часть тех же производственных потребностей эпохи, которые были обрисованы в историческом очерке развития механики в первой части учебника.

Усиленное потребление металла, вызванное главным образом военными предприятиями государств, привело к необходимости углубления существующих рудников. При таком углублении всасывающие насосы перестали откачивать воду, так как они могли поднимать её только на 10 м. Необходимость устранения этого затруднения привлекла внимание учёных к изучению свойств воздуха.

С другой стороны, производство нуждалось в более мощном двигателе, чем такие двигатели, как человек, животное, ветер и вода, которые

вещсах и ввдил в химию физико-химическое направление; почти за сто лет до Майера и Гельмгольца высказал идею о сохранении энергии и составил молекулярно-кинетическое представление о строении материи, пропагандировал северный путь в Ост-Индию через Ледовитый океан.

Ломоносов основал первую в России химическую лабораторию, содействовал насаждению в стране среднего и высшего образования, перевёл с немецкого на русский язык Вольфианскую экспериментальную физику — первый учебник физики — и ввёл в русскую науку слова *термометр, барометр, атмосфера, градус* и др.

ми пользовались до тех пор. Взоры учёных обратились к паровым двигателям, первым представителем которых был паровой волчок, изобретённый греком Героном во II в. до начала н. э. Его малая производительность заставила обратиться к изучению свойств паров и сходных с ними газов.

Самое слово газ было введено в употребление к началу XVII в. бельгийцем Ван-Гельмонтом, выделившим из разряда тех веществ, которые назывались парами, наиболее трудно сжимаемые и назвавшим их газами¹⁾.

Вновь открываемые различные газы получали наименование различных воздушных: так, водород ещё в конце XVIII в. назывался горючим воздухом, углекислый газ — фиксированным воздухом, кислород — чистым воздухом и азот — испорченным воздухом²⁾.

Когда производственные потребности поставили перед учёными задачу изучения свойств газов, внимание их, естественно, сосредоточилось главным образом на воздухе.

Мы уже знаем, что ученик Галилея Торичелли в начале XVII в. нашёл способ измерять атмосферное давление (ч. I) и тем дал неопровержимое доказательство существования атмосферного давления. В это же время Паскаль изучил изменение атмосферного давления с высотой.

В 1650 г. Гери́ке изобрёл воздушный насос.

В конце XVII в. стали изучаться сжимаемость и расширяемость газов (воздуха) вследствие механических и тепловых воздействий.

65. Лабораторная работа 7. Вывод соотношения между объёмом и давлением одной и той же массы газа при постоянной температуре (закон Бойля-Мариотта).

Приборы: 1) прибор Мельде; 2) масштаб; 3) листок миллиметровой бумаги; 4) барометр — общий для всех групп.

Ход работы. Работа сводится к измерению объёма и давления той массы газа, которая заключена между запаянным концом трубки и ртутью. Объём V можно измерять в произвольных единицах, приняв, например, за единицу объёма — объём, соответствующий 1 мм длины воздушного столба; тогда число условных единиц объёма газа будет равно числу миллиметров длины газового столба (рис. 59).

Давление p , под которым находится газ и которое он сам при равновесии производит на стенки сосуда, можно изменять, помещая трубку в различные наклонные к горизонту положения. В любом положении давление, производимое на газ, равно атмосферному

¹⁾ От греческого слова хаос, что значит: зияющее, пропасть, первобытное.

²⁾ После того как в 1774 г. англичанином Пристлеем (1733—1804) были выделены из состава воздуха кислород и азот.

давлению H плюс давление ртутного столба в трубке; давление же ртутного столба измеряется разностью уровней по вертикали между верхним и нижним его концами. Если трубку перевернуть открытым концом книзу, то давление газа в трубке будет равно H минус давление ртутного столба, отсчитанное, как указано выше. Чтобы найти зависимости между V и p , надо для каждой пары соответствующих значений V и p вычислить их произведение. Таким образом, работа сводится к получению возможно большего числа пар соответствующих значений V и p при различных наклонах трубки. Результаты наблюдений надо занести в следующую таблицу:

№ опыта	Объём V в условных единицах	Давление $p = H \pm h$ в мм рт. ст.	Произведение pV , вычисленное с точностью до сотни	Отличие наибольшего или наименьшего произведения от среднего в процентах
1				
2				

Измерение объёма и давления можно производить следующим образом.

1. Измерьте атмосферное давление по барометру H мм рт. ст.

2. Поставьте трубку вертикально — запаянным концом вниз; измерьте по миллиметровой бумаге длину воздушного столбика в миллиметрах и примите число миллиметров за объём V в условных единицах; измерьте длину ртутного столба h в миллиметрах; вычислите давление, соответствующее измеренному объёму, $p = H + h$ мм рт. ст.

3. Отклоните трубку на некоторый угол от вертикали (примерно на 25°); измерьте по масштабу длину воздушного столбика в миллиметрах, что даст величину объёма V ; измерьте разность уровней по вертикали между верхним и нижним концами ртутного столбика, что даст давление h этого столбика; вычислите давление, под которым находится воздух в этом случае, $p = H + h$.

4. Повторите измерение по крайней мере ещё для двух положений трубки, опущенной вниз запаянным концом (например для 50° и 75°).

5. Поместите трубку горизонтально; измерьте объём V . Чему равно давление воздуха в этом случае?

6. Выведите трубку из горизонтального положения на некоторый угол (25°) открытым концом вниз, измерьте по масштабу объём воздуха и разность уровней по вертикали обоих концов ртутного столбика h ; вычислите давление воздуха $p = H - h$.

7. Повторите измерения и вычисления по крайней мере для двух наклонных положений трубки и для вертикального положения открытым концом вниз.

8. Найдите среднее значение pV для всех измерений и найдите отличие отдельных произведений от среднего, выраженное в $\%$. Велики ли эти отличия? Можно ли считать (в пределах погрешностей наблюдения) произведение pV постоянным при весьма значительных различиях отдельных объёмов и давлений?

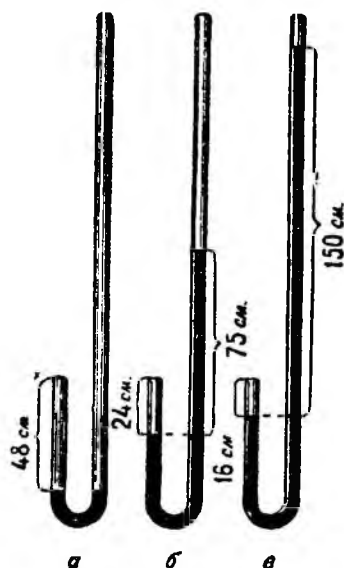


Рис. 60. Объём газа уменьшается при увеличении давления на него.

9. Начертите график зависимости p и V , откладывая на горизонтальной оси значения V , на вертикальной — p .

10. Как можно сформулировать закон, выражающий соотношение между объёмом и давлением одной и той же массы газа при постоянной температуре?

66. Закон Бойля-Мариотта. Зависимость между давлением и объёмом одной и той же массы газа при неизменной температуре можно изучить на следующем опыте.

Возьмём длинную стеклянную трубку с изогнутым коротким коленом (рис. 60). Длинный конец трубки открыт, короткий запаян. Налив в неё ртуть на одинаковом уровне в обоих коленях, как показано на рисунке 60, а, мы можем заключить, что в отделённом ртутью объёме воздух находится под атмосферным давлением. Пусть во время опыта атмосферное давление $p_1 = 75$ см рт. ст. Будем подливать ртуть в открытое колено до тех пор, пока воздух в закры-

том колене не займёт вдвое меньший объём: $V_2 = \frac{V_1}{2}$ (рис. 60, б).

Измерение высоты ртутного столба в открытом колене над его уровнем в закрытом даёт 75 см рт. ст., так что воздух в новом объёме оказался под давлением $p_2 = 75$ см рт. ст. + 75 см рт. ст. = 150 см рт. ст., т. е. $p_2 = 2p_1$.

Подливая ещё ртуть так, чтобы сжать первоначальный объём втрое, до $V_3 = \frac{V_1}{3}$, найдём, что общее давление на него $p_3 = 225$ см рт. ст., следовательно, $p_3 = 3p_1$ (рис. 60, в).

Взяв прибор, изображённый на рисунке 61, мы устанавливаем запаянную с одного конца трубку с воздухом так, чтобы ртуть в ней и в широком открытом сосуде стояла на одном уровне. Это

служит признаком, что воздух в трубке находится под атмосферным давлением. Поднимаем трубку так, чтобы воздух занял объем вдвое больший, чем первоначально: $V_2 = 2V_1$.

Тогда ртуть поднимается в запаянном колене и, как показывает измерение, устанавливается на высоте $37\frac{1}{2}$ см над уровнем в широком сосуде. Значит, теперь атмосферное давление в 75 см рт. ст. уравнивает давление воздуха в удвоенном объеме и давление ртутного столба в $37\frac{1}{2}$ см. На долю давления воздуха приходится только половина атмосферного давления, т. е. $p_2 = \frac{p_1}{2}$.

Продолжая поднимать трубку до тех пор, пока объем не утроится, измерим разность уровней ртути внутри трубки с воздухом и в наружном сосуде; окажется, что она равна 50 см. Следовательно, давление воздуха в трубке составляет только треть атмосферного давления (75—50), т. е. $p_3 = \frac{p_1}{3}$.

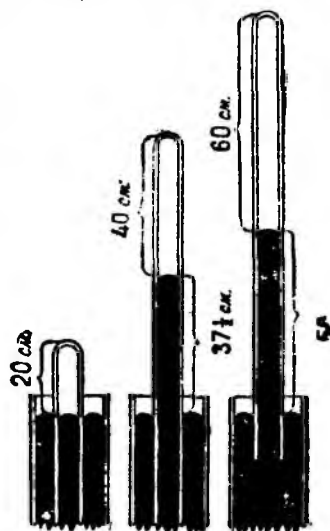


Рис. 61. Объем газа увеличивается при уменьшении давления на него.

Сопоставим результаты того и другого ряда опытов:

Уменьшение объема:

Объем	V_1	$V_2 = \frac{V_1}{2}$	$V_3 = \frac{V_1}{3}$
Давление	p_1	$p_2 = 2p_1$	$p_3 = 3p_1$
Произведение	$p_1 V_1$	$p_1 V_1$	$p_1 V_1$

Увеличение объема:

Объем	V_1	$V_2 = 2V_1$	$V_3 = 3V_1$
Давление	p_1	$p_2 = \frac{p_1}{2}$	$p_3 = \frac{p_1}{3}$
Произведение	$p_1 V_1$	$p_1 V_1$	$p_1 V_1$

На основании подобных же опытов английский физик Бойль в 1662 г. и французский физик Мариотт в 1676 г. независимо друг от друга нашли закон, названный их общим именем:

Произведение объема на давление есть величина постоянная для одной и той же массы газа при постоянной температуре.

Если обозначить объем данной массы m граммов газа через V , а давление его через p , то закон получит следующее математическое выражение (формула закона Бойля-Мариотта):

$$\boxed{pV = C} \quad (C — \text{постоянная величина}). \quad (IX)$$

67. График зависимости объёма и давления. Как видно из предыдущего, давление и объём данной массы газа при неизменной температуре являются обратно пропорциональными величинами.

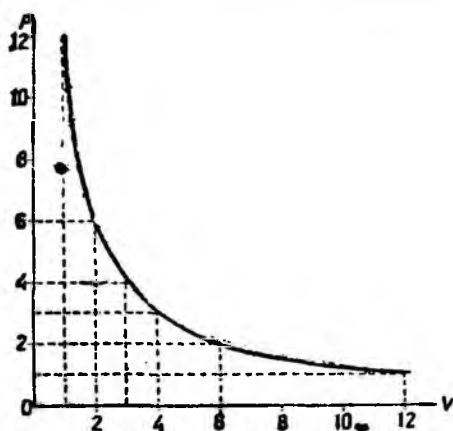


Рис. 62. График зависимости давления газа от объёма.

случая $V=12$ л, $p=1$ ат. Найдём на чертеже точки, соответствующие следующим значениям:

$$\begin{array}{l|l} p = 1, & 2, & 3, & 4, & 6, & 12 \\ V = 12, & 6, & 4, & 3, & 2, & 1 \end{array} \quad \left| \quad Vp = 12. \right.$$

Через найденные точки проведём линию.

В геометрии полученная кривая называется **гиперболой**. Физически она изображает изменение состояния газа при постоянной температуре, почему и называется **изотермой**¹⁾.

68. Зависимость плотности газа от давления. Так как плотность газа $D = \frac{m}{V}$, то

$$V = \frac{m}{D} \quad \text{и} \quad \frac{p m}{D} = C, \quad \text{или} \quad \frac{p}{D} = \frac{C}{m}.$$

Так как C и m — постоянные величины, то и $\frac{C}{m}$ — тоже постоянная величина; обозначим её C_1 ; следовательно:

$$\boxed{\frac{p}{D} = C_1} \quad (\text{постоянная величина}), \quad (X)$$

т. е. **плотность газа прямо пропорциональна его давлению при постоянной температуре.**

¹⁾ По-гречески **изос** означает равный.

Позднейшие исследования показали, что закон Бойля-Мариотта даёт только первое приближение к действительному явлению, является приближительным законом. Даже при малых давлениях произведение pV не остаётся постоянным, причём одни газы, при одних давлениях сжимаются сильнее, другие слабее, чем бы следовало по закону Бойля-Мариотта; при значительных давлениях, выше 100 ат, отклонения уже велики.

Таблица отступления от закона Бойля-Мариотта.

V	Воздух		Углекислый газ		Водород	
	p	pV	p	pV	p	pV
1	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
1/2	1,9978	0,9989	1,9829	0,9914	2,0011	1,0006
1/8	7,9457	0,9932	7,5194	0,9399	9,0339	1,0042
1/20	19,7199	0,9860	16,7054	0,8353	20,2687	1,0134

68а. Решение задач на основании закона Бойля-Мариотта.

Основные задачи на закон Бойля-Мариотта сводятся к отысканию одной величины по трём данным; таким образом возможны четыре основных случая. Запись условий и решение задач удобнее всего вести следующим образом.

Буквенный пример. Дан газ в объёме V и под давлением p . Найти его новый объём при той же температуре, если его подвергнуть давлению p_1 :

	Объём	Давление	
начальные	V	p	} $x p_1 = V p$; $x = \frac{V p}{p_1}$. -
конечные	x	p_1	

Числовой пример. Газ, занимавший объём в 15 л под давлением в 75 см рт. ст., сжат до объёма в 12 л (при той же температуре). Каково его новое давление?

$$\left. \begin{array}{l} 15 \text{ л} - 75 \text{ см} \\ 12 \text{ л} - x \end{array} \right\} 12 \cdot x = 15 \cdot 75; x = \frac{15 \cdot 75}{12}; x = 93,75 \text{ см рт. ст.}$$

69. Закон Гей-Люссака. Для измерения коэффициента расширения газов пользуются прибором, называемым дилатометром¹⁾. Дилатометр (рис. 63) представляет собой стеклянный шар



Рис. 63. Дилатометр.

¹⁾ От латинского слова *дилатаре* — расширять.

с припаянной к нему узкой стеклянной трубкой, согнутой под прямым углом. Объем шара и сечение трубки тщательно измерены. Шар заполняется исследуемым газом или воздухом (без следов влаги). Затем в горизонтальную часть трубки выпускается капля жидкости, которая отделяет объем исследуемого газа. Поместив сперва шар в тающий лед, измеряют объем газа до капли жидкости при 0° .

Перенеся шар в нагретую воду, определяют по опущенному в неё термометру температуру воды и, следовательно, газа и затем измеряют новый объем, занятый тем же количеством газа, находящимся под тем же атмосферным давлением.

Полученные данные позволяют вычислить коэффициент объемного расширения газов (см. § 54) при неизменном давлении.

Тщательные исследования расширения газов произвёл Гей-Люссак, который в 1802 г. нашёл, что для всех газов объем от нагревания на 1° при постоянном давлении возрастает на одну и ту же часть начального объема при 0° . Поэтому закон Гей-Люссака получил следующее выражение: *коэффициент объемного расширения всех газов при постоянном давлении одинаков и равен* $\beta = \frac{1}{273}$ (0,00366)¹⁾. Объем газа при любой температуре t выражается формулой $V = V_0(1 + \beta t)$ (см. § 54).

Закон Гей-Люссака также является приближенным. Исследования, произведённые после Гей-Люссака, показали, что коэффициенты объемного расширения различных газов, хотя и очень мало, отличаются друг от друга, именно:

Для азота	$\beta = \begin{cases} 0,00367 \\ 0,00380 \\ 0,00366 \\ 0,00367 \end{cases}$	Для гелия	$\beta = \begin{cases} 0,00366 \\ 0,00367 \\ 0,00385 \\ 0,00373 \end{cases}$
• аммиака		• кислорода	
• водорода		• сернистого ангидрида	
• воздуха		• углекислого газа	



Рис. 64. Изобара

При нагревании газа при постоянном давлении одному и тому же значению давления p будет соответствовать множество значений объема V . Если на оси абсцисс откладывать значения объема, а на оси ординат — соответствующие значения давления, то график, выражающий изменение давления в зависимости от изменения объема, в этом

случае представится прямой, параллельной оси абсцисс (рис. 64).

Этот график называется *изобарой*²⁾.

¹⁾ Приведённое число дано не самим Гей-Люссаком, а позднейшими исследователями.

²⁾ И з о с — равный; б а р ю с — тяжёлый.

70. Лабораторная работа 8. Измерение коэффициента объёмного расширения воздуха (при постоянном давлении).

Приборы: 1) стеклянная трубка (рис. 65) длиной около 30 см и диаметром в 2,5 мм; трубка с одного конца запаяна, и примерно посредине помещён небольшой столбик ртути, запирающий столбик воздуха; 2) термометр; 3) широкая стеклянная трубка; 4) масштаб; 5) чайник с горячей водой; 6) тающий лёд.

Ход работы. 1. Измерьте масштабом длину всей трубки L мм и ртутного столбика l мм.

2. Положите в широкую трубку тающий лёд или за неимением его налейте холодной воды; поместите в тающий лёд или холодную воду термометр и трубку с воздухом вертикально, запаянным концом вниз; запишите температуру воды t_0° и расстояние от открытого конца трубки до верхнего конца ртутного столбика l_0 ; вычислите в условных единицах объём воздуха $V_0 = L - l - l_0$.

3. Освободите сосуд от тающего снега или холодной воды и налейте тёплой воды; вставьте в неё термометр и трубку с воздухом, запишите температуру t° и расстояние l_1 от открытого конца трубки до верхнего конца ртутного столбика; вычислите новый объём $V_1 = L - l - l_1$.

4. Повторите измерения при различных температурах воды в пределах до 40° .

5. Результаты измерений занесите в таблицу.

Длина трубки $L = \dots$ мм; длина ртутного столбика $l = \dots$ мм.

Расстояние при t_0° от конца трубки до начала ртути $l_0 = \dots$ мм.

Начальная температура t_0° . Начальный объём $V_0 = L - l - l_0$.

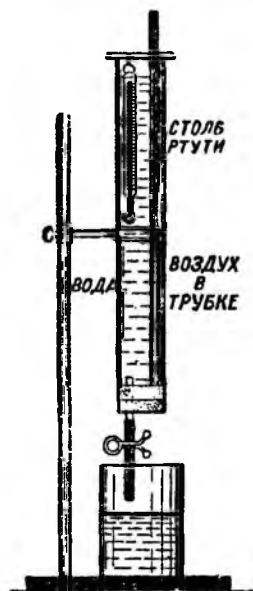


Рис. 65. Прибор для лабораторной работы 8.

№ опыта	Температура t°	Расстояние от конца трубки до ртути l_1	Объём воздуха $V_1 = L - l - l_1$	Разность объёмов $V_1 - V_0$	Разность температур $t - t_0$	Коэффициент объёмн. расш. $\beta = \frac{V_1 - V_0}{V_0(t - t_0)}$
					Среднее	

71. Термический коэффициент давления газов. Когда газ заключён в сосуд (например в стальные баллоны на заводах, добывающих кислород и другие газы), то при изменении температуры его объём не изменяется (небольшое изменение объёма сосуда в расчёт не принимается). В таком случае изменяется с температурой давление газа.

Зависимость давления газа от температуры может быть изучена на следующем опыте. Заполненная воздухом или другим газом колба соединяется с манометром, жидкостью в котором служит ртуть (рис. 66).

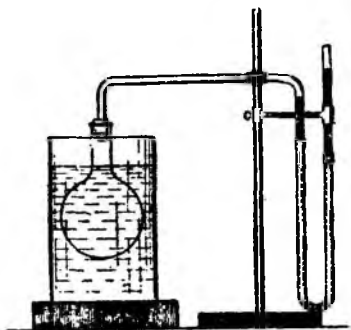


Рис. 66. Прибор для изучения зависимости давления газа от температуры.

Колбу помещают в сосуд с тающим льдом, температура которого и, следовательно, начальная температура заключённого в колбе газа равна 0° . Перемещением подвижного колена манометра устанавливают ртуть в обоих коленах на одном уровне. Тогда давление p_0 , под которым находится газ в колбе, и, следовательно, давление самого газа на стенки сосуда, будет равно атмосферному.

Каким-нибудь указателем отмечают уровень ртути в неподвижном колене манометра и тем самым

отмечают объём, занятый газом. Вынув колбу из первого сосуда, её помещают в другой сосуд с горячей водой.

Перемещая снова подвижное колено манометра, приводят уровень ртути в неподвижном колене к указателю, заставляя газ принять прежний объём. Но теперь поверхности ртутных столбов в обоих коленах уже не располагаются на одном уровне: ртуть в открытом колене стоит выше, чем в колене, соединённом с газом; пусть разность высот обоих столбов h . Следовательно, газ имеет теперь новое давление p_1 , равное сумме атмосферного давления и давления ртутного столба h . Измерив температуру воды t , можно рассчитать, на какую часть изменяется каждая единица начального давления при 0° от нагревания на 1° .

Число, показывающее, на какую часть изменяется каждая единица начального давления при 0° от нагревания на 1° при постоянном объёме, называется термическим коэффициентом давления газа.

Первое измерение температурных коэффициентов давления произвёл в 1787 г. француз Шарль, который нашёл закон, названный его именем: *термические коэффициенты давления при постоянном объёме для всех газов равны между собой.*

Если обозначить коэффициент давления через β , то:

$$\beta = \frac{p_t - p_0}{p_0 t}; \quad \boxed{p_t = p_0 (1 + \beta t).} \quad (XI)$$

Объёмный коэффициент расширения газов при постоянном давлении и термический коэффициент давления при постоянном объёме выражаются числами, совпадающими между собой.

Закон Шарля является также приближённым.

При нагревании газа при постоянном объёме одному и тому же значению объёма V будет соответствовать множество значений давления p . Если на оси абсцисс откладывать значения объёма, а на оси ординат — соответствующие значения давления, то график, выражающий зависимость давления от объёма, в этом случае представится прямой, параллельной оси ординат (рис. 67).

Этот график называется *изохорой*¹⁾.

72. Идеальный газ. Как уже было указано выше, все газы отступают от законов Бойля-Мариотта и Шарля-Гей-Люссака. Объёмы данной массы газа при постоянной температуре не изме-

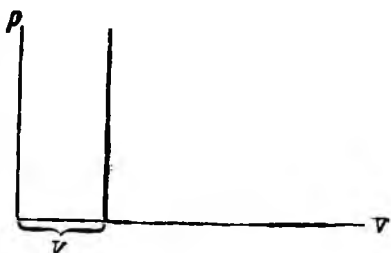


Рис. 67. Изохора.

няются строго обратно пропорционально давлению; термические коэффициенты различных газов отличаются друг от друга (хотя и незначительно) и при разных температурах не остаются постоянными. Газ, который в точности подчинялся бы обоим газовым законам, носит название «идеального газа». Ближе всего к свойствам идеального газа подходят водород и гелий.

73. Газовый термометр. Прибор, подобный описанному (рис. 66), колба которого наполнена водородом, может служить в качестве газового водородного термометра. Колба погружается в вещество, температура которого измеряется; перемещение открытого колена манометра приводит газ к одному и тому же объёму; по атмосферному давлению и разности столбов ртути измеряется давление газа в колбе, и по формуле (XI) вычисляется температура. Газовым термометром пользуются в научных исследованиях и с ним сравниваются остальные термометры.

74. Абсолютная температура. Из формулы (XI) видно, что с уменьшением температуры давление газа, находящегося при постоянном объёме, также уменьшается. Так, если при 0° газ

¹⁾ И з о с — равный; х о р а — место.

в данном объеме имел давление $1 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$, то при $t = -1^\circ$ его давление равно $1 \cdot \left(1 - \frac{1}{273}\right) = \frac{272}{273}$; при $t = -10^\circ$ давление равно $\frac{263}{273} \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$, при $t = -100^\circ$ давление станет равным $\frac{173}{273} \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$ и т. д.

Естественно поставить вопрос, при какой температуре давление газа в постоянном объеме могло бы обратиться в 0. Обозначив эту температуру через x и положив $p_t = 0$, из формулы (XI) найдём:

$$0 = p_0 (1 + \beta x); \quad 1 + \beta x = 0; \quad x = -\frac{1}{\beta}; \quad \beta = \frac{1}{273}; \quad x = -273^\circ.$$

Следовательно, при температуре -273°C давление идеального газа могло бы обратиться в 0. Давление газа есть результат движения газовых молекул и происходящих от этого ударов о стенки сосуда. Таким образом выходит, что при температуре -273°C прекратилось бы поступательное движение молекул идеального газа. *Температура в -273°C принимается за абсолютный нуль температуры. Температуры, отсчитываемые от абсолютного нуля, называются абсолютными.*

Если температуры по Цельсию равны -110° ; -20° ; 0° ; $+37^\circ$; $+100^\circ$; $+150^\circ$, то абсолютные температуры соответственно равны: 163° ; 253° ; 273° ; 310° ; 373° ; 423° . Вообще, если температуру по Цельсию обозначить через t , а соответствующую абсолютную — через T , то между этими числами существует соотношение: $T = 273 + t$ и $t = T - 273$. Принятие за абсолютный нуль температуры, лежащей из 273° ниже 0°C , основано на значении коэффициента $\beta = \frac{1}{273}$. Значение коэффициента $\beta = \frac{1}{273}$ найдено как среднее из измерений при не очень низких температурах; при этом газы принимались идеальными.

Нет оснований предполагать, что это значение коэффициента сохраняется неизменным для очень низких температур. При очень низких температурах свойства газов изменяются: газы могут перейти в жидкое состояние. Поэтому установленный указанным выше способом абсолютный нуль температуры имеет только теоретическое значение.

Надо обратить ещё внимание на то, что абсолютный нуль выводится из предположения, что прекращается поступательное движение молекул. Это вовсе не значит, что прекращается всякое движение: вблизи абсолютного нуля сохраняются колебательные движения молекул и движение ещё более мелких частиц, находящихся внутри молекул.

Упражнение 6.

1. Выразите по абсолютной шкале температуры: 1) белого каления (1200°); 2) красного каления (500°); 3) температуру кипения воды; 4) температуру таяния льда; 5) температуру отвердевания ртути (-39°);

6) низшую температуру на земной поверхности (-68°) — близ южного полюса; 7) низкую температуру, достигнутую в лаборатории ($-272,18^{\circ}$).

2. Выразите по шкале Цельсия следующие абсолютные температуры: 1) температуру отвердевания водорода (16°); 2) температуру кипения воздуха (80°); 3) среднюю температуру поверхности воды в океанах (290°); 4) температуру человеческого тела (310°); 5) температуру вольтовой дуги (3800°).

75. Формула газового состояния. Закон Бойля-Мариотта устанавливает зависимость между давлением и объёмом при постоянной температуре; законы же Гей-Люссака и Шарля дают зависимость от температуры одной величины — объёма или давления — при неизменном значении другой.

Но в природе и технике большей частью происходят изменения всех трёх величин одновременно.

При поднятии нагретых от земли воздушных масс одновременно изменяются их объём, давление и температура. При наполнении на заводе чистым кислородом из заводского баллона стальных баллонов, в которых сжатый кислород развозится потребителям, также одновременно происходит изменение давления и температуры. В двигателях внутреннего сгорания при испышке горючего под поршнем одновременно изменяются все величины, характеризующие состояние газа.

Поэтому является чрезвычайно важным установить соотношение между всеми 3 величинами: объёмом, давлением и температурой данной массы газа.

Во всех приведённых примерах участвуют не идеальные газы, а реальные, но к изучению свойств последних можно подойти постепенно через изучение свойств идеального газа, для которого имели бы место законы Бойля-Мариотта, Гей-Люссака и Шарля.

Связь между величинами — объёмом, давлением и температурой — для данного количества газа может быть выражена математически.

Вывод формулы газового состояния для идеального газа производится путём последовательного применения законов Бойля-Мариотта и Гей-Люссака.

Обозначим объём при 0° через V_0 и соответствующее давление через p_0 . Если, не меняя давления p_0 , нагреть то же количество газа до температуры t° , то его новый объём при этой температуре V_1 будет связан с объёмом V_0 формулой Гей-Люссака: $V_1 = V_0(1 + \beta t)$. Если при той же температуре t° довести давление до p , то газ займёт некоторый новый объём V , и, по закону Бойля-Мариотта, $Vp = V_1p_0$.

Данные начального, конечного и промежуточного состояний газа можно расположить в виде следующей таблицы:

Состояние	Объём	Давление	Температура	
Начальное . . .	V_0	p_0	t_0	$\left. \begin{aligned} V_1 &= V_0(1 + \beta t) \\ Vp &= V_1 p_0 \end{aligned} \right\}$
Промежуточное .	V_1	p_0	t	
Конечное	V	p	t	

Подставляя значение V_1 в последнюю формулу, получим:

$$Vp = V_0 p_0 (1 + \beta t), \text{ или } \frac{Vp}{1 + \beta t} = V_0 p_0.$$

Так как то же рассуждение можно повторять и для температур $t_1, t_2, t_3, \dots$ и каждый раз получать сходные формулы, то:

$$\frac{V_1 p_1}{1 + \beta t_1} = \frac{V_2 p_2}{1 + \beta t_2} = \frac{V_3 p_3}{1 + \beta t_3} = \dots = \frac{Vp}{1 + \beta t} = V_0 p_0,$$

или:

$$\boxed{\frac{Vp}{1 + \beta t} = V_0 p_0}, \quad (XIIa)$$

$$\boxed{\frac{Vp}{1 + \beta t} = C}, \quad \text{где } C \text{ — постоянная величина.}$$

Произведение объёма газа на его давление, делённое на коэффициент объёмного расширения, для данной массы газа есть величина постоянная.

Но

$$1 + \beta t_1 = 1 + \frac{t_1}{273} = \frac{273 + t_1}{273} = \frac{T_1}{273},$$

где T_1 — абсолютная температура; также

$$1 + \beta t_2 = \frac{T_2}{273}.$$

Подставляя полученные величины в написанное выше равенство, будем иметь:

$$\frac{273 V_1 p_1}{T_1} = \frac{273 V_2 p_2}{T_2} = \dots = V_0 p_0,$$

или по сокращении на 273:

$$\frac{V_1 p_1}{T_1} = \frac{V_2 p_2}{T_2} = \dots = \frac{V_0 p_0}{273}.$$

Так как $V_0 p_0$ есть величина постоянная, то и частное $\frac{V_0 p_0}{273}$ есть также величина постоянная, которая может быть обозначена через B ; тогда предыдущие равенства примут вид, известный под именем уравнения Клапейрона:

$$\boxed{\frac{V_1 p_1}{T_1} = \frac{Vp}{T}}, \quad \text{или} \quad \boxed{\frac{Vp}{T} = B}. \quad (XIIb)$$

Для данной массы газа произведение объема на давление, деленное на абсолютную температуру, есть величина постоянная.

Упражнение 7.

1. Шар, содержащий 6 л воздуха при нормальном давлении, сообщается с пустым сосудом в 4 л. Какое установится давление после соединения сосудов?

2. Кислородный баллон, содержащий 8 л кислорода под давлением в 6 ат, сообщается с пустым сосудом, после чего устанавливается давление в 2 ат. Какова ёмкость присоединённого пустого сосуда? *Отв. 16 л.*

3. Воздух в колбе при 0° и нормальном атмосферном давлении имеет объём в 3 л. Определить его объём при 10° и при давлении в 74 см рт. ст.

4. Водород при 15° занимает объём в 2 л при давлении в 100 см рт. ст. Каково будет его давление, если объём уменьшится до 1,5 л, а температуру повысить до 30° ? *Отв. 140 см рт. ст.*

5. Воздух при 0° и давлении в 75 см рт. ст. занимает объём в 1,2 л. При какой температуре он займёт объём в 1 л при нормальном давлении? *Отв. — 42° .*

6. При 0° и при нормальном атмосферном давлении воздух в колбе весит 1 г. Какой объём займёт этот воздух при температуре в -10° и при давлении в 114 см рт. ст.? Для воздуха $d_0 = 0,00129 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$. *Отв. 498 см³.*

7. Сколько будет весить 1 см³ воздуха на глубине 103 м под поверхностью воды при температуре в 4° ? *Отв. 0,014 г.*

8. Пузырёк воздуха имеет объём в 0,1 см³ на глубине 1 м под поверхностью воды при температуре в 100° . Какой объём займёт он, когда вылетит из воды под нормальное атмосферное давление и примет температуру 15° ?

9. Найти удельный вес углекислого газа при $t = 100^\circ$ и давлении в 80 см рт. ст., если $d_0 = 0,002 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$. *Отв. $0,0015 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$.*

10. Найти вес углекислого газа в газовом баллоне, если его объём равен 30 л, давление 40 ат, а температура 15° . *Отв. 2275 г.*

11. Кислород в газовом баллоне имеет объём 18 л, давление 32 ат и температуру 15° . Найти вес кислорода и определить, при какой температуре его давление станет 40 ат (объём не изменяется); $d = 0,00143 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$.

12. Определить вес водорода, наполняющего воздушный шар в 3000 м³, при давлении в 72 см рт. ст. и при температуре в -5° , если $d_0 = 0,00009 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$. *Отв. 260 кг.*

13. Рисунок 67а представляет кривую давления газа, образующегося при сгорании пороха на стенках ружейного канала. Объяснить ход кривой давления. Чему равно давление в точках Б и К? На каком расстоянии от точки А по размеру рисунка давление равно 1000 ат?

76. Молекулярно-кинетическая теория газа. Всякий газ, как и любое другое тело, состоит из молекул. Способность газа быстро занимать весь возможный для него объём указывает, с одной стороны, на ничтожно малые силы сцепления между его молекулами, с другой, — на то, что молекулы газа движутся поступательно со значительными скоростями.

Ближе всего движение газовых молекул можно уподобить движению роя мошек в хороший летний вечер. Весь рой, подобно

газу в сосуде, долго сохраняет некоторый определённый объём, но отдельные мошки носятся в нём беспорядочно во все стороны. Молекулы изменяют свой прямолинейный путь вследствие столкновений с другими молекулами и со стенками сосуда, от которых они отскакивают, как упругие шары.

Эти беспрестанно повторяющиеся удары бесчисленного множества молекул и создают собой то давление, которое производит газ на стенки сосуда и на тела, помещённые в газ. Ни наши органы чувств, ни наши приборы не в состоянии отметить удары

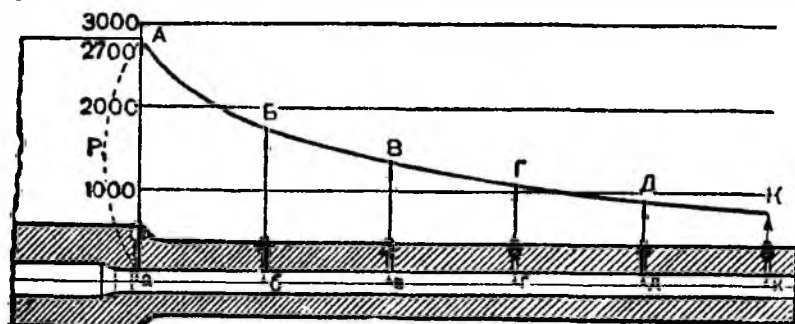


Рис. 67а.

отдельных молекул, которые могут происходить с различными импульсами¹⁾. Воспринимается некоторая средняя величина импульсов, которая и составляет давление газа.

При беспорядочном движении молекул и очень большом их числе в среднем будет происходить одинаковое число ударов по любому направлению, почему и давление газа на все стенки одинаково. Та же беспорядочность движения в среднем приводит к тому, что равнодействующая всех сил ударов, действующих на стенку, должна быть перпендикулярна стенке или любой другой поверхности внутри газа.

Как объяснить закон Бойля-Мариотта на основе этой теории? При уменьшении объёма уменьшаются пути пробега между последовательными ударами о стенки, следовательно, учащаются удары и вместе с этим увеличивается давление. При увеличении объёма происходит противоположное явление.

Молекулы сталкиваются не только со стенками сосуда, но и друг с другом. По теоретическим подсчётам средний свободный пробег λ между двумя столкновениями молекул выражается следующими числами при 0° и давлении в 1 ат: для $H_2 \lambda = 11,2 \cdot 10^{-6} \text{ см}$, для $O_2 \lambda = 6,5 \cdot 10^{-6} \text{ см}$, для $N_2 \lambda = 6,0 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2$.

¹⁾ Импульс измеряется произведением силы на время её действия.

²⁾ Все числа в этом и следующем параграфах приводятся для ознакомления, но не для обязательного заучивания.

Молекулы водорода испытывают $15,1 \cdot 10^9$ соударений в секунду, молекулы кислорода $6,55 \cdot 10^9$ и молекулы азота $7,55 \cdot 10^9$.

Продолжительность свободного пробега молекул водорода $0,66 \cdot 10^{-10}$ сек., кислорода $1,52 \cdot 10^{-10}$ сек. и азота $1,32 \cdot 10^{-10}$ сек.

Принимая во внимание громадное число столкновений, можно понять отступление от закона Бойля-Мариотта, наблюдаемое при больших давлениях. При значительном уменьшении объема число столкновений между молекулами сильно возрастает; вместе с тем увеличивается и взаимодействие между молекулами, мало заметное при обычных условиях.

С другой стороны, каждая молекула занимает определённый объем. Так, диаметр молекулы водорода равен $2,3 \cdot 10^{-8}$ см, кисло-

рода $2,9 \cdot 10^{-8}$ см, азота $3,1 \cdot 10^{-8}$ см. Сжатие может происходить в действительности только за счёт той части объема, которая составляет разность между объемом сосуда, занятого газом, и суммой объемов всех молекул, заключённых в газе. Чем сильнее сжат газ, тем меньше объем, за счёт которого может происходить сжатие. Между тем в формулу закона Бойля-Мариотта входит весь объем, занятый газом. В этом заключается вторая причина отклонения действительного поведения газов при сжатии от идеального газа (§ 72).

Перейдём теперь к объяснению закона Шарля. Этот закон связан со скоростями движения молекул. Средняя скорость молекулы u , с которой она движется в кратчайшие промежутки времени по свободному пути между ударами, выражается следующими числами, как показывают теория и непосредственное измерение на опыте: для водорода $\bar{u} = 1845 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$, для кислорода $\bar{u} = 460 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$, для азота $\bar{u} = 493 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$ при 0° и давлении в 1 ат.

С повышением температуры скорость молекул возрастает. Когда газ нагревается при постоянном объеме, от возрастания скоростей его молекул увеличиваются импульсы ударов их о стенки и, следовательно, увеличивается давление, о чём и говорит закон Шарля.

Присоединим к сказанному одно замечание относительно скорости молекулярного движения. Когда говорится о скорости молекул, то не надо думать, что все молекулы имеют совершенно одинаковые скорости. При беспорядочных столкновениях скорости одних молекул могут увеличиваться, других — уменьшаться, но в общем все явления происходят так, как будто скорости всех молекул были одинаковыми. На самом деле приближённые теоретические вычисления показывают, что если, например, при какой-либо температуре средняя скорость равна $485 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$, то 1% всех

молекул имеет скорость ниже $100 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$, около 8% — между 100 и $200 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$, 15% — между 200 и $300 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$, 20% — между 300 и $400 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$, 21% — между 400 и $500 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$, 17% — между 500 и $600 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$, 10% — между 600 и $700 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$ и 8% — свыше $700 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$.

Теоретические выводы показывают также, что *средняя кинетическая энергия молекулы пропорциональна абсолютной температуре.*

77. Грамм-молекула газа и число молекул в ней. Грамм-молекулой газа (так же, как и любого вещества) называется масса газа, содержащая такое количество граммов, каким числом выражается молекулярный вес данного вещества.

Грамм-молекула водорода составляет 2,016 г, кислорода 32 г, азота 28 г. Так как плотность водорода $D = 0,000090 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$, кислорода $D = 0,001429 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$, азота $D = 0,001251 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$, то по формуле

$V = \frac{m}{D}$ можно рассчитать, что грамм-молекула любого газа занимает один и тот же объём, именно $V = 22,41$ л при нормальных условиях.

Рядом соображений, связывающих теоретические выводы с экспериментально найденными величинами, установлено, что *грамм-молекула любого вещества содержит одно и то же число молекул.*

Это число молекул в грамм-молекуле вещества названо в честь итальянского физика Авогадро, высказавшего приведённое положение, числом Авогадро.

По наиболее точным подсчётам число Авогадро $N_A = 6,06 \cdot 10^{23}$.

Отсюда можно получить число молекул в 1 см^3 при 0° и атмосферном давлении, которое приведено в § 57, именно:

$$\frac{6,06 \cdot 10^{23}}{22410} = 2,7 \cdot 10^{19} \text{ (число Лосмидта).}$$

Так же можно рассчитать массу любой молекулы или атома. Например, масса атома водорода, молекула которого двукратна

$$\text{равна } \frac{2,016}{2 \cdot 6,06 \cdot 10^{23}} = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ г.}$$

78. Технические применения свойств газов. Газы находят очень широкое применение в технике. В частности они используются в двигателях внутреннего сгорания. Относя рассмотрение двигателей в отдел тепловых машин, остановимся сперва на кратком описании некоторых из тех машин, которые приводятся в движение сжатым воздухом. В сжатом виде воздух служит рабочим веществом для приведения в действие различных так называемых пневматических машин и инструментов. Сжатый воздух, который нагнетается в цилиндры, помещаемые под вагонами, приводит в движение колодки воздушных вагонных тормозов. При помощи сжатого и разреженного воздуха производится транспорти-

рование по трубам грузов. Такие передачи применяются на крупных предприятиях и даже в больших городах (так называемая пневматическая почта). Воздух соответствующей температуры и влажности нагнетается для отопления и освежения помещений, а также для сушки или увлажнения сырья и готовых изделий на складах производства. Машины, предназначенные для сжатия и перемещения воздуха с целью проветривания (вентиляции) помещений, рудников, для сжигания топлива в печах, для приведения в движение орудий и машин, называются воздуходушными машинами.

Передвижение воздуха из атмосферы в воздухопровод можно производить двумя способами или всасыванием (тогда в воздухопроводе устанавливается давление меньше атмосферного — депрессия) или нагнетанием (тогда давление в воздухопроводе превосходит атмосферное). Отсасывание воздуха из рудников и помещений производится преимущественно вентиляторами; нагнетание — особыми машинами, называемыми компрессорами.

Пропускная способность воздуходушных машин в настоящее время громадна: до 2000 м³ воздуха в минуту для печей и до 12 000 $\frac{\text{м}^3}{\text{мин}}$ для проветривания рудников.

Среди вентиляторов широкое применение имеют центробежные вентиляторы, по своему устройству подобные центробежному насосу (см. ч. I, § 119). При вращении лопастного колеса частицы воздуха, находившиеся между лопатками колеса, увлекаются им, приходят в движение, по инерции вылетают из колеса в кожух и через выдувное отверстие выбрасываются наружу.

Вместе с тем через осевое отверстие засасываются новые части воздуха, которые повторяют тот же процесс.

Вентиляторы, кроме проветривания помещений, применяются также на предприятиях для удаления отходов, получающихся при производстве (газов, пыли, опилок, осёсов), для воздушного транспортирования лёгких материалов (стружек, шерсти, волоса, льна, зерна и т. п.), для искусственной тяги в паровых котлах и т. п.

В качестве компрессора, или нагнетательного насоса, может быть применён почти любой разрежающий насос, устройство которого известно из начального курса. При всасывании воздуха из одного объёма тот же поршень может производить нагнетание в другой. Рисунок 68 изображает продольный разрез компрессора.

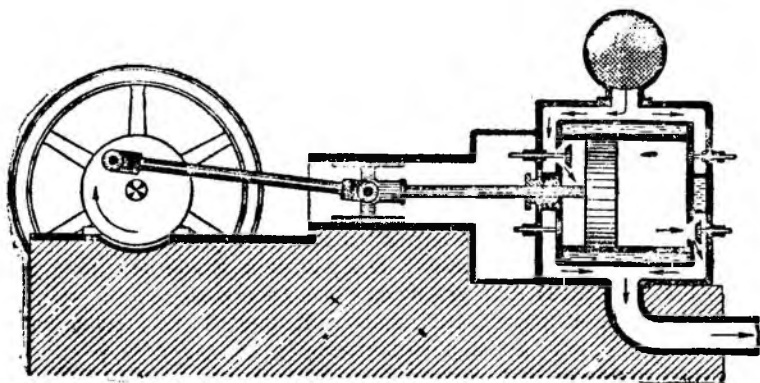


Рис. 68. Продольный разрез компрессора.

Также очень велико применение сжатого воздуха в военной технике как в морских, так и в сухопутных средствах защиты. Весьма действенными средствами защиты против мощных броненосцев являются самодвижущиеся торпеды. Самое выбрасывание торпед с миноносца производится посредством сжатого воздуха.

Другое, ещё более опасное для крупных судов изобретение — подводная лодка — также может работать благодаря сжатому воздуху, выталкивающему воду из камер, когда надо поднимать лодку вверх, к поверхности моря.

Наконец, давление газов используется во всяком автоматическом оружии для открытия затвора, для выбрасывания гильзы, вставки нового патрона и закрытия затвора, а также для торможения ствола орудия, для уменьшения откатки вследствие отдачи и для возвращения его в прежнее положение.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСВОЕНИЯ.

1. В чём состоит закон Бойля-Мариотта?
2. В чём состоит закон Гей-Люссака?
3. Как выражается уравнение газового состояния?
4. Какой формулой выражается изменение давления газа от нагревания при постоянном объёме?
5. Что принимается за абсолютный нуль температуры?
6. Что такое абсолютная температура и как переводить температуру по Цельсию в абсолютную и обратно?

Литература. Игнатъев, Воздух и газообразные тела. Перельман, Физическая хрестоматия, вып. 1, Свойства газов. Вуков, Физика и оборона страны, кн. 1, стр. 15 — 17.

3. Свойства жидкостей.

79. Форма поверхности жидкости под действием внешней силы. Жидкости чрезвычайно распространены в природе (вода, нефть) и находят широкое применение в технике (в гидравлических прессах, металлургическом литье, жидком топливе).

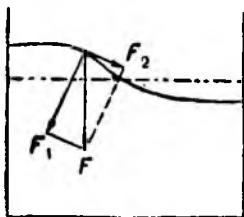


Рис. 69.

Основным внешним признаком жидкого состояния является удобоподвижность частиц, т. е. лёгкая смещаемость одних частиц относительно других. Отсюда вытекают некоторые особенности жидкого состояния.

Так как частицы жидкости легко перемещаются под действием малейшей силы, то равновесие жидкости может наступить

только в том случае, когда поверхность жидкости установится нормально к действующей силе. В самом деле, если в какое-нибудь мгновение сила F действует под углом на поверхность жидкости (рис. 69), то эту силу F , например вес жидкости, можно разложить на две составляющие: одну по перпендикуляру к поверхности — нормальную составляющую F_1 ; другую по касательной к поверхности — тангенциальную составляющую F_2 . Нормальная составляющая не

может вызвать перемещение частицы жидкости, так как направлена в пространство, заполненное другими частицами. Тангенциальная составляющая, как бы она ни была мала, вызовет скольжение частиц по поверхности, что повлечёт немедленное изменение поверхности. Это изменение будет происходить до тех пор, пока не исчезнет тангенциальная составляющая, т. е. пока поверхность жидкости не установится нормально к действующей силе. В больших водоёмах, больших озёрах, морях, океанах поверхность воды оказывается кривой; она имеет форму шара или, точнее, геоида, т. е. поверхности, во всех точках перпендикулярной действующим в этих местах силам земного притяжения. На этом же основании

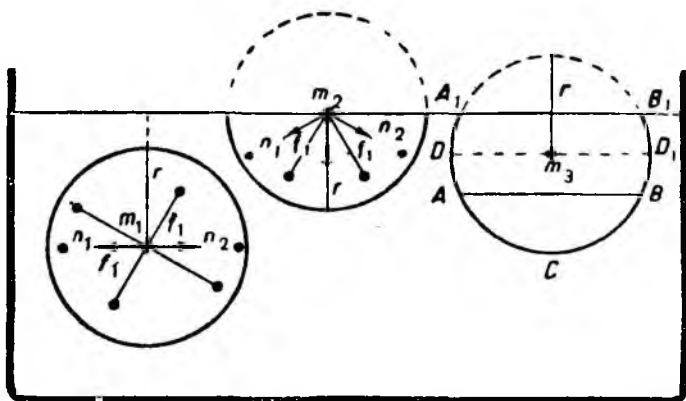


Рис. 70. Взаимодействие молекулы с другими молекулами в пределах сферы молекулярного действия.

слои разнородных жидкостей, помещённых в быстро вращающийся сосуд, располагаются при вращении нормально к равнодействующей силы тяжести и центростремительной силы (ч. I, § 119).

80. Поверхностный слой жидкости. Сцепление (см. § 59), существующее между молекулами жидкости, приводит поверхностный слой её в особое состояние. Если молекула m_1 (рис. 70) находится на глубине, то проведённая вокруг неё, как из центра, сфера молекулярного действия (§ 59) вся лежит внутри жидкости. Для всякой молекулы n_1 , действующей на m_1 с силой f_1 , найдётся другая симметричная¹⁾ ей относительно центра молекула n_2 , которая будет действовать на m_1 с той же силой f_1 , но только противоположно направленной; общее действие двух симметричных

¹⁾ Симметричными точками относительно данной точки называются такие две точки, которые лежат на одной прямой, проходящей через эту точку, на равных расстояниях от неё.

молекул, а следовательно, и всех молекул внутри сферы, на центральную молекулу m_1 равно нулю.

Но если взять другую молекулу m_2 на границе жидкости и её пара и провести вокруг неё сферу молекулярного действия, то только половина сферы действия будет лежать внутри жидкости, а другая половина — внутри её пара. Рассмотрим действие на выбранную нами молекулу m_2 только тех молекул, которые лежат в нижней полусфере. Действием верхней полусферы можно пренебречь, так как она заполнена молекулами пара, действие которых на m_2 ничтожно мало сравнительно с действием молекул жидкости.

Для всякой молекулы n_1 , действующей на m_2 с силой f_1 , можно найти другую молекулу n_2 , симметричную первой относительно вертикального диаметра, действующую на m_2 с такой же силой f_1 , направленной под тем же углом, но только по другую сторону диаметра. Их равнодействующая, как диагональ ромба, будет направлена вертикально вниз по диаметру. Так же будут направлены равнодействующие и от всех других симметричных молекул. Таким образом, общая равнодействующая всех сил сцепления, с которыми действуют на молекулы m_2 все молекулы полусферы молекулярного действия, будет направлена внутрь жидкости, перпендикулярно поверхности.

Подобная же сила, только меньшего размера, будет действовать и на всякую молекулу m_3 , находящуюся ниже поверхности на расстоянии, меньшем радиуса сферы молекулярного действия. Действия на m_3 молекул, лежащих в двух симметрических слоях $BADD_1$ и $DA_1B_1D_1$, одного выше молекулы m_3 , другого ниже, взаимно уничтожаются, и остаётся только действие молекул сегмента ACB .

Итак, *весь поверхностный слой жидкости толщиной в радиус сферы молекулярного действия производит на остальную жидкость особое давление, направленное внутрь жидкости по перпендикуляру к поверхности.*

Это давление называется молекулярным, или поверхностным, давлением.

Толщина поверхностного слоя не превышает 10^{-7} см.

Молекулярное давление не может быть непосредственно измерено. Оно вычисляется из других данных, получаемых из опытов. Молекулярное давление очень велико. Так, для эфира оно равно 1400 ат, для спирта 2400 ат, для воды 11 000 ат.

При первом знакомстве с молекулярным давлением возникает вопрос, почему громадное молекулярное давление воды (или другой жидкости) не раздавливает погружённые в неё тела.

Эти силы действуют между слоями жидкости; они сближают слои молекул между собой и являются причиной того, что жидкости чрезвычайно мало сжимаются при увеличении внешнего давления на них (§ 81). Молекулярное давление не передаётся по закону Паскаля, в противоположность любому внешнему давлению.

нию на жидкость. Понять эту особенность молекулярного давления поможет сравнение его с силой притяжения между магнитом и куском железа.

Предположим сперва, что на стол положен кусок меди, а на него поставлен полюсами подковообразный магнит. Давление на стол будет производиться суммой весов куска меди и магнита. Заменяем теперь медь куском железа такого же веса, как и медь, и на него поставим тот же подковообразный магнит.

Давление на стол останется прежним, несмотря на то, что между магнитом и железом действует значительная сила внутреннего притяжения.

81. Сжимаемость жидкостей. Существование в жидкости громадного молекулярного давления объясняет очень малую сжимаемость жидкостей при увеличении внешнего давления на них. Всякое внешнее давление составляет только ничтожную часть молекулярного давления. Так, при увеличении внешнего давления на каждую атмосферу объем уменьшается:

У воды из 48 миллионных долей (в пределах 1—500 ат)	
• • • 26	• • • (• • • 2500—3000 • • •)
• ртути • 3	• • •
• эфира • 146	• • •

Понятно, что для небольших сил такой сжимаемостью можно пренебречь.

Поэтому признаком жидкого состояния для значительных количеств вещества можно считать отсутствие собственной формы и сохранение постоянного объема.

Надо заметить, что изменение объема происходит не только при положительном давлении, но и при отрицательном, т. е. при растяжении. Такие случаи наблюдались при охлаждении жидкости в запаянных трубках, когда жидкость вследствие прилипания к стенкам сжималась меньше, чем следовало ожидать, судя по температурному коэффициенту, т. е. растягивалась.

По устранении избыточного давления объем жидкости принимает прежний размер. Следовательно, жидкость обладает объемной упругостью.

82. Потенциальная энергия поверхностного слоя. Поверхностное натяжение. Так как давление направлено внутрь жидкости, то всякое попадание молекулы из глубины в этот поверхностный слой связано с преодолением этого давления; работа, затраченная на преодоление этого давления, превращается в потенциальную энергию, подобно тому как работа, затраченная на преодоление веса поднимаемого тела, превращается в потенциальную энергию поднятого тела. Но как поднятое тело, предоставленное самому себе, падает на более низкий уровень, т. е. переходит в такое положение, в котором его потенциальная энергия становится

меньше, так и молекулы поверхностного слоя стремятся перейти в такое положение, при котором их потенциальная энергия уменьшилась бы; уменьшение же потенциальной энергии может происходить только за счёт уменьшения самого поверхностного слоя. При всяком возможном перемещении молекул жидкости под действием сил сцепления они перемещаются так, чтобы величина поверхностного слоя уменьшилась. Поэтому, *во всякой жидкости поверхностный слой находится в состоянии натяжения вдоль поверхности, стремясь её сократить.*

Это сокращение поверхности жидкости вследствие её сил сцепления, происходящее всякий раз, когда молекулы жидкости могут перемещаться, рассматривается как результат силы, называемой силой поверхностного натяжения, или просто поверхностным натяжением.

Поверхностное натяжение направлено вдоль поверхности. Если поверхность плоская, поверхностное натяжение совпадает с плоскостью; если поверхность жидкости кривая, поверхностное натяжение направлено по касательной к поверхности. Когда говорят о поверхностном натяжении, то условливаются его относить к единице длины.

Таким образом, можно дать следующее определение: *поверхностное натяжение измеряется силой, вызывающей сокращение поверхности жидкости; сила эта направлена по касательной к поверхности и относится к единице длины.*

Единицей, которой измеряется поверхностное натяжение в системе CGS, является $\frac{\text{дина}}{\text{см}}$.

Обозначается поверхностное натяжение буквой α .

Величина поверхностного натяжения дана в следующей таблице в $\frac{\text{дин}}{\text{см}}$ при 20°:

Вещество	Вода	Керосин	Ртуть	Спирт	Эфир
α	72,5	24	472	22	16,5

При повышении температуры поверхностное натяжение уменьшается, как видно из следующей таблицы для воды:

t	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
α	75,5	74	72,5	71	69,5	67,8	66	64	62

83. Опыты, обнаруживающие свойства поверхностного слоя.

Остановимся сперва на опытах, которые непосредственно обнаруживают стремление поверхностного слоя стягиваться.

1. Проволочный прямоугольник, одна сторона которого (CD) на колечках может скользить по двум другим сторонам, опускается в мыльную воду для образования мыльной плёнки (рис. 71). Плёнка стягивается и увлекает за собой подвижную сторону. Её

можно удержать в покое, привесив к подвижной стороне соответственно подобранный грузик. На таком опыте можно измерить величину поверхностного натяжения.

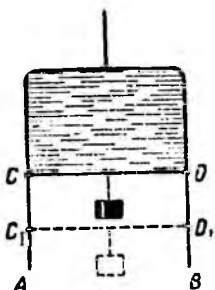


Рис. 71. Натяжение вдоль границы жидкой плёнки можно уравновесить весом гирьки.

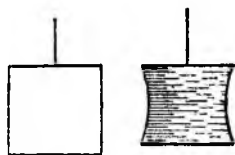


Рис. 72. Натяжение плёнки втягивает нитяные стороны прямоугольника внутрь.

2. Прямоугольник составляется из двух проволочных и двух противоположных нитяных сторон (рис. 72). В воздухе нитяные стороны параллельны между собой; при образовании между сторонами плёнки после опускания в мыльную воду нитяные стороны изгибаются поверхностным натяжением внутрь площади в виде дуг.

3. В проволочном кольце с свободно привязанной нитью образуется мыльная плёнка (рис. 73). Когда нагретой проволокой прорывается часть плёнки по одну сторону нити, поверхностное натяжение вытягивает нить в виде дуги окружности. Такое изгибание по дуге окружности указывает на то, что поверхностное натяжение действует равномерно на каждую единицу длины перпендикулярно к ней.

4. Предыдущий опыт можно видоизменить, положив на плёнку, образованную в проволочном кольце, нитяную петлю (рис. 74). Если прорвать плёнку внутри петли, то она растягивается в виде окружности.

5. Особое свойство поверхностной плёнки можно обнаружить, если налить в химический стакан воды, насыпать на поверхность её тонкий слой плаунового семени и постепенно опускать в неё

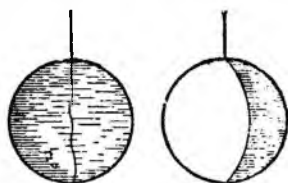


Рис. 73. Натяжение плёнки натягивает нить по дуге.

палец или стеклянную палочку, покрытую жиром (рис. 75). Через стенки сосуда можно наблюдать, как под пальцем или палочкой прогибается плёнка. Когда палец и палочка вынуты из воды, они оказываются сухими.

Следующая группа опытов указывает на стремление жидкости принять такую форму, чтобы поверхность её была наименьшей. Геометрия показывает, что для данного объёма наименьшую поверхность из всех геометрических форм имеет шар.

Поэтому надо ожидать, что жидкость под действием сил сцепления будет принимать шаровую форму. Действительно, шаровую форму мы видим в каплях росы, дождя.

6. Небольшое количество ртути, выпущенное на стеклянную пластинку, разбивается на маленькие шарики. Чем меньше количество ртути, тем ближе форма капли к шаровой.

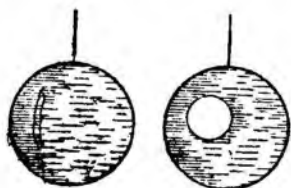


Рис. 74. Поверхностное натяжение действует на каждую единицу длины нити равномерно и перпендикулярно к ней.

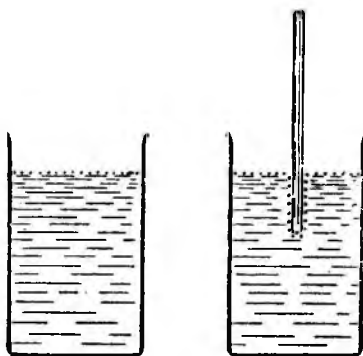


Рис. 75. Смазанная жиром стеклянная палочка при погружении в воду прогибает поверхностную плёнку.

7. Можно наблюдать форму жидкости под действием поверхностного натяжения и для значительных количеств жидкости, если уравновесить её вес другой силой. По закону Архимеда тело, погружённое в жидкость, испытывает со стороны жидкости выталкивающую силу снизу вверх, равную весу жидкости в объёме тела. Если взять раствор поваренной соли такой крепости, чтобы его удельный вес был равен удельному весу анилина, то капля анилина, опущенная в раствор, будет испытывать снизу вверх выталкивающую силу, равную весу вытесненного раствора; вес этот вследствие равенства удельных весов раствора и анилина будет равен весу капли анилина. Поэтому вес капли анилина будет уравновешен противоположно направленной выталкивающей силой, и форма капли будет определяться поверхностным натяжением; в такой смеси капля анилина принимает шарообразную форму (рис. 76). Образовав несколько шариков и сближая их друг с другом, можно наблюдать их слияние. Сливаясь, они сохраняют шаровую форму.

Геометрия опять-таки показывает, что при сложении объёмов двух шаров общая шаровая поверхность меньше суммы поверхностей двух слагаемых шаров.

8. Если плёнки образуются между проволочными каркасами, имеющими различные геометрические формы (рис. 77, 78), то для всякого каркаса жидкая плёнка всегда устанавливается совершенно определённым образом, именно таким, при котором её поверхность имеет наименьшую величину из всех возможных комбинаций.

Перейдём теперь к опытам, которые показывают, что поверхностное натяжение данной жидкости меняется, если изменяется вещество, с ней соприкасающееся, или если в ней растворяются другие какие-либо вещества.

9. Если посыпать поверхность воды тонким слоем плаунового семени и сверху поднести пробирку, в которой испарились две-три капли эфира, то под пробиркой семя разбегается в сторону, образуя чистые „окна“ воды. Под влиянием эфира поверхностное натяжение воды уменьшается, а части плёнки, оставшиеся в соприкосновении с воздухом и сохранившие прежнюю величину поверхностного натяжения, растягивают в стороны ту часть поверхности, которая оказывается под парами эфира.

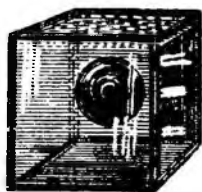


Рис. 76. Форма жидкости под действием только сил сцепления.

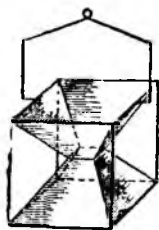


Рис. 77.

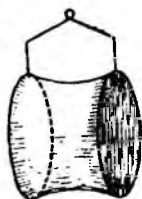


Рис. 78.

10. Маленькие кусочки камфоры или мыла, положенные на поверхность чистой воды, начинают бегать по ней зигзагами. По поверхности растекаются струи раствора камфоры или мыла, неравномерно уменьшая по разным направлениям поверхностное натяжение чистой воды, отчего кусочки и смещаются в ту сторону, где в данный момент натяжение больше.

84. Смачивание. В опытах по обнаружению сцепления в жидкостях (§ 59, 2) нижняя часть пластинки после отрывания её от жидкости оказывалась покрытой каплями жидкости. Следовательно, сцепление между данной жидкостью и данным твёрдым телом сильнее, чем между молекулами жидкости.

Жидкости, у которых сцепление с твёрдым телом больше, чем между их собственными молекулами, называются смачивающими данное твёрдое тело; те же, в которых сцепление с твёрдым телом меньше, чем между их молекулами, называются не смачивающими. Примеры смачивающих жидкостей: вода, спирт по отношению к чистому стеклу, ртуть по отношению

к меди, железу, олову, цинку¹⁾). Примеры несмачивающих жидкостей: вода по отношению к покрытому жиром стеклу (вообще по отношению ко всякому жировому слою), ртуть по отношению к стеклу.

Сцепление между твёрдым телом и несмачивающей жидкостью можно измерить на подобном же опыте, как в § 59, приводя, например, стеклянную пластинку в соприкосновение с ртутью.

85. Мениск. Так как жидкости обыкновенно заключены в сосуды, а между твёрдым телом и жидкостью существует сцепление, то надо ожидать, что это последнее будет влиять на форму поверхности жидкости у стенок сосуда. Рассмотрим молекулу m на границе поверхности жидкости и стенки сосуда и представим себе вокруг неё сферу молекулярного действия.

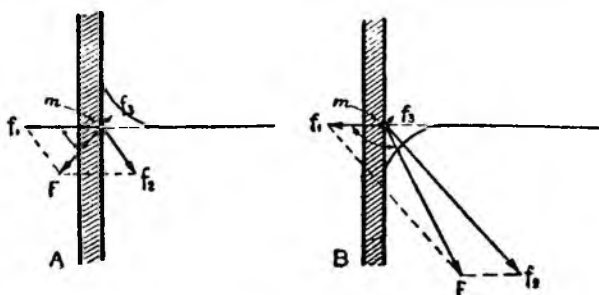


Рис. 79. Образование мениска: А — в случае смачивания; Б — в случае несмачивания.

Как можно сообразить по рисунку 79, половина сферы придётся на твёрдое тело, четверть — на жидкость и четверть — на её пары. Молекулы твёрдого тела, заключённые в полусфере, будут действовать на молекулу m с равнодействующей силой f_1 , направленной внутрь стенки сосуда перпендикулярно к ней; молекулы жидкости, заключённые в нижней четверти сферы, действуют на молекулу m с силой f_2 , направленной внутрь жидкости под углом в 45° к поверхности, и молекулы пара действуют на ту же молекулу m с силой f_3 , направленной внутрь пара под углом 45° к поверхности. Равнодействующая всех сил, включая и вес, может быть найдена по правилу параллелограмма. Но так как сила f_3 и вес очень малы сравнительно с остальными, то для упрощения чертежа можно ограничиться отысканием равнодействующей F только для двух первых сил, которая и определит характер явления. В тех случаях, когда сцепление между жидкостью и твёрдым телом больше сцепления между молекулами жидкости, т. е. для

¹⁾ Особенно, если последние предварительно протереть тряпкой, смоченной раствором серной кислоты.

смачивающих жидкостей, равнодействующая направлена внутрь твёрдого тела, для несмачивающих жидкостей — внутрь жидкости.

Приведённое рассуждение имеет место не только для молекулы, находящейся на самой границе, но и для других молекул, лежащих в поверхностном слое, толщина которого не больше радиуса сферы молекулярного действия. Жидкость может находиться в покое только в том случае, если поверхность её перпендикулярна в каждой точке силе, действующей на неё в этой точке. Поэтому *поверхность смачивающей жидкости изгибается у стенки, поднимаясь вдоль неё* (рис. 80); *поверхность несмачивающей — изгибается, опускаясь у стенки* (рис.

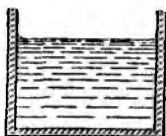


Рис. 80. Вогнутый мениск смачивающей жидкости.

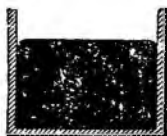


Рис. 81. Выпуклый мениск несмачивающей жидкости.

81). На некотором расстоянии от стенки форма поверхности определяется направленной вертикально вниз силой тяжести и силой поверхностного давления; поверхность в результате действия этих сил становится горизонтальной. Кривая поверхность жидкости называется мениском (луночкой).

Таким образом, *в трубках смачивающие жидкости имеют вогнутый мениск, несмачивающие — выпуклый*.

Кривизна мениска становится тем заметнее, чем меньше поверхность жидкости. Поэтому она значительна в узких трубках (рис. 82) и мало заметна в широких сосудах. В последних кривизна поверхности наблюдается только у самых стенок.

86. Зависимость поверхностного давления от формы мениска. Наблюдаемые на опыте различные формы мениска влияют на величину поверхностного давления.

Поверхностное натяжение, т. е. та сила, которая вызывает сокращение поверхности, всегда направлено вдоль поверхности.

Если поверхность кривая, то малые части всякой дуги, по ней проведённой, могут быть приближённо заменены хордами. Поэтому в точках вогнутого или выпуклого мениска силы поверхностного натяжения могут рассматриваться, как направленные под углом друг к другу (рис. 83). В случае вогнутого мениска эти силы дают равнодействующую, направленную вверх, в случае выпуклого — вниз. В первом случае эта равнодействующая уменьшает

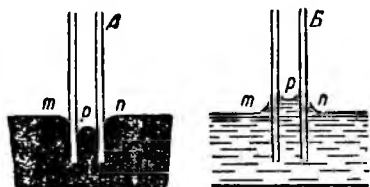


Рис. 82. Мениск в трубках: А — в случае несмачивания; Б — в случае смачивания.

молекулярное давление на жидкость, во втором — увеличивает его.

Следовательно, *поверхностное давление при вогнутом мениске меньше, а при выпуклом больше, чем при плоском.*

87. Капиллярность. Если в сообщающиеся стеклянные сосуды, из которых один широкий, а другой очень узкий, налить воду,

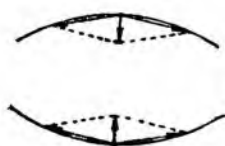


Рис. 83. Поверхностное давление зависит от формы мениска.

то уровень воды в узком сосуде стоит выше, чем в широком (рис. 84,а). Подобное явление происходит со всякой жидкостью, смачивающей вещество, из которого сделаны трубки. В более узком колене вогнутый мениск будет иметь большую кривизну и внутреннее давление будет меньше, чем в широком.

В таких сосудах равновесие может наступить только в том случае, если в узком колене жидкость поднимается на такую

высоту, при которой гидростатическое давление поднятого столба возместит недостаток молекулярного давления.

Если в те же стеклянные сосуды налить ртуть (рис. 84,б), то уровень ртути в узком сосуде станет ниже, чем в широком. Так же устанавливаются уровни всякой несмачивающей данное твердое тело жидкости. Избыток внутреннего давления более выпуклого мениска опускает жидкость в узкой трубке до тех пор, пока этот избыток молекулярного давления не уравнивается гидростатическим давлением столба

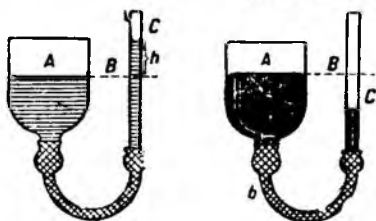


Рис. 84. Подъем смачивающей и опускание несмачивающей жидкостей в капиллярных трубках.

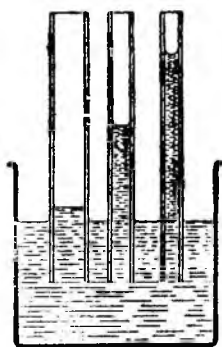


Рис. 85. Высота подъема жидкости в трубке зависит от диаметра трубки.

жидкости в более широком сосуде, поднятом над уровнем жидкости в более узком.

Если в широкий сосуд опускать трубки разного диаметра, то можно наблюдать, что высота подъема или опускания в узкой трубке сравнительно с широким сосудом тем больше, чем меньше диаметр трубки (рис. 85).

Очень узкие трубки получили название капиллярных от латинского слова капиллус — волос.

Свойство жидкостей подниматься или опускаться в капиллярных трубках сравнительно с уровнем в широких сосудах называется капиллярностью.

Если опустить в широкий сосуд с водой две стеклянные пластинки, сложенные в форме двугранного угла (рис. 86), то можно заметить, что жидкость между пластинками стоит выше, чем снаружи, и тем выше, чем ближе к ребру.

Опыты позволили установить следующие законы капиллярности:

1. Высота подъёма смачивающей жидкости и опускания несмачивающей обратно пропорциональна диаметру трубки и плотности жидкости.

2. Высота подъёма между двумя параллельными пластинками вдвое меньше, чем в трубке, диаметр которой равен расстоянию между пластинками.

В капиллярной трубке мениск можно принять за полусферу (рис. 84). Граница жидкости и трубки — окружность радиуса r (радиуса трубки).

Вдоль этой окружности действует сила $2\pi r\alpha$, где α — сила поверхностного натяжения, рассчитываемая на единицу длины. Эта сила уравнивает вес поднятого столба жидкости с высотой h и плотностью D .

Вес равен $\pi r^2 h D g$.

Из равенства этих сил можно определить α :

$$2\pi r\alpha = \pi r^2 h D g; \quad \alpha = \frac{r h D g}{2}. \quad \text{Для воды } \alpha = \frac{r h g}{2}.$$

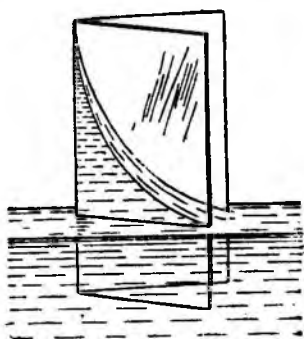


Рис. 86. Подъём смачивающей жидкости внутри двугранного угла.

Поверхностное натяжение, смачивание и капиллярность постоянно проявляются в природе и используются в технике. Очень многие пористые тела всасывают в себя жидкости. Это всасывание происходит от того, что жидкость, смачивая данное твёрдое тело, по закону капиллярности поднимается вдоль тончайших капилляров, образуемых пора́ми внутри тела, притом на тем бо́льшую высоту, чем тоньше капилляры. Так, губка, сахар, бумага (в особенности пропускная), многие ткани, песок, мел, древесный литографский камень сильно втягивают в себя жидкости. Так же происходит поднятие подпочвенной воды по капиллярам почвы. Отсюда — два вывода для обработки почвы. Если надо

задержать подход подпочвенной воды к поверхности и испарение через неё, то необходимо разрушать капилляры почвы. Для этого служит пахота. В местностях, не богатых влагой и засушливых, пахота для сохранения почвенной влаги должна быть возможно ранней и глубокой. Если же надо вызвать приток подпочвенной воды ближе к поверхности, то необходимо не только сохранить капилляры в почве, но и сделать их диаметры меньше, утончить их. С этой целью грядки на огороде и в некоторых случаях поля укатываются катком или утрамбовываются, отчего капиллярные ходы в почве становятся тоньше к поверхности.

Питание растений происходит растворением солей из почвы по сосудам. Сосуды — тончайшие капилляры; следовательно, одной из причин поднятия растворов из почвы к верхушкам растений является поднятие смачивающей жидкости по закону капиллярности.

88. Лабораторная работа 9. Определение величины поверхностного натяжения.

Приборы: 1) стеклянный прямоугольный сосуд (рис. 87); 2) капиллярная трубка; 3) штатив с зеркальным масштабом; 4) иголка; 5) микрометр; 6) испытуемая жидкость.

Основание работы: соотношение, выведенное в § 87.

План работы: надо измерить высоту подъёма жидкости в капилляре и диаметр капилляра.

Рис. 87. Прибор для измерения поверхностного натяжения.

Ход работы. 1. Налейте в сосуд воды (или другой жидкости, смачивающей стекло).

2. Вставьте в жидкость капиллярную трубку, предварительно смочив внутреннюю поверхность её в исследуемой жидкости.

3. Приставьте зеркальный масштаб к сосуду и измерьте высоту нижней части мениска в капилляре над уровнем жидкости в широком сосуде.

4. Для измерения диаметра капиллярной трубки вставьте в её нижнее отверстие иглу, заметьте место, до которого игла вошла в трубку, и микрометром измерьте её диаметр в отмеченном месте.

5. Сделайте вычисление α по формуле.

6. Повторите опыт с той же или другими трубками, найдите среднее значение α , сравните его с табличным и найдите погрешности, выраженные в процентах.

89. Кинетическая теория жидкости. Диффузия и броуновское движение инородных частиц в жидкости с несомненностью

устанавливают, что молекулы жидкости находятся в движении. Значительное сцепление между молекулами жидкости не позволяет думать, что молекулы жидкости могут проходить прямолинейные пути без значительного взаимодействия с другими молекулами, как это происходит в газах. Молекула жидкости движется, точнее сказать дрожит, в поле действия окружающих молекул, но только вследствие большой подвижности всех молекул движение каждой отдельной молекулы не отличается ни определённой пути, ни определённой периодичностью. Каждая молекула жидкости с течением времени может пробиться между окружающими молекулами и перейти в поле действия других молекул.

Итак, молекулы жидкости колеблются около некоторых переменных положений равновесия и смещаются одни относительно других. Этим последним свойством и объясняется подвижность жидкости.

Если поискать в природе подобие движению молекул жидкости, то ближе всего к нему подойдет движение пчёл в только что осевшем на ветви рое. Пчелы в рое помимо мелких колебательных движений ещё медленно переползают относительно друг друга.

Сравнительно с теорией газов кинетическая теория жидкости разработана очень мало.

Упражнение 8.

1. Почему волоски кисточки в воде расходятся, а по вынимании из воды слипаются?
2. Если выдуть мыльный пузырь, не отрывая его от трубки, и если перестать дуть в трубку, то почему уменьшаются его размеры?
3. Почему деревянный кружок, покрывающий воду в ведре, легче снять, поливая его ребром, чем плашмя?
4. Привести примеры проявления смачивания и несмачивания.
5. Как изменится форма капли на рисунке 76, если привести её в быстрое вращение вокруг оси, проходящей через её центр?
6. Два ртутных шарика с радиусом в 1 мм слились в один шар. Сравнить поверхность получившегося шара с суммой поверхностей двух исходных шариков.
7. Одинаковый ли будет подъём воды в капиллярной трубке с диаметром в 2 мм над уровнем воды в широком сосуде, если вода будет иметь температуру один раз в 10° и другой — в 30° ?
Если разный, то в каком случае подъём воды будет больше?
8. Каков радиус капилляра, если вода стоит в нём выше, чем в широком сосуде, на 2 см?
9. Каково отношение высот подъёмов в капиллярах воды и керосина при прочих равных условиях?

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСВОЕНИЯ.

1. Как расположена поверхность жидкости по отношению к внешней силе в состоянии покоя?
2. Что можно сказать про сжимаемость жидкости при действии на неё внешней силы?

3. Обладают ли жидкости упругостью?
 4. Какие основные признаки жидкого состояния (для значительных количеств вещества)?
 5. Каково движение молекул в жидкости?
 6. Что называется сферой молекулярного действия? Каков примерный размер её радиуса?
 7. Что такое поверхностное или молекулярное давление?
 8. Какую форму принимает жидкость под действием только молекулярных сил? Почему? Приведите примеры.
 9. Что такое поверхностное натяжение, какое оно имеет направление по отношению к поверхности жидкости и какими примерами можно подтвердить его существование?
 10. Зависит ли поверхностное натяжение жидкости от того вещества, которое находится над поверхностью данной жидкости или растворено в жидкости?
 11. Что такое смачивание и несмачивание твёрдого тела жидкостью?
 12. Что такое мениск, от чего он зависит и каковы его формы?
 13. Как зависит поверхностное давление от кривизны поверхности жидкости?
 14. В чём состоит явление капиллярности?
 15. В чём состоят законы капиллярности?
 16. Какие примеры капиллярности известны в природе и технике?
 17. Чем отличается друг от друга поведение смачивающей и несмачивающей жидкостей на горизонтальной пластинке, у стенок сосуда, в капиллярных трубках, по отношению к опущенной в них палочке при её вынимании из жидкости?
- Литература. Бойс, Мыльные пузыри. Перельман, Занимательная физика, кн. 1, гл. V.

4. Свойства твёрдого тела.

90. Кристаллическое состояние. Приступая к изучению свойств веществ в твёрдом состоянии, надо прежде всего уточнить, что понимать под твёрдым телом.

В точном смысле этого слова *твёрдым телом называется однородное тело, состоящее из кристаллов.*

Кристаллом называется частица вещества определённой геометрической формы, ограниченной естественными плоскими гранями.

Тело, состоящее из кристаллов, называется кристаллическим.

Признаком кристалла является не только правильность его геометрической формы с плоскими гранями. Существенным признаком служит различие свойств по различным направлениям. Кристалл одного и того же вещества по-разному в разных направлениях проводит теплоту, электричество, пропускает свет и подвергается раскалыванию при ударах.

Если взять стеклянную пластинку, покрыть её тонким слоем воска, смешанного со скипидаром, и воткнуть в этот слой перпендикулярно к нему раскалённую проволоку, то можно наблюдать, что расплавленный воск заполняет площадь круга: нагреваемое от проволоки стекло по всем направлениям прогревалось равномерно.

Если вырезать из кристалла, не принадлежащего к правильной системе, пластинку и с ней повторить такой же опыт, то растаявший воск заполнит площадь эллипса — теплопроводность по разным направлениям различна.

Кристаллы образуются при отвердевании расплавленной жидкости (например сера), при испарении жидкости из насыщенного раствора (например поваренная соль, сахар), при переходе из пара в твёрдое состояние (иод, лёд).

Существует 32 класса кристаллов различных веществ. Кристалл поваренной соли имеет форму куба. Кристаллы льда, образующие причудливые формы снежинок, представляют собой правильные шестигранные призмы (рис. 88); кристалл исландского шпата имеет форму ромбоэдра (рис. 89).

Некоторые вещества имеют свойство кристаллизоваться в нескольких кристаллических формах. Примерами могут служить сера (жёлтая, находящаяся в природе, и красная, получаемая охлаждением из расплавленной, отличаются своими кристаллами) и углерод (кристаллы алмаза и кристаллы графита различны).

Свойство тел образовывать два или несколько видоизменений одинакового химического состава, но различных кристаллических форм, называется полиморфизмом (многоформностью).

Одна из этих форм иногда оказывается неустойчивой и переходит сама собой в другую.

У одних кристаллических тел кристаллы крупны и легко различимы простым глазом, у других они настолько мелки, что могут быть рассмотрены только в микроскоп или обнаружены ещё более тонкими средствами. Размеры кристаллов тела могут с течением времени изменяться. Так, мелкие кристаллы железа и стали переходят в крупные. Этот переход ускоряется при ударах и сотрясениях. Он постоянно происходит в железнодорожных рельсах, вагонных осях, стальных мостах, отчего прочность этих сооружений с течением времени уменьшается.

91. Аморфное состояние. К твёрдым телам в неточном, в условном, смысле слова относят также тела, находящиеся в аморфном¹⁾ состоянии.

Аморфное состояние характеризуется отсутствием кристаллической формы и одинаковостью свойств по всем направлениям.

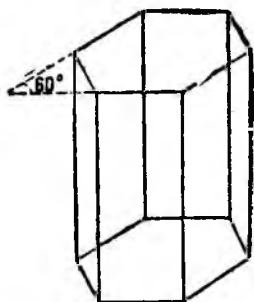


Рис. 88. Кристалл льда.

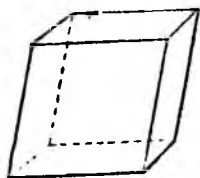


Рис. 89. Ромбоэдр — форма кристалла исландского шпата.

¹⁾ По-гречески аморфос — бесформенный.

Примеры тел в аморфном состоянии: стекло, опал, смолы, янтарь, битумы, клей, вар, воск.

Для тел в аморфном состоянии сжимаемость, теплопроводность, электропроводность, скорость света, механические свойства по всем направлениям одинаковы.

При плавлении переход аморфных тел в жидкость совершается постепенно (ср. § 101), без нарушения непрерывности возрастания температуры, причём наблюдается довольно значительный „интервал размягчения“, для стекла, например, в пределах от 500° до 1000° . При обратном процессе происходит „переохлаждение“ — сохранение жидкого состояния ниже тех границ температуры, в которых шло расплавление. При дальнейшем охлаждении вещество густеет в жидком состоянии, его вязкость, т. е. внутреннее трение между слоями, сильно увеличивается, молекулы теряют свою подвижность и остаются в неупорядоченном состоянии, отчего и получается аморфное состояние.

Аморфное состояние есть состояние переохлаждённой жидкости; оно ближе к жидкому, чем к твёрдому, кристаллическому, состоянию. В самом деле, как жидкости под действием своего веса принимают форму содержащего их сосуда, так и аморфные тела под действием своего веса меняют свою форму.

Стекло, вар, клей разбиваются на части ударами молотка, как и кристаллические тела. С другой стороны, длинная стеклянная трубка, положенная своими концами на опоры, с течением времени под действием своего веса прогибается; куски вара, набросанные в воронку, расплываются по воронке и выходят в виде стержня из отверстия воронки. Если на дно сосуда положить кусок пробки, на него набросать вар, а на вар положить свинец, то через некоторое время куски вара соберутся в сплошное тело с горизонтальной поверхностью, свинец через него опустится на дно, а пробка всплывёт на поверхность. Такие изменения формы происходят быстрее при повышении температуры.

Так как в аморфном состоянии молекулы не успели занять упорядоченное расположение, свойственное кристаллическому состоянию, и удельная теплота плавления при этом не выделилась, то запас энергии у аморфного вещества больше, чем у кристаллического. Но энергия тела без внешнего воздействия изменяется только в сторону уменьшения. Поэтому *аморфное состояние неустойчиво и переходит при благоприятных условиях в кристаллическое.*

По прошествии более или менее длительного времени в аморфном стекле образуются кристаллы — стекло мутнеет; аморфный стекловидный леденец покрывается кристаллами сахара и т. д.

92. Пространственная решётка кристалла. Правильность внешней формы кристалла ещё в середине XIX в. дала повод высказать предположение, что молекулы или атомы вещества, образующие кристалл, располагаются в нём правильными рядами на

равных расстояниях. Начатые с 1912 г. исследования кристаллов разными учёными, в том числе и московским физиком Ю. В. Вульфом, при помощи рентгеновых лучей¹⁾ позволили решить вопрос о строении кристаллов.

Рассмотрим строение кристалла каменной соли (рис. 90). Она представляет собой химическое соединение хлора и натрия — NaCl .

Кристалл каменной соли состоит из отдельных атомов хлора и натрия, причём их атомы не нейтральны, а несут равные и противоположные заряды. Атом, обладающий электрическим зарядом, называется ионом (см. ч. III). Таким образом, кристалл хлористого натрия, как и многих других солей, состоит из ионов; ион натрия имеет положительный электрический заряд, ион хлора — отрицательный заряд, равный по величине положительному. Ионы хлора и натрия по каждому из трёх направлений расположены, чередуясь на равных расстояниях. Как ион натрия (белый кружок рисунка), так и ион хлора (чёрный кружок рисунка) помещаются посередине между шестью другими ионами.

Силы, которые взаимодействуют между ионами и которые придают прочность кристаллу, являются силами взаимодействия электрически заряженных тел (см. ч. III, гл. I).

Пересечения рядов, по которым расположены ионы в одних кристаллах, молекулы или атомы — в других, образуют в пространстве так называемую пространственную решётку. Пересечение каждых двух рядов даёт узел решётки — местопребывание иона, атома или молекулы.

В момент кристаллизации силы сцепления теснее располагают молекулы в одних направлениях, разреженнее — в других. Молекулы или их части — ионы — располагаются преимущественно на параллельных плоскостях; различные группы параллельных плоскостей могут пересекаться в пространстве под различными углами, отчего и получаются различные формы кристаллов.

Различие форм кристаллов влияет на различие физических свойств кристаллических веществ. Так, кристалл угля имеет пространственную решётку вида, изображённого на рисунке 90 а, а другая

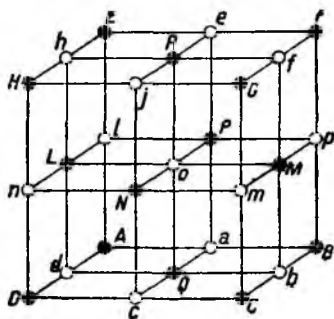


Рис. 90. Кристаллическая решётка поваренной соли: ○ — ионы натрия, ● — ионы хлора.

¹⁾ Так как до изучения рентгеновых лучей (ч. III) нельзя объяснить метод этого исследования, то здесь придётся ограничиться только сообщением результатов исследования.

разновидность углерода — графит — состоит из кристаллов с пространственной решёткой вида, изображенного на рисунке 90б.

Как известно, графит отличается меньшей твёрдостью, чем уголь.

93. Деформации. При всяком взаимодействии тел происходит изменение формы или объёма, или и формы, и объёма одновременно у обоих взаимодействующих тел.

Изменение формы или объёма тела называется деформацией¹⁾.

Так как наше внимание сосредоточивается на деформации одного тела, то можно оставлять без рассмотрения второе тело и вместо деформирующего тела говорить о деформирующей силе²⁾.

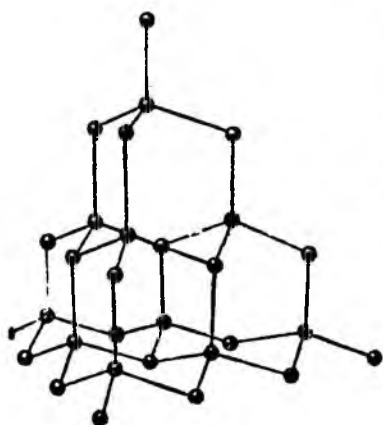


Рис. 90а.

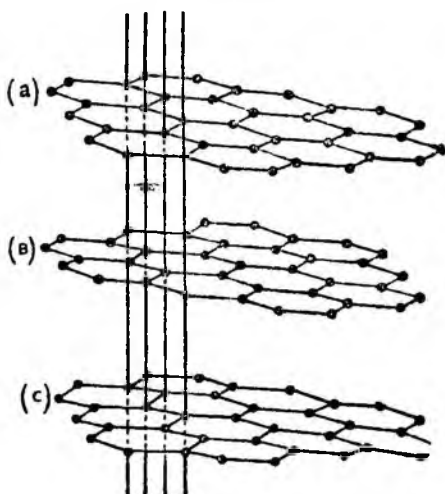


Рис. 90б.

При изучении деформации под твёрдым телом будет подразумеваться твёрдое тело в обычном смысле слова, а не только кристаллическое тело.

Представим себе твёрдое тело в виде стержня. В зависимости от направления деформирующих сил по отношению к стержню могут получиться следующие виды деформаций.

1. Силы действуют по направлению продольной оси тела в прямо противоположные стороны наружу (рис. 91, а).

Деформация называется растяжением.

При растяжении тело удлиняется в продольном направлении и укорачивается в поперечном направлении; объём тела увеличивается. Характеристика растяжения:

¹⁾ Деформацио на латинском языке значит изменение формы.

²⁾ На основании определения силы, данного в механике.

а) Если начальная длина l , длина после растяжения l_1 , то $\Delta l = l_1 - l$ называется абсолютным удлинением; отношение абсолютного удлинения к начальной длине $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$ называется относительным удлинением.

б) Если начальный диаметр стержня D , диаметр после растяжения D_1 , то $\Delta D = D_1 - D$ называется абсолютным поперечным сжатием; отношение абсолютного поперечного сжатия к начальному диаметру $\epsilon_q = \frac{\Delta D}{D}$ называется относительным поперечным сжатием.

При растяжении ϵ — число положительное, ϵ_q — число отрицательное.

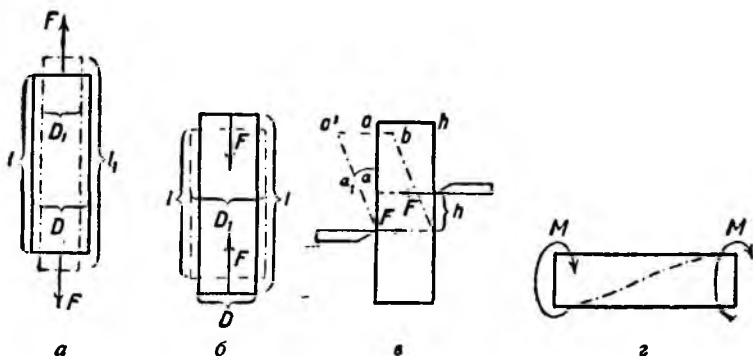


Рис. 91. Схема основных видов деформации.

2. Силы действуют по направлению продольной оси тела в прямо противоположные стороны внутрь тела (рис. 91, б). Деформация называется сжатием.

При сжатии происходит уменьшение длины и увеличение поперечного размера; объем тела уменьшается. Характеристики подобны предыдущим, только в случае сжатия ϵ — число отрицательное и ϵ_q — положительное.

Пуассон нашёл, что для каждого вещества в некоторых границах деформации отношение $\frac{\epsilon}{\epsilon_q}$ есть число постоянное.

3. Силы действуют перпендикулярно к продольной оси стержня параллельно друг другу на близком расстоянии и направлены внутрь тела (рис. 91, в).

Деформация называется сдвигом.

При сдвиге одни слои смещаются относительно других; если нарушается цельность тела, то получается срез. При сдвиге происходит изменение углов (прямые углы превращаются в косые). Объем тела не изменяется.

4. Силы дают относительно продольной оси стержня два равных, но противоположно направленных момента (рис. 91, 2).

Деформация называется **кручением**.

Вращающие моменты закручивают два соседних сечения стержня вокруг общей оси; они превращают продольные волокна, первоначально параллельные продольной оси стержня, в винтовые линии, наклонённые к поперечным сечениям (рис. 92).

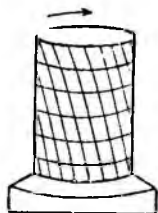


Рис. 92. В цилиндре, подвергнутом кручению, образующие изгибаются по винтовым линиям.

Кручение испытывают валы машин, на которые насажены маховые колёса и шкивы.

5. Деформации **изгиба** подвергается стержень (балка), положенный концами на подставки и нагруженный посередине, или стержень (балка), закреплённый одним концом и нагруженный на другом.

Характеризуется изгиб стрелкой прогиба S (рис. 93).

Для определения сопротивления бруса изгибу надо знать не только, каково его поперечное сечение, но и то, как распределён в нём материал. Если доску положить плашмя, её на груз сильнее согнёт её, чем если поставить её на ребро, хотя в обоих случаях количество материала одинаково.

При изгибе на выпуклой стороне вещество подвергается растяжению, на вогнутой — сжатию. Внутри изгибаемого тела должен находиться слой, не испытывающий ни растяжения, ни сжатия и называемый **нейтральным**. В этом слое и около него при деформации возникают лишь ничтожно малые упругие силы.

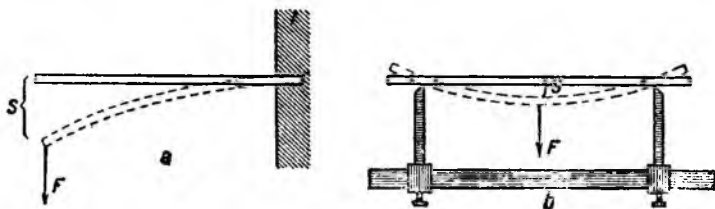


Рис. 93. Деформация изгиба.

Таким образом, вещество бруса испытывает тем большее напряжение, чем дальше вещество находится от нейтрального слоя (рис. 94). Поэтому при том же количестве материала трубка представляет большее сопротивление изгибу, чем сплошной стержень (внутренняя часть стержня не испытывает напряжений, находящийся во внутренней части материал не несёт нагрузки и является лишним). Кости нашего скелета, представляющие трубки, поддерживают нас

лучше, чем если бы они были сплошными стержнями, образованными из того же количества вещества.

Стебли злаков — трубчатые; вследствие этого они оказывают внешним силам, например силе ветра, большее сопротивление, чем в том случае, если бы весь материал стебля был сосредоточен в сплошном стержне.

Двутавровая балка (рис. 95) удовлетворяет также тому условию, что главная масса материала находится снаружи, по возможности дальше от средней линии; обе полки (или тавры), собственно и несущие всю работу, соединены тонкой, но достаточно прочной стенкой, мешающей полкам при изгибе сдвинуться по направлению друг к другу.

94. Зависимость величины деформации от деформирующей силы. Каждая деформация зависит от свойств материала, от величины нагрузки (деформирующей силы) и от способа нагрузки (постоянная, переменная, ударная).

Чтобы выяснить зависимость деформации от величины нагрузки, выберем один какой-либо вид деформации. Остановимся на растяжении. Нагрузку будем характеризовать особой величиной, называемой *напряжением*. *Напряжение есть величина, измеряемая силой, действующей на единицу площади.*

Если силу обозначить буквой F , площадь — буквой S и напряжение — буквой p , то:

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



Рис. 95. Сечение двутавровой балки.

В системе CGS единица напряжения имеет наименование: $\frac{\text{дина}}{\text{см}^2}$;

в технике применяется единица $\frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$.

Увеличивая напряжение, будем получать различные удлинения; каждому значению величины напряжения будет соответствовать определенное удлинение (Δl). Результаты исследования можно изобразить графиком, если на оси абсцисс откладывать относительное удлинение ($\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$) на оси ординат — напряжение p .

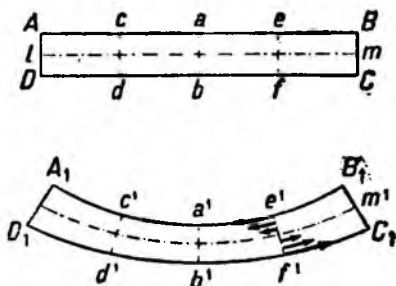


Рис. 94. Деформация изгиба: пунктирная линия — нейтральный слой; стрелки у сечения $e'f'$ — внешние силы, действующие в этом сечении.

Для литой стали график изображается рисунком 96. График позволяет различить следующие стадии, через которые проходит испытуемое вещество (металл) при увеличении нагрузки.

1. Изменение от 0 до точки P . График представляет прямую линию. Прямая линия — признак пропорциональности. Следовательно, в этих пределах *относительное удлинение пропорционально напряжению*.

Деформации, для которых имеет место пропорциональность между величиной, измеряющей деформацию, и напряжением, вызывающим эту деформацию, называются упругими. При упругих деформациях после устранения нагрузки целиком восстанавливается первоначальная форма или объём.

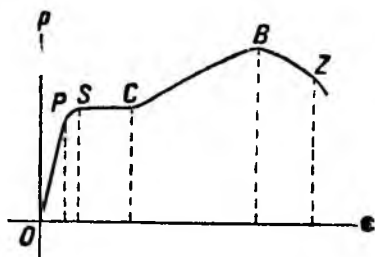


Рис. 96. График зависимости относительного удлинения ϵ от нагрузки P для литой стали.

Упругими силами и называются те междумолекулярные силы, которые возникают в теле при деформации и которые восстанавливают первоначальную форму или объём.

2. При дальнейшем увеличении напряжения (участок кривой PS) удлинение растёт сильнее прироста напряжения; пропорциональность нарушена. Опыт показывает, что в этом

случае по прекращении нагрузки деформация не устраняется целиком. Такая деформация называется неупругой (остаточная деформация.)

То наибольшее напряжение, при котором деформация ещё остаётся упругой, называется пределом упругости. На графике оно изображается ординатой точки P .

3. Участок SC графика почти параллелен оси абсцисс. Это значит, что удлинение продолжается, несмотря на то, что напряжение не увеличивается. Свойство материала — при наличии некоторого постоянного напряжения продолжать удлиняться — называется текучестью. Про материал говорят, что он „течёт“, т. е. быстро удлиняется при постоянной (от S до C) или слабо возрастающей нагрузке (от C до B), или даже уменьшающейся нагрузке (от B до Z).

4. При сильном удлинении материала происходит сильное его сужение, и, наконец, в каком-либо месте наступает разрыв. Напряжение, при котором наступает разрыв, называется разрывным, или разрушающим, напряжением.

Знание разрывного напряжения имеет большое значение при выборе материала для сооружений. Поэтому для каждого материала производится тщательное исследование его свойств в лабораториях.

95. Вязкость, хрупкость, пластичность. Если производить подобные же исследования с различными материалами, например с кожей, бетоном, мрамором, и строить такие же графики, как и для стали, то оказывается, что форма графика и размеры отдельных частей его будут очень отличны. Поэтому твёрдые тела по их отношению к возрастающей нагрузке разделяются на следующие виды.

1. Вязкие вещества. Вещество называется вязким, если оно перед разрывом обнаруживает текучесть. У таких веществ резко выражена область, в которой существует пропорциональность между деформацией и напряжением. Следовательно, у них имеется обширная область упругих деформаций. Поэтому такие вещества носят название упругих. К этому виду относятся многие металлы, среди них на первом месте сталь.

2. Хрупкие вещества. Вещество называется хрупким, если оно не обнаруживает текучести перед разрывом. У хрупких веществ пропорциональность между деформациями и напряжениями обнаруживается в очень ограниченных пределах; значит, они мало упруги. Надо иметь в виду, что хрупкость не исключает совершенно упругости: и хрупкие вещества могут испытывать упругие деформации в пределах очень небольших нагрузок.

К хрупким веществам относятся, например, чугун, бетон, стекло.

3. Пластичные вещества. Вещество называется пластичным, если оно сохраняет изменённую форму. У пластичных веществ уже при малых нагрузках получают заметные остаточные деформации; упругие деформации почти совсем не имеют места. Примером пластичного вещества служит сырая глина, воск, раскалённое железо. При достаточных нагрузках и более упругим телам можно придавать желательную форму в раскалённом или холодном состоянии. Так, горячей прокаткой между вальцами определённой формы получают различные фасонные сорта железа (угольные, тавровые и т. п.), рельсы из стали; холодной штамповкой получают отливки монет, медалей из различных сплавов.

Приведённая классификация не является абсолютно точной. И хрупкие вещества, как мрамор и стекло, могут быть переведены в пластическое состояние, если подвергать их сильным давлениям. Это изменение свойств вещества под громадными давлениями может объяснить образование различных форм горных пород.

96. Допускаемое напряжение. Та величина напряжения в наиболее опасном месте тела, при наличии которой тело может считаться достаточно крепким и долговечным, называется допускаемым напряжением. В целях безопасности строительная техника применяет при сооружениях только допускаемые напряжения.

Таблица, помещённая ниже, даёт разрушающие и допускаемые напряжения при растяжении и сжатии материалов (заимствована из книги проф. Худякова „Соппротивление материалов 1930).

Таблица разрушающих и допускаемых напряжений при растяжении и сжатии

Название материала	Напряжение при растяжении в кг/мм ²		Напряжение при сжатии в кг/мм ²	
	разрушающее	допускаемое	разрушающее	допускаемое
Железо в прокатке	33—40	6—7,5	—	—
Литое железо	34—44	—	35—55	12—6
Литая сталь прокатная . .	45—100	9—10	70—150	15—8
Пружинная сталь закалённая	80 и более	—	—	— ¹
Чугун	12—18	2—2,5	70—85	9—6
Красная медь кованая . . .	20—22	7—9	40—70	9—6
„ „ в проволоке	40—70	—	—	—
Латунь	15	—	7,5	0,75
Алюминий литой	10,5	—	—	—
Свинец	1,3	—	0,5—1,25	—
Кожаный ремень	2,8—3,5	0,2—0,28	—	—
Пеньковый канат	3,5—6	1	—	—
Кирпич	—	—	1—3	0,07—0,1
Бетон	—	—	0,8—2,5	0,05

Отношение разрушающего напряжения к допускаемому называется запасом прочности, или степенью надёжности.

97. Закон Гука. Из предыдущего изложения видно, что деформация вещества при увеличении нагрузки оказывается разнообразной и сложной по своей закономерности.

Проще всего закономерность в той области деформации, которая называется упругой деформацией. Закон для упругой деформации найден английским физиком Гуком (1635—1702) ещё в 1676 г.: *относительная деформация пропорциональна напряжению*.

Закон этот имеет место для всех видов деформаций, но только для малых деформаций в той части их, для которой график изображается наклонной прямой линией (участок *ОР* на рисунке 96).

Для растяжения или сжатия закон Гука получает следующий математический вид, если коэффициент пропорциональности обозначить через $\frac{1}{E}$, относительное удлинение ϵ , напряжение p :

$$\epsilon = \frac{p}{E}. \quad (\text{XIIIa})$$

Величина E называется модулем (мерой) упругости, или модулем Юнга.

Если заменить ϵ и p через их значения, то можно написать формулу закона Гука в развёрнутом виде:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{F}{ES}, \text{ или } \boxed{\Delta l = \frac{Fl}{ES}} \quad (\text{XIIIб})$$

В таком виде закон гласит, что *абсолютное удлинение пропорционально деформирующей силе, длине тела и обратно пропорционально площади его поперечного сечения.*

Какой физический смысл имеет модуль упругости?

О нём мы составим представление, если положим $\Delta l = l$ и $S = 1$; тогда $\frac{\Delta l}{l} = 1$ и $E = F$.

Следовательно, *модуль упругости численно равен напряжению, при котором абсолютное удлинение стало бы равным начальной длине* (при условии, конечно, что закон Гука справедлив для любых по величине деформаций).

Модуль упругости выражается в тех единицах, которые установлены для напряжения.

Надо заметить, что непосредственно измерить E при удвоении длины растягиваемого вещества невозможно, потому что вообще стержень разрывается раньше удвоения длины.

Определяется E из любых удлинений по формуле: $E = \frac{Fl}{\Delta l \cdot S}$.

При данном E можно вычислить любую величину из входящих в формулу XIIIб.

98. Лабораторная работа 10. Исследование зависимости между величиной деформации и деформирующей силой.

Приборы: 1) линейка с миллиметровыми делениями; 2) спиральная пружина с горизонтальным указателем и крючком в нижней части; 3) набор равных грузов; 4) штатив.

Цель работы: изменяя величину деформирующей силы и измеряя получаемые удлинения, найти соотношения между той и другой величиной.

Ход работы: 1. Укрепите в штативе вертикально линейку и на гвоздь в верхней части её повесьте пружину.

2. Заметьте деление масштаба, на которое указывает горизонтальный указатель, и запишите его в строку таблицы, соответствующую нагрузке 0.

№ опыта	Величина нагрузки F	Показания указателя при нагрузке	Показания указателя при разгрузке	Среднее из двух показаний указателя	Удлинение пружины Δl	Отношение удлинения к нагрузке $\frac{\Delta l}{F}$
1	0	—	—	—	—	—

3. Подвесьте к нижнему крючку пружины один из равных грузов и заметьте показание указателя.

4. Прибавляйте постепенно нагрузку по одному новому равному грузу, записывая в таблицу всю нагрузку и соответствующее показание указателя.

5. Подвесив 6—12 нагрузок (в зависимости от свойств пружины), снимайте по одному равные грузы и записывайте каждый раз в соответствующий столбик таблицы то деление масштаба, против которого останавливается горизонтальный указатель.

6. Для каждого числа грузов вычислите среднее из показаний указателя, полученных при нагрузке и разгрузке.

7. Вычитая из каждого последующего числа 5-го столбца предыдущее, вычислите удлинение пружины, соответствующее данной нагрузке.

8. Вычислите для каждой строки отношение полученного удлинения к действующей силе, выразите словами это соотношение и сравните его с формулировкой закона Гука.

99. Превращение энергии при деформациях. Так как при всякой деформации возникают силы упругости, препятствующие деформации, то для преодоления их сопротивления надо затратить на деформацию работу. Эта работа превращается в потенциальную энергию деформированного тела: всякая сжатая или растянутая пружина, закрученная стальная лента, сжатые газ или жидкость способны сами совершать работу при восстановлении их прежнего состояния силами упругости.

Если над телом совершена упругая деформация, то вся затраченная работа превращается в потенциальную энергию, которая и проявляется при устранении деформирующей силы. При пластической деформации получается остаточная деформация тела, и при устранении деформирующей силы только часть затраченной на деформацию энергии возвращается обратно упругим телом. Остальная энергия тратится на нагревание тела при остаточной деформации. Действительно, свинец, ковкое железо и другие мягкие тела нагреваются при деформации.

100. Кинетическая теория твёрдого тела. Диффузия, хотя и очень медленная, в твёрдых телах и заметное испарение некоторых из них указывают, что атомы, или ионы, расположенные в узлах их пространственной решётки, находятся в движении. Но так как кристаллическое тело имеет постоянную форму, то движение атомов может быть только колебательным¹⁾.

В кристаллическом теле почти все атомы²⁾ имеют определённые положения равновесия и не смещаются целыми группами одна

¹⁾ Не исключается возможность, что в отдельных случаях некоторые атомы выходят из-под воздействия соседних атомов и движутся поступательно; так происходит испарение твёрдых тел.

²⁾ Или ионы.

относительно других (отличие от жидкости). Атомы кристаллического тела только колеблются около положений равновесия, а не движутся поступательно (отличие от газов).

Средняя энергия этих колебаний при постоянной температуре определённа и увеличивается с повышением температуры.

Если попытаться отыскать подобие для состояния атомов в твёрдом теле, как это было сделано для газа и жидкости, то наибольшее сходство представляет движение дикого зверя, который мечется из угла в угол по своей клетке; размеры его колебаний ограничены размерами клетки.

Упражнение 9.

1. Проволока из электролитической меди длиной в 1,5 м и сечением в 3 мм² удлинилась под действием силы в 20 кГ на 0,9 мм. Найти модуль Юнга.

Отв. $11\,100 \frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$.

2. Под действием силы в 10 кГ проволока длиной в 2 м и сечением в 4 мм² удлинилась на 0,25 мм.

На сколько удлинится сделанная из того же материала проволока длиной в 5 м и сечением в 3 мм² под действием силы в 8 кГ?

Отв. 0,67 мм.

3. Какая требуется сила для разрыва круглого стержня из дюралюминия диаметром в 0,8 см, если предел прочности на разрыв $40 \frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$?

Отв. $\approx 2\,000 \text{ кГ}$.

4. Чугунная колонна высотой в 2,4 м имеет поперечное сечение в 150 см². Найти величину сжатия колонны от груза в 10 000 кГ, если модуль Юнга $8000 \frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$.

Отв. $\approx 0,2 \text{ мм}$.

5. Какое удлинение получит железная проволока длиной в 1,8 м и диаметром в 0,5 мм от груза в 1,5 кГ? Модуль Юнга $20\,000 \frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$.

Отв. $\approx 0,7 \text{ мм}$.

6. Будет ли перейдён предел упругости в $40 \frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$, если к проволоке предыдущей задачи привесить груз в 4 кГ?

7. Выдержит ли проволока задачи 5-й груз в 10 кГ при прочности на разрыв в $60 \frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$?

8. Предел упругости отпущенной стали $58,3 \frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$, а модуль Юнга $20\,000 \frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$. Будет ли деформация упругой или остаточной, если проволока длиной в 2 м и сечением в 0,8 мм² будет удлинена на 6 мм?

9. Рассчитать наибольшую допустимую высоту кирпичной трубы, если прочность на сжатие $100 \frac{\text{кГ}}{\text{см}^2}$, запас прочности равен 10, а удельный вес кирпича $1,6 \frac{\text{Г}}{\text{см}^3}$.

Отв. 62,5 м.

10. Какая нужна сила, чтобы железный стержень длиной в 1,6 м и сечением в $0,8 \text{ мм}^2$ удлинить без изменения температуры на столько же, на сколько он может удлиниться при нагревании от 0° до 40° ?

Отв. $\approx 8 \text{ кг}$.

11. При какой наименьшей длине может оборваться от собственного веса мелкая проволока, если её прочность на разрыв $4200 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$ (уд. вес меди $8,9 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$)?

Отв. 4720 м.

12. Какое сечение надо придать дубовому стержню длиной в 1 м, чтобы он при нагрузке в 4 кг удлинился на 1 мм? Модуль Юнга $1000 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$.

Отв. 4 мм².

13. В целях уменьшения утомляемости и повышения качества пристрелки пристрельщикам разрешается надевание телогреек или применение подкладок под затылок приклада (подушек) для предохранения плеча. Подкладки должны быть изготовлены из мягкого материала и иметь форму выемки плеча.

Объяснить: а) от чего и почему надо предохранять плечо? б) Зачем надо делать подкладку из мягкого материала и в форме выемки плеча?

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСВОЕНИЯ.

1. Какие тела называются твёрдыми в точном значении этого слова?
 2. Что называется кристаллом?
 3. Какое состояние называется аморфным?
 4. Чем отличаются физические свойства кристаллов от свойств некристаллических тел?
 5. Чем объясняется правильность кристаллической формы?
 6. Что называется пространственной решёткой кристалла?
 7. Какие частицы вещества располагаются в точках пересечения плоскостей пространственной решётки?
 8. Что называется упругостью вещества?
 9. Какими видами упругости обладают твёрдое, жидкое и газообразное состояния вещества?
 10. Что называется упругой и неупругой деформациями?
 11. В чём состоит закон Гука для упругих деформаций?
 12. Что называется пределом упругости?
 13. Что называется напряжением материала, разрушающим напряжением, допускаемым напряжением?
 14. Какие отличия между вязким, хрупким, пластичным веществами?
 15. Что называется модулем упругости и каков его физический смысл?
 16. В каких единицах измеряется модуль упругости?
 17. Какие превращения энергии могут происходить при деформациях?
- Литература. Перельман, Занимательная физика, ч. I, статьи из гл. V. Вульф, Симметрия и её проявления в природе. Ходаков, Архитектура кристаллов.

IV. ИЗМЕНЕНИЕ АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА.

1. Плавление и отвердевание.

101. Температура плавления и отвердевания. Явления плавления и отвердевания в их основных чертах были изложены в курсе неполной средней школы. Вспомним основные факты и положения.

Плавлением называется переход тела из твёрдого состояния в жидкое при сообщении телу теплоты.

Отвердеванием называется переход из жидкого состояния в твёрдое при отдаче телом теплоты.

Для каждого кристаллического вещества существует при определённом внешнем давлении определённая температура плавления, она же является и температурой отвердевания.

Температура плавления при нормальном давлении называется точкой плавления.

Аморфные тела — стекло, вар, воск, парафин — при нагревании постепенно размягчаются, становясь менее вязкими, и *не имеют определённой температуры плавления*. Так же происходит и процесс их отвердевания.

Плавление и отвердевание чистых кристаллических веществ при нормальном давлении происходит при определённых температурах, характерных для каждого вещества.

Если в пробирку насыпать нафталин или другое какое-либо кристаллическое вещество, поместить в него термометр, медленно подогреть пробирку и записывать через равные промежутки времени температуру, то все наблюдения показывают, что, как только началось плавление, температура плавящегося тела остаётся неизменной, несмотря на приток теплоты. Большой или меньший приток теплоты может ускорить или замедлить ход плавления, но не изменить температуры плавления. Когда расплывётся всё твёрдое тело, дальнейший приток теплоты будет поднимать температуру образовавшейся жидкости.

Если изобразить графически зависимость температуры вещества от времени, в течение которого ему сообщается теплота, откладывая на осях координат время и температуру, то кривая будет иметь вид, изображённый на рисунке 97, причём горизонтальный отрезок указывает на постоянство температуры во время плавления.

Обратный ход: охлаждение жидкости, отвердевание, охлаждение твёрдого тела — изображён на рисунке 98.

Из всех опытов подобного рода и соответствующего им графика может быть выведено положение:

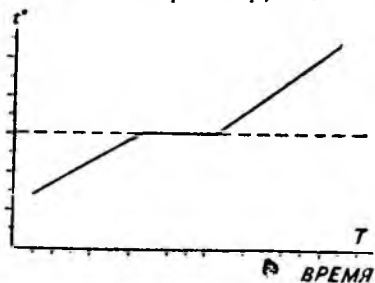


Рис. 97.

Во всё время плавления или отвердевания кристаллического вещества температура остаётся постоянной.

102. Теплота плавления. Повышение температуры твёрдого тела при нагревании указывает на увеличение энергии колебательного движения молекул твёрдого тела.

Дальнейший приток теплоты извне, когда температура достигает точки плавления, затрачивается на изменение связей между молекулами¹⁾ вещества, на работу против сил сцепления. Затрата

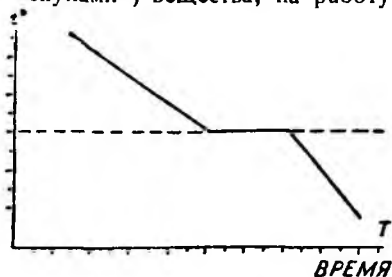


Рис. 98.

теплоты на работу изменения связей не повышает энергии движения молекул и, следовательно, не может быть обнаружена термометром; она целиком идёт на изменение состояния. Поэтому старинным названием этой части теплоты было *скрытая теплота*.

Различные вещества отличаются друг от друга тем количеством теплоты, которое тре-

буется для плавления каждого из них в одинаковых условиях. Поэтому для характеристики этого свойства веществ вводится особая величина, называемая *удельной теплотой плавления*.

Удельная теплота плавления есть величина, измеряемая тем количеством теплоты, которое требуется для плавления 1 г твёрдого тела при температуре плавления.

При отвердевании 1 г жидкости выделяется при температуре отвердевания количество теплоты, равное удельной теплоте плавления.

Единицами удельной теплоты плавления служат: $\frac{\text{кал}}{\text{г}}$ и $\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$.

Если обозначить удельную теплоту плавления через λ , массу расплавляемого тела через m и количество потребной для плавления теплоты через Q , то:

$$Q = \lambda m. \quad (\text{XIV})$$

В настоящее время нет ни одного химического элемента, твёрдого при обычных условиях, который не мог бы быть обращён в жидкость. Даже углерод, переходящий при нормальном давлении с повышением температуры из твёрдого состояния сразу в парообразное, был в 1915 г. получен в жидком состоянии при давлении в 22 атмосферы и при температуре около 8000°.

¹⁾ Или между ионами.

103. Уравнение теплового баланса при плавлении или отвердевании. Посмотрим, какой вид получат формулы для расчёта количества теплоты при изменении состояния.

Пусть масса m жидкого вещества с удельной теплоёмкостью $c_{ж}$ и при температуре t влита в массу m_2 воды при температуре t_1 , находящейся в калориметре; масса калориметра m_1 и удельная теплоёмкость его c_1 . Какова теплота плавления (отвердевания) вещества, если его температура плавления t_0 и удельная теплоёмкость в твёрдом состоянии c_m ? Окончательная температура смеси θ .

Теплота, отданная жидким веществом при остывании от температуры t до температуры отвердевания t_0 :

$$Q = c_{ж} m (t - t_0).$$

Теплота, полученная калориметром при нагревании от начальной температуры t_1 до окончательной θ ,

$$Q_3 = c_1 m_1 (\theta - t_1)$$

Теплота, отданная веществом при отвердевании без изменения температуры (теплота плавления):

$$Q_1 = \lambda m.$$

Теплота, отданная твёрдым веществом при остывании от температуры отвердевания t_0 до температуры смеси θ :

$$Q_2 = c_m m (t_0 - \theta).$$

Теплота, полученная водой при нагревании от начальной температуры t_1 до окончательной θ :

$$Q_4 = c_2 m_2 (\theta - t_1).$$

$$Q + Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4.$$

$$c_{ж} m (t - t_0) + \lambda m + c_m m (t_0 - \theta) = (c_1 m_1 + c_2 m_2) (\theta - t_1).$$

Отсюда определяем теплоту плавления:

$$\lambda = \frac{(c_1 m_1 + c_2 m_2) (\theta - t_1) - c_{ж} m (t - t_0) - c_m m (t_0 - \theta)}{m}.$$

104. Изменение объёма тела при плавлении и отвердевании. Громадное большинство тел (за самым малым исключением, как лёд, чугун и некоторые другие) при плавлении расширяется, при отвердевании сжимается.

Расплавив в химическом стакане немного парафина и дав ему затвердеть, мы увидим, что поверхность затвердевшего парафина вместо плоской сделается вогнутой. Вогнутость поверхности затвердевшего парафина объясняется тем, что объём парафина уменьшился. Вогнутая поверхность наблюдается также на стальных и свинцовых болванках, что объясняется, как и у парафина, уменьшением их объёма при отвердевании.

Лёд, чугун, наоборот, при плавлении сжимаются; вода, жидкий чугун при отвердевании расширяются.

Свойством чугуна увеличивать свой объём при отвердевании объясняется то, что чугун хорошо заполняет все детали форм, в которые его выливают, и поэтому он имеет большое применение для приготовления литых изделий. Увеличивается объём при отвердевании и у висмута, входящего в состав типографского металла.

Если наполнить стеклянную бутылку водой, плотно закупорить её и выставить на мороз, то бутылка при замерзании воды лопается; следовательно, вода при замерзании увеличивает свой объём, а не уменьшает. Увеличение объёма воды при её замерзании происходит с такой большой силой, что даже толстостенные чугунные бомбы, наполненные водой и плотно закупоренные, лопаются при замерзании в них воды. В большие морозы в домах с центральным паровым или водяным отоплением и водопроводом бывают случаи порчи труб как водопроводной, так и отопительной систем вследствие замерзания воды в трубах.

Способность воды расширяться при отвердевании должна учитываться при прокладке труб водопровода и канализации: во избежание разрыва труб при замерзании подземные трубы должны укладываться на такой глубине, где температура не спускается ниже нуля. Наружные части труб должны на зимнее время покрываться теплоизолирующими материалами.

Расширение воды при замерзании оказывает громадное влияние на лик Земли. Влага, проникающая в мельчайшие трещины горных пород на вершинах гор, замерзает в них, увеличивая своим расширением трещины, пока не произойдут разрушения скал, обвалы и осыпи: так изо дня в день идёт снижение гор и заполнение долин продуктами разрушения.

105. Влияние давления на точку плавления. Изучение плавления одного и того же вещества под разными давлениями показало, что в этом отношении вещества делятся на те же две группы. Для тех веществ, объём которых при плавлении увеличивается, при усилении давления температура плавления повышается, при ослаблении давления — понижается.

Давление в этом случае препятствует увеличению объёма при плавлении, поэтому требуется более сильное раскачивание молекул, т. е. более высокая температура, чтобы увеличение объёма вопреки увеличенному давлению все-таки наступило.

Для тех веществ, объём которых при плавлении уменьшается, при усилении давления температура плавления понижается, при ослаблении давления — повышается.

В этом случае давление способствует уменьшению объёма, происходящему при плавлении, поэтому плавление наступает раньше, т. е. при более низкой температуре, чем при нормальном давлении.

Для льда температура плавления понижается на $0,0075^\circ$ на каждую лишнюю атмосферу давления.

Что лёд при увеличении давления плавится при температуре ниже нуля, доказывается при помощи следующего опыта. Берётся прочный полый цилиндр, в который может ввинчиваться плотно входящий в него поршень. Цилиндр заполняется льдом. На поверхность льда, под поршень, помещают какое-либо тело, например монету. Затем лёд подвергают сильному давлению, производя его сильным ввинчиванием поршня. Вывинтив через некоторое время поршень, обнаруживают монету на дне цилиндра. Следовательно, при сильном давлении, которое производилось на лёд, лёд превратился в воду, и монета, оказавшись в воде, погрузилась на дно цилиндра. Другой подобный опыт изображён на рис. 99.

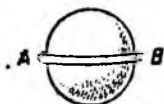
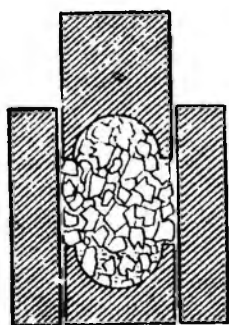


Рис. 99. Под сильным давлением куски льда сплавляются и образуют сплошную массу.

Хорошо известно, что в лёгкий мороз легче кататься на коньках, чем в сильный. Объясняется это понижением температуры таяния льда при повышенном давлении. Вследствие очень малой площади лезвия конька катающийся производит на лёд, непосредственно находящийся под коньками, очень большое давление. При не очень сильном морозе этого давления достаточно, чтобы лёд под коньками превратился в воду (температура затвердевания воды стала ниже температуры воздуха). Талая вода смачивает лёд, уменьшает трение конька и облегчает передвижение по льду. Эта вода тотчас же снова замерзает, как только выходит из-под коньков. При силь-

ном же морозе температура льда всё ещё остаётся ниже температуры плавления, изменённой от давления, и таяния не происходит.

Таблица температур плавления при нормальном давлении дана в конце книги.

106. Лабораторная работа 11. Определение удельной теплоты плавления льда.

Приборы: 1) калориметр; 2) весы с разновесом; 3) термометр; 4) мелко раздроблённый лёд; 5) вода.

Ход работы. 1. Взвесьте калориметр.

2. Массу калориметра и другие данные запишите в таблицу:

№ опыта	Масса калориметра m	Масса воды M	Масса льда m_1	Температура воды t	Температура смеси θ	Удельная теплота плавления льда

3. Определите массу воды и налейте её в калориметр.

Примечание. Воды в калориметр нужно брать столько, чтобы столбик ртути в термометре было удобно наблюдать.

4. Измерьте и запишите температуру воды в калориметре перед самым погружением льда.

5. Возьмите мелкие куски льда, обсушите их фильтровальной бумагой и бросьте в воду калориметра.

6. Помешивая мешалкой воду со льдом, следите, когда растают последние кусочки льда. Запишите температуру, наблюдаемую вами в конце таяния льда.

7. Взвесив теперь воду в калориметре, определите путём вычитания массу льда.

8. Взяв удельную теплоёмкость металла калориметра из таблиц, определите количество теплоты, отданное калориметром и водой во время таяния льда.

9. Сколько теплоты пошло на нагревание воды, образовавшейся из льда, от нуля до конечной температуры?

10. Сколько теплоты пошло на таяние льда?

11. Вычислите удельную теплоту плавления льда.

12. Сравните полученный результат с удельной теплотой плавления, данной в таблице I в конце книги, и вычислите погрешность. Чем можно объяснить разницу между результатами работы и данными таблицы?

Упражнение 10.

1. 600 г льда, взятого при 0° , нагреванием превратили в воду при 30° . Сколько теплоты потрачено на нагревание?

2. 8 кг льда, взятого при $t = -30^\circ$, превратили нагреванием в воду при 20° . Сколько теплоты пошло на это нагревание? *Отв. 920 ккал.*

3. Сколько льда при $t_1 = 0^\circ$ можно погрузить в 5 л воды при $t_2 = 40^\circ$, чтобы получить воду при 0° ? *Отв. 2,5 кг.*

4. 2 л воды при $t_1 = 90^\circ$ нужно быстро охладить до 10° . Определить, сколько льда, взятого при 0° , нужно для этого бросить в воду? *Отв. 1,8 кг.*

5. Сколько нужно теплоты, чтобы расплавить 10 кг меди, взятой при $t = 10^\circ$?

6. 150 г расплавленного олова при температуре его плавления вылили в 300 г воды при $t = 12^\circ$. Вычислить, какова стала окончательная температура при смешении? *Отв. $\approx 25^\circ$.*

7. 5 кг свинца нужно расплавить при помощи паяльной лампы. Сколько во время этого плавления будет израсходовано керосина, если коэффициент полезного действия лампы 30% , а начальная температура свинца 17° ? *Отв. ≈ 22 г.*

8. При приготовлении дроби расплавленный свинец при температуре плавления льётся струями в воду. Определить, какова будет температура 20 л воды, взятой при $t = 10^\circ$, для охлаждения 50 кг приготовляемой дроби. *Отв. $\approx 44^\circ$.*

9. С мостовой и тротуаров улицы, площадь которых $10\,000\text{ м}^2$, убран снег с помощью снегогопов. Определить, сколько дров израсходовано для этого, если толщина снежного покрова 10 см, удельный вес снега 0,1,

температура снега — 20° , теплотворная способность дров $3200 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$, коэффициент полезного действия снеготопа 70% . Отв. $\approx 4000 \text{ кг}$.

10. Во время весенних утренников на растениях выделяется иней. Способствует ли выделение инея охлаждению растения или задерживает?

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСВОЕНИЯ.

1. Что называется плавлением и отвердеванием?
2. Как происходит плавление кристаллического и аморфного тела?
3. Что называется точкой плавления и точкой отвердевания?
4. В чём состоит закон постоянства температуры плавления и отвердевания?
5. Чем объясняется постоянство температуры во время плавления и отвердевания?
6. Что называется удельной теплотой плавления?
7. В каких единицах измеряется удельная теплота плавления?
8. Какой формулой выражается количество теплоты, потребное для плавления данной массы тела?
9. Как определить удельную теплоту плавления калориметрическим способом?
10. Как составляется калориметрическое уравнение для плавления?
11. Как изменяется объём тела при плавлении и отвердевании?
12. Как зависит точка плавления от внешнего давления?

2. Парообразование.

107. Парообразование. Переход вещества в пар называется парообразованием.

Парообразование происходит двумя путями — испарением и кипением.

108. Испарение. Всякий знает из своего жизненного опыта, что вода, спирт, эфир, бензин, керосин и любая другая жидкость, будучи налитыми на тарелку, с течением времени убывают в своём количестве и могут совсем исчезнуть из открытого сосуда. Но так как вещество не уничтожается, то, следовательно, оно перешло из жидкого состояния в другое состояние, называемое паром.

Те же жизненные наблюдения позволяют установить, не прибегая к особым опытам в лаборатории, следующие внешние признаки испарения: 1) испарение происходит при любой температуре, 2) испарение происходит только с поверхности жидкости.

Легко также подобрать примеры из повседневных наблюдений, позволяющие вывести условия, способствующие испарению, именно — испарение тем больше, чем: 1) больше свободная поверхность жидкости, 2) выше температура жидкости и 3) быстрее удаляются образовавшиеся над жидкостью пары.

Скорость испарения различных жидкостей различна: так, эфир испаряется быстрее спирта, воды и многих других жидкостей; ртуть — очень медленно испаряющаяся жидкость.

Наконец, на опыте можно показать, что с уменьшением давления скорость испарения увеличивается.

Испарение твёрдых тел. Испарение происходит и с поверхности твёрдых тел: испаряются лёд, иод, камфора, нафталин и другие пахучие твёрдые тела.

Насыщение объёма парами. Лабораторные исследования показывают, что испарение быстрее всего происходит в пустоте или под колоколом воздушного насоса; в атмосфере оно быстрее происходит при ветре, уносящем образующиеся пары. В закрытом сосуде испарение в пространство над жидкостью постепенно замедляется, и наступает момент, когда количество пара и жидкости более уже не изменяется. Пар, наполняющий объём в наибольшем количестве, возможном при данных условиях, называется паром, насыщающим пространство, а самое пространство называется насыщенным¹⁾; пар, количество которого не достигло наибольшего, возможного при данных условиях, количества для заполнения данного объёма, называется ненасыщенным.

109. Объяснение испарения по молекулярно-кинетической теории. По молекулярно-кинетической теории молекулы жидкости находятся в непрерывном движении, причём различные молекулы обладают различными скоростями. Молекулы, движущиеся в поверхностном слое жидкости с большими скоростями, могут вылететь из него на такое расстояние (за сферу молекулярного действия), на котором перестает действовать сила сцепления с остальными молекулами поверхностного слоя; они становятся тогда молекулами пара. Если поверхность жидкости велика, то велико и число молекул, вылетающих из поверхностного слоя, и быстрее идёт парообразование. Если температура жидкости повышается, то увеличивается средняя скорость движения молекул, становится больше число вылетающих из жидкости молекул, опять-таки быстрее идёт парообразование. Если жидкость заключена в замкнутый сосуд, то молекулы её пара, носящиеся по прямолинейным путям в пространстве над жидкостью, сталкиваются как друг с другом, так и со стенками сосуда. При этих столкновениях направления их движений могут так меняться, что они попадают в сферу молекулярного действия поверхностного слоя и снова входят в число молекул, составляющих жидкость.

В начале испарения число молекул, вылетающих из жидкости, больше числа молекул пара, попадающих обратно в жидкость. По мере увеличения числа молекул пара увеличивается число молекул, влетающих обратно в жидкость. Естественно, наступает момент, когда число молекул, переходящих из пара в жидкость, станет равным числу молекул пара, вылетающих из жидкости.

¹⁾ В некоторых книгах название насыщенн^{ый} применяется к самому пару.

С этого момента перестаёт увеличиваться количество пара; пар становится насыщенным. При насыщении испарение не прекращается, но число образующихся молекул пара равно числу молекул, возвращающихся за то же время в жидкость. Такое соотношение между жидкостью и паром называется динамическим (подвижным) равновесием. Следовательно, *насыщающим паром называется пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью*. Пар, находящийся долгое время в замкнутом пространстве в присутствии жидкости того же вещества, всегда является насыщенным.

110. Теплота испарения. При парообразовании молекулы пара движутся против сил сцепления, преодолевая сопротивление этих сил. На преодоление всякого сопротивления надо затратить энергию. Энергия, необходимая для парообразования, экимуется или от внешнего источника теплоты, или из кинетической энергии беспорядочного движения молекул всей испаряющей жидкости.

Так как испарение состоит в удалении из жидкости молекул с наибольшими скоростями, а следовательно, и с наибольшими кинетическими энергиями, то общая кинетическая энергия жидкости убывает. По молекулярно-кинетической теории кинетическая энергия молекул тела и его температура связаны между собой. Уменьшение кинетической энергии жидкости соответствует понижению её температуры. Следовательно, если жидкость испаряется без притока теплоты извне, то она должна охлаждаться.

Всякое парообразование сопровождается поглощением теплоты, всякое обращение паров в жидкость (конденсация, сгущение) — выделением теплоты. Различные жидкости требуют различного количества теплоты для парообразования при одинаковых условиях. Для характеристики этого свойства тел вводится особая величина, называемая удельной теплотой парообразования.

Удельная теплота парообразования есть величина, измеряемая количеством теплоты, потребным для обращения 1 г жидкости в пар при температуре парообразования.

Единицами удельной теплоты парообразования служат:

$$\frac{\text{кал}}{\text{г}} \text{ и } \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}.$$

Если обозначить удельную теплоту парообразования через r , массу испарившейся жидкости через m , количество теплоты, потребное для парообразования, через Q , то:

$$\boxed{Q = rm.} \quad (\text{XV})$$

При конденсации каждый грамм пара выделяет такое количество теплоты, которое потребовалось бы при той же температуре для обращения 1 г жидкости в пар.

Жизненные наблюдения дают много примеров понижения температуры при испарении (см. дальше примеры 1—7) или её повышения при конденсации (пример 8, 9): 1) смоченная рука холоднее несмоченной; 2) она становится ещё холоднее, если ею махать или её держать на ветру; 3) ощущение холода усиливается при смачивании тела быстро испаряющимися жидкостями, например эфиром, духами; 4) высокая температура легче переносится человеком в сухом воздухе, когда происходит испарение пота, чем во влажном, когда нет испарения;

5) собаки для охлаждения высовывают мокрый язык; 6) в жарких странах вода сохраняется прохладной в пористых сосудах: проникая через поры, слой влаги испаряется, понижая температуру сосуда и остающейся воды; 7) для охлаждения воды или молока сосуд обёртывают в мокрую ткань; 8) дождь или снег при безветренной погоде может задерживать понижение температуры вследствие выделения тепла при конденсации пара в осадки; 9) при паровом отоплении, которое применяется преимущественно в фабричных зданиях, банях и т. п., тепло получается от конденсации паров в воду.

Можно показать на опыте охлаждение при испарении, если смочить губку эфиром или налить эфир в стакан и сильно дуть на губку или продувать воздух через эфир. На губке и на стакане тогда появляется иней: от испарения эфир и окружающий воздух охлаждаются до температуры 0°

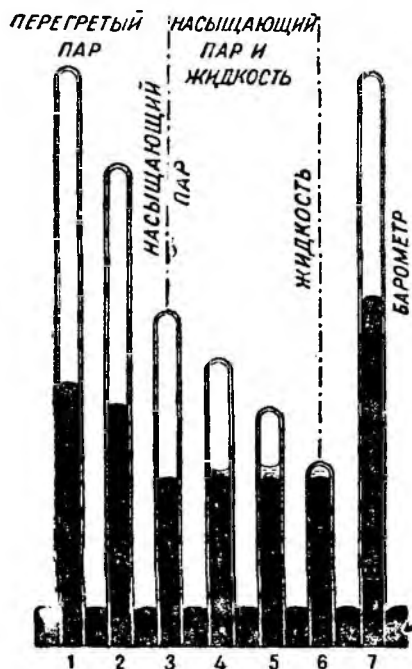


Рис. 100. Изменение давления пара в зависимости от изменения объёма и переход ненасыщенного пара при определённом давлении в насыщающий.

и ниже и из воздуха выделяется в виде инея заключающаяся в нём влага.

111. Зависимость между объёмом и давлением пара при постоянной температуре. Чтобы изучить зависимость между объёмом и давлением пара, надо образовать пар в каком-либо замкнутом пространстве и измерять его давление при разных объёмах. Это удобно сделать в пространстве над ртутью в торичеллиевой трубке.

Возьмём два ртутных барометра и в один из них пустим при помощи изогнутой пипетки одну-две капли исследуемой жидкости, например эфира (рис. 100).

Капля жидкости поднимется в пространство над ртутью и там испарится. Ртуть под давлением паров опустится. Разность уровней ртути в этой трубке и в барометре даёт давление паров в сантиметрах ртутного столба (рис. 100, положения 1 и 7). Если в трубке не окажется никаких следов жидкости, то пары могут считаться ненасыщающими. Поднимем первую трубку из сосуда и тем увеличим объём, занимаемый парами. Тогда мы увидим, сравнивая ртутные столбы в исследуемой и барометрической трубках, что давление паров при увеличении объёма уменьшается. Опуская трубку, уменьшая объём, будем наблюдать увеличение давления (рис. 100, положения 2 и 7).

При дальнейшем уменьшении объёма заметим образование тончайшего слоя жидкости (положение 3, рис. 100). Появление жидкости — признак насыщения пространства парами. Разность уровней ртути в трубке и барометре даёт давление насыщающих паров. Опыт показывает, что при неизменной температуре давление насыщающих паров больше давления ненасыщающих.

Дальнейшее уменьшение объёма (4, 5, 6 положения, рис. 100) и сравнение каждый раз уровней ртути показывает: 1) что при уменьшении объёма сгущается из паров всё большее и большее количество жидкости, 2) что остающиеся пары остаются насыщающими и 3) что давление насыщающих паров независимо от объёма остаётся постоянным.

Из подобных исследований получают следующие выводы:

1. *Зависимость давления от объёма для ненасыщающих паров выражается законом Бойля-Мариотта, притом тем точнее, чем дальше от насыщения находится пары.*

2. *Давление насыщающих паров при одной и той же температуре не зависит от объёма*, так как при уменьшении объёма часть пара переходит в жидкость, при увеличении его часть жидкости переходит в пар.

3. *При одной и той же температуре насыщающие пары различных веществ имеют различное давление* (рис. 101).

112. *Зависимость давления насыщающих паров от температуры.* Изучение зависимости давления паров от температуры

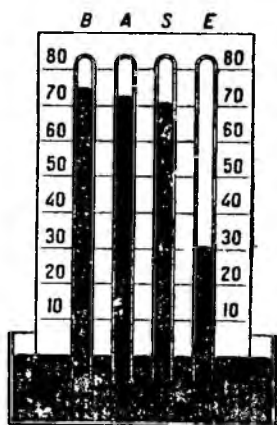


Рис. 101. Давления различных насыщающих паров различны: в трубке А — вода; в трубке S — спирт; в трубке E — эфир; B — ртуть.

может быть произведено на приборе, состоящем из сообщающихся сосудов с одним подвижным коленом (рис. 102). Подняв правое подвижное колено так, чтобы ртуть дошла до крана в левом, запирают кран, опускают правый сосуд с ртутью и образуют в левой трубке пустоту. В воронку над левой трубкой наливают испытуемую жидкость и впускают через кран столько жидкости, сколько нужно, чтобы образовались насыщающие пары. Зная атмосферное давление и разность высот столбов ртути в обоих коленях, можно вычислить давление насыщающих паров.

Насыщающие пары своим давлением понизят уровень ртути в левом колене и поднимут его в правом.

Образуется разность уровней, равная высоте ртутного столба h .

Эта высота h см рт. ст. измеряет избыток давления насыщающих паров над давлением атмосферы.

Измерив по барометру атмосферное давление H см рт. ст., можем вычислить, что давление насыщающих паров равно $H + h$ см рт. ст.

Таблица давления насыщающих паров в см рт. ст.

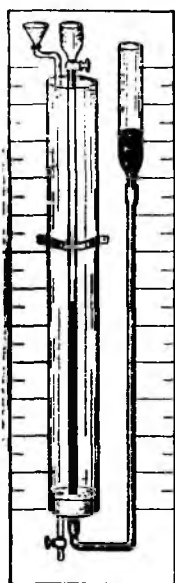


Рис. 102. Прибор для измерения давления паров при разных температурах.

Температура	Серный эфир	Винный спирт	Вода
0	18,6	1,3	0,46
10	29	2,4	0,9
20	44	4,5	1,7
30	64	7,9	3,1
35	76	—	—
40	92	13,4	5,5
50	127	22	9,2
60	174	35	14,7
70		56	23,2
78		76	—
80		83	35,3
90		120	52,4
100		167	76
120			2 ат
150			4,7 „
200			15,2 „

Левое колено с парами окружают широкой стеклянной трубкой, через которую пропускают воду, меняя её температуру (рис. 102)

Измеряя для каждой температуры соответствующее давление насыщающих паров, можно получить данные, сведённые в приведённую выше таблицу.

Из данных измерения можно сделать следующие выводы:

1. Давление насыщающих паров увеличивается с повышением температуры.

2. Давление насыщающих паров при температуре кипения равняется атмосферному давлению.

Зависимость между объёмом, давлением и температурой легко может быть объяснена на основании молекулярно-кинетической теории.

1. При увеличении объёма увеличивается количество молекул, вылетающих из жидкости, т. е. количество пара; при уменьшении

же объёма часть молекул пара влетает обратно в жидкость, и количество пара уменьшается; в обоих случаях условие динамического равновесия остаётся то же: при неизменной температуре, независимо от объёма насыщенного пространства, количество вылетающих из жидкости молекул равняется количеству молекул, влетающих обратно; пока температура остаётся постоянной, остаются постоянными как средняя скорость движения молекул пара, так и количество молекул в 1 см³ насыщенного пара; поэтому и давление паров (удары их молекул об единицу площади стенки сосуда) сохраняется неизменным.

2. При повышении температуры возрастают скорости движения молекул; в то же время увеличивается количество вылетающих молекул, образующих пар, и давление возрастает.

Давление насыщающих паров увеличивается при повышении температуры быстрее, чем давление идеального газа (рис. 102а). Давление идеального газа увеличивается при повышении температуры только от возрастающей скорости молекул.

Давление же насыщающих паров увеличивается при повышении температуры от двух причин: от возрастания скоростей молекул и от увеличения числа молекул пара в том же объёме.

Таким образом, для паров, насыщающих пространство, соотношение между массой, объёмом, давлением

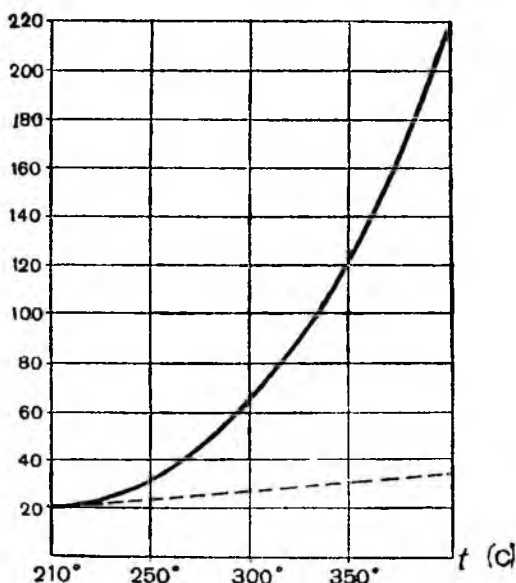


Рис. 102а. Сплошной кривой изображено изменение давления пара, штриховой линией — давления идеального газа при повышении температуры.

и температурой иное, чем для газов; если пары остаются насыщающими, то при всяком изменении объёма этих паров меняется и масса их, в то время как масса газа может оставаться при этих изменениях неизменной.

Таблица давления p насыщающих водяных паров в миллиметрах ртутного столба в пределах от -20° до 30° через 1° и от 30° до 150° через 10° представлена на странице 139.

113. Закон Дальтона. До сих пор изучалось образование пара в пустоте. В действительности происходит испарение в воздух, т. е. в пространство, занятое другими газами или парами. Чтобы изучить это явление, возьмём широкогорлую колбу (рис. 103) и

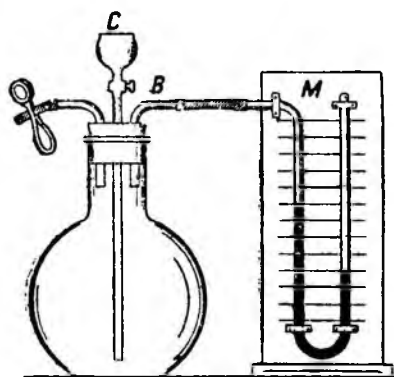


Рис. 103. Прибор для измерения давления смеси газов и паров.

закроем её отверстие пробкой с тремя отверстиями, из которых одно (B) соединено с манометром M , второе (C) заканчивается воронкой с краном, третье — трубкой с зажимом. Выкачаем некоторое количество воздуха и отметим положение ртути в манометрической трубке. Открыв кран C , пустим такое количество, например, спирта, чтобы во всё время опыта его слой оставался на дне. Сейчас же начнётся медленное опускание ртути в левом колене манометра, что будет указывать на постепенное испарение спирта. Выждав некоторое время, когда это понижение ртути

прекратится, т. е. когда наступит насыщение пространства парами, измерим температуру воздуха и уменьшение разности высот ртути в обоих коленах манометра, которое даёт давление насыщающих паров спирта. Если температура воздуха будет равна 20° , то это уменьшение разности высот ртути окажется равным 4,5 см. Посмотрев в таблицу, увидим, что это число совпадает с давлением насыщающих паров спирта, образованных при той же температуре в пустоте. Продолжая опыт, заполним воронку эфиром и впустим в сосуд поверх спирта слой эфира. Увидим постепенное понижение ртути в левом колене и новое уменьшение разности высот ртути.

Из подобных опытов можно сделать выводы:

1. Испарение в пространство, занятое каким-либо газом или паром, происходит медленнее, чем в пустоту.

2. Давление каждого пара в пространстве, занятом другими газами и парами, оказывается таким же, как если бы данный пар один занимал весь объём.

Кипение воды в паровом котле, в котором образующийся пар производит на жидкость давление большее атмосферного, происходит при температурах, превышающих 100° .

4. Опытами найдено, что точка кипения жидкости зависит от материала сосуда, степени его чистоты, рода растворённого газа; между тем температура паров кипящей жидкости от указанных обстоятельств не зависит вовсе; поэтому за температуру кипения жидкости принимается температура паров кипящей жидкости.

5. Температура кипения жидкости во всё время кипения остаётся постоянной.

Объяснение этому явлению подобно тому, которое дано для постоянства температуры плавления.

6. Объём пара больше объёма жидкости, из которой он образовался при одной и той же температуре.

Водяной пар при 100° занимает объём примерно в 1700 раз больший, чем объём такого же количества воды.

7. Температура кипения раствора выше, чем температура кипения чистого растворителя, и повышается с увеличением концентрации раствора. Так, при растворении 6,6 г поваренной соли в 100 г воды температура кипения раствора доходит до 101° , а при растворении 25,5 г соли в 100 г воды — до 105° .

8. Таблица удельных теплот парообразования при точке кипения.

Вода	539	Сера	362	Спирт	205
Ртуть	68	Сероуглерод	80	Эфир	85

9. Удельная теплота парообразования уменьшается при повышении температуры кипения. Так, для воды:

Температура кипения	0	50	100	150	200
Теплота парообразования	595	568	539	506	468

115. Уравнение теплового баланса при парообразовании и конденсации.

Составим уравнение теплового баланса для такого явления: через воду калориметра пропускается насыщенный пар воды.

От соприкосновения с более холодной водой пар конденсируется в воду, выделяя теплоту. Полученная от конденсации вода продолжает охлаждаться при смешении с водой калориметра. От теплоты, выделенной при конденсации пара и охлаждении воды, нагревается калориметр и вода в нём.

Количество теплоты, отданной при конденсации и охлаждении одних тел, должно быть равно количеству теплоты, полученной всеми нагревающимися телами. Пусть в калориметре, масса которого $m_1 = 80$ г, а удельная теплоёмкость $c_1 = 0,09 \frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}$, налито $m_2 = 100$ г воды при начальной температуре $t_1 = 20^\circ$.

В воду пропущено $m = 6$ г водяного пара при температуре кипения $t = 100^\circ$. Найти теплоту парообразования r , если окончательная температура смеси $\theta = 52,8^\circ$.

Теплота, отданная паром при конденсации без изменения температуры:

$$Q = rm;$$

водой, полученной из пара, при остывании от t до θ :

$$Q_1 = cm(t - \theta).$$

Теплота, полученная калориметром:

$$Q_2 = c_1 m_1 (\theta - t_1);$$

водой:

$$Q_3 = cm_2 (\theta - t_1).$$

$$Q + Q_1 = Q_2 + Q_3;$$

$$rm + cm(t - \theta) = (c_1 m_1 + cm_2)(\theta - t_1);$$

$$r = \frac{(c_1 m_1 + cm_2)(\theta - t_1) - cm(t - \theta)}{m}$$

$$r = \frac{(0,09 \cdot 80 + 1 \cdot 100)(52,8 - 20) - 1 \cdot 6(100 - 52,8)}{6};$$

$$r = 539 \frac{\text{кал}}{\text{г}}.$$

116. Лабораторная работа 12. Определение при помощи калориметра удельной теплоты парообразования воды.

Приборы: 1) калориметр; 2) кипятильник; 3) термометр; 4) весы с разновесом; 5) штатив с кольцом и зажимом; 6) сухопарник.

Примечание. Сухопарник служит для удаления частичек воды, увлекаемых паром из кипятильника; эти частицы остаются на дне сухопарника. Сухопарником может служить пробирка, заткнутая пробкой, в два отверстия которой вставлены две стеклянные трубки, из которых одна доходит почти до дна; конец этой трубки *b* соединяется с трубкой кипятильника, а конец другой *a* соединяется с трубкой, погружённой в воду калориметра (рис. 104).

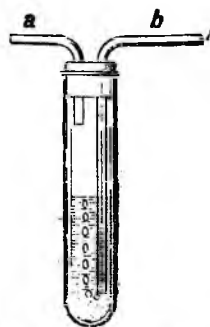


Рис. 104. Сухопарник.

Ход работы. 1. Взвесив калориметр, налить в него 200—300 г воды комнатной температуры. Массу воды определить с точностью до 0,5 г. Результаты измерений и вычислений записать в таблицу:

№ опыта	Масса калориметра m_1	Масса калориметра с водой $m_1 + m_2$	Масса воды m_2	Температура воды t_1	Температура воды после пропускания пара θ	Масса пропущенного пара m	Удельная теплота конденсации r

2. Довести до кипения воду в кипятильнике, предварительно соединив с ним сухопарник.

3. Когда из трубки сухопарника будет выделяться сильной струёй пар, погрузить конец трубки в воду калориметра, заметив температуру воды перед самым погружением трубки.

4. Помещивая мешалкой воду, пропускать пар, пока температура воды в калориметре не повысится на $10\text{--}15^\circ$, тогда вынуть трубку.

5. Тщательно перемешать воду и записать наивысшую температуру.

6. Путём взвешивания воды в калориметре определить массу осевшего в калориметре пара.

7. Вычислить, сколько теплоты нужно, чтобы калориметр и воду в нём нагреть от начальной температуры t_1 до окончательной температуры θ .

8. Сколько теплоты выделяет вода, образовавшаяся из пара при охлаждении от 100° до температуры θ ?

9. Сколько теплоты выделил пар при переходе в воду?

10. Сколько теплоты выделяет 1 г пара при переходе в жидкое состояние при $t = 100^\circ$?

11. Сравнить полученный результат с данными таблицы.

117. Способы обращения ненасыщающих паров в насыщающие. Открыв кран трубки (рис. 102), поднимем подвижное колено до тех пор, пока ртуть в неподвижном колене не дойдёт до крана; после этого кран закроем и опустим сосуд со ртутью, чтобы образовать в трубке с краном пустоту.

Вольём в воронку над краном немного воды или другой жидкости (спирта, эфира); открыв слегка кран, пустим в трубку столько капель, сколько нужно для того, чтобы после испарения получить ненасыщающие пары воды, спирта или эфира. Если теперь начать поднимать подвижную трубку прибора, наполненную ртутью, и сжимать давлением ртутного столба пары, то можно достигнуть такого давления, при котором в барометрической трубке появится слой жидкости и пар делается насыщающим: при уменьшении объёма то же самое количество пара становится достаточным, чтобы насытить новое уменьшённое пространство. Если, обратно, начать опускать подвижную трубку, то жидкость начнёт испаряться, слой жидкости

уменьшится, пока, наконец, жидкость совсем не исчезнет; при дальнейшем опускании трубки давление будет уменьшаться, объём, занятый паром, увеличиваться, и пар становится ненасыщающим. Если теперь, увеличив значительно объём, т. е. приведя пар в состояние, далёкое от состояния насыщения, прекратить перемещение подвижной трубки и начать охлаждать верх барометрической трубки, занятый паром, при помощи льда или тряпки, смоченной холодной водой, то при достаточном охлаждении можно опять обнаружить возникновение слоя жидкости, т. е. появление насыщающих паров. Следовательно, охлаждением можно довести ненасыщающие пары до такой температуры, при которой их давление становится равным давлению при насыщении, и пар становится насыщающим; дальнейшее охлаждение влечёт за собой обращение насыщающего пара в жидкость, сжижение, или конденсацию, пара. Итак, существуют два способа обращения паров в жидкость: 1) увеличение давления на пары, сжатие их; 2) понижение температуры паров, охлаждение их.

118. Критическая температура. Не при всякой температуре возможно обратить пары в жидкость одним увеличением давления. В 1869 г. было выяснено, что *для всякой жидкости существует температура, выше которой её пары ни при каких давлениях не могут быть обращены в жидкость*. Такая температура называется критической.

Ни одно вещество при температуре выше критической не может быть обнаружено в жидком виде, какому бы давлению его ни подвергать.

Давление, под которым должно находиться вещество, имеющее критическую температуру, чтобы исчезло различие между жидкостью и паром, называется критическим давлением.

Состояние, в котором находится смесь жидкости и её насыщенного пара в замкнутом сосуде при критическом давлении и критической температуре, называется критическим.

Когда вещество находится в критическом состоянии, то плотности жидкости и её пара становятся одинаковыми. Мениск, разделяющий жидкость от её пара, при наступлении критического состояния исчезает, поверхностное натяжение становится равным нулю, жидкость и её пар становятся неразличимыми.

Удельная теплота парообразования при критической температуре становится равной нулю.

Критическая температура для воды равна 374° , для спирта $243,1^{\circ}$, для эфира $193,8^{\circ}$, для углекислоты $31,1^{\circ}$. Если бы температура этих веществ была выше их критической температуры, они при всяких давлениях оставались бы парообразными и считались бы газами.

119. Сжижение газов. Сходство газов с ненасыщающими парами обычных жидких тел наводило на мысль, нельзя ли и газы обратить в жидкость, применив к ним тот или другой способ сжиже-

ния паров. Действительно, первый газ (аммиак) был обращён в жидкость уже в 1799 г. Особенно сильно продвинулись вперёд работы по сжижению газов со времени великого физика Фарадея (1791—1867), который дал способ сжижения газов путём одновременного применения охлаждения и сжатия испытуемого газа. Ко второй половине прошлого века из всех известных в то время газов остались необращёнными в жидкость только шесть¹⁾. Задержка в сжижении их ещё на четверть столетия произошла потому, что техника понижения температуры была на недостаточной высоте. В то время как для повышения давления уже существовали машины, позволявшие доводить давления до нескольких тысяч, а позднее и десятков тысяч атмосфер, получение низких температур тогда ограничивалось, примерно, температурой на 110° ниже 0° . Между тем одного давления без дальнейшего значительного понижения температуры ниже 0° оказалось недостаточно для сжижения этих шести газов, потому что они оставались всё ещё при температурах, которые были выше их критических температур.

Действительно, критическая температура для кислорода равна $-188,8^{\circ}$, для азота равна $-147,1^{\circ}$, для водорода равна $-239,9^{\circ}$. Когда в конце XIX в. сумели понизить их температуру ниже критической, то эти шесть газов быстро один за другим были обращены в жидкое состояние, и через сто лет после первого обращения газа в жидкость, в 1899 г., последний из постоянных газов — водород — был обращён в твёрдое состояние. В 1908 г. гелий обращён в жидкое и в 1925 г. в твёрдое состояние. Таким образом, не существует резкой границы между жидкостью, её паром и газом. Состояние вещества обуславливается его плотностью или объёмом, давлением и температурой. Условно принято называть газами пары таких жидкостей, которые при нормальном давлении и обычных температурах всегда остаются очень далёкими от насыщения.

120. Способы получения низких температур. Первоначальный способ получения низких температур — изготовление охлаждающих смесей. Если смешать снег и поваренную соль в весовом отношении 3 : 1, то можно понизить температуру до -20° ²⁾. При смешении снега и соли происходит плавление; плавление требует затраты теплоты; при быстром плавлении и при отсутствии притока теплоты извне, теплота заимствуется от самих плавящихся тел, и происходит значительное понижение температуры.

Дальнейшее охлаждение достигалось при испарении и при кипении под пониженным давлением жидкостей, полученных из вновь сжиженных газов. В § 110 было выяснено, что всякое испарение происходит с поглощением теплоты. При пониженном давлении испа-

¹⁾ Азот, водород, кислород, окись азота, окись углерода и метан, или болотный газ.

²⁾ Известно около десятка других смесей, дающих понижение от 15° до 50° ниже 0° .

рение усиливается, и может наступить кипение при температуре более низкой, чем обычная. Теплота парообразования увеличивается для более низких температур. При отсутствии притока извне теплота берётся от самой кипящей жидкости. Поэтому жидкости с низкой температурой кипения при кипении под колоколом насоса дают сильное понижение температуры. Так, жидкая углекислота, получаемая из углекислого газа (критическая температура $+31^{\circ}\text{C}$) сжатием при комнатной температуре, будучи выпущена из сосуда, так быстро испаряется под атмосферным давлением, что от охлаждения обращается в твёрдую углекислоту. Смесь твёрдой углекислоты с эфиром под колоколом откачивающего насоса испаряется так быстро и с таким поглощением теплоты, что температура её понижается до -110° .

Дальнейшее понижение температуры основывается на свойстве многих газов, состоящем в том, что они при расширении охлаждаются. Для воздуха, например, понижение температуры равно $0,26^{\circ}\text{C}$ при уменьшении давления на 1 ат .

Если газ расширяется, то при расширении расходящиеся молекулы газа совершают работу по преодолению сил сцепления между ними. При быстром расширении газ не получает теплоты извне; работа расширения совершается за счёт энергии самого газа, отчего температура его понижается.

Чтобы получить этим способом понижение температуры, газ сжимается под давлением до 200 ат и охлаждается самой сильной из существующих охлаждающих смесей (например до -110°); затем давление газа быстро понижается; при этом расширении газ ещё охлаждается настолько, что может обратиться в жидкое состояние.

Как только какой-либо из газов (например кислород) впервые получали в жидком состоянии в достаточном количестве, эту жидкость помещали под колокол откачивающего насоса и приводили в состояние кипения при пониженном давлении; температура жидкости понижалась ещё больше, и этой жидкостью пользовались как охладителем для сжижения следующего из постоянных газов (например азота). Температура кипения азота при нормальном давлении равна -196° ; при пониженном давлении она ещё ниже. Жидкий азот, кипящий при пониженном давлении, может служить охладителем для водорода и т. д. Понижение температуры при кипении под пониженным давлением так велико, что часть сжиженного газа может обращаться в твёрдое состояние.

В настоящее время профессору де-Гааз удалось получить температуру на $0,005^{\circ}$ выше абсолютного нуля (при помощи иных способов, чем описанные выше).

В следующей таблице приведены температуры кипения и отвердевания при нормальном давлении тех тел, которые обычно являются газами:

Газы	Кислород	Воздух	Азот	Водород	Гелий
t кипения	—183	—193	—196	—253	—269
t отвердевания	—218	—	—210	—259	—271,9 ¹⁾

Для жидкого воздуха, имеющего температуру почти на 100° ниже 0°C , окружающий комнатный воздух при $t = 20^{\circ}$ является сильно нагретым телом. При соприкосновении с ним жидкий воздух кипит и быстро испаряется.

Чтобы сохранять воздух в жидком состоянии возможно большее время, надо воспрепятствовать притоку теплоты к жидкому воздуху от окружающих тел. С этой целью для хранения жидкого воздуха применяются особые сосуды Дьюара. Сосуды Дьюара представляют собой стеклянные сосуды с двойными стенками, из внутреннего пространства которых выкачан воздух (для устранения передачи теплоты теплопроводностью); стенки сделаны зеркальными (для уменьшения лучеиспускания); сосуды устраиваются с узким горлышком; они держатся открытыми (рис. 105).



Рис. 105. Сосуд Дьюара.

121. Применение сжиженных газов.

Сжижение газов имеет значение техническое и научное. В техническом отношении сжижение газов весьма облегчает перевозку газов, применяемых в промышленности, медицине и т. п., так как при жидком состоянии в том же объеме заключается большее количество. Так доставляется в чугунных баллонах жидкая углекислота на заводы газированных вод.

Холодом, получаемым от сжижения газов, пользуются при перевозке скоропортящихся продуктов.

Ещё в 1897 г. было найдено, что кашница из жидкого воздуха и древесного угля даёт превосходное взрывчатое вещество.

Взрывчатые патроны наполняются угольным порошком или кизельгуром и смачиваются керосином; часть патрона заполняется ватой. На месте потребления патроны вставляются в буровые отверстия, насыщаются жидким воздухом, после чего с помощью бикфордова шнура немедленно взрываются. Невзорвавшиеся патроны, в отличие от динамитных и других, применяемых при взрывных работах, совершенно безопасны, так как жидкий воздух улетучивается весьма быстро.

Тем же способом жидкий воздух применяют для корчевания шпел, разрыхления почвы и т. д.

¹⁾ При давлении в 26 ат.

Жидкий воздух широко используется в спасательных аппаратах на рудниках, при полётах на большой высоте, где им обогащается горючая смесь мотора.

Жидкий воздух даёт лёгкий способ получения чистого кислорода, так как температура кипения азота ниже, чем кислорода, и он испаряется ранее кислорода. Жидкий воздух даёт средство для быстрого получения в твёрдом виде многих других жидкостей и газов.

Что касается научного значения сжижения и отвердевания газов, то прежде всего оно лишний раз подтвердило единство в строении тел, показав, что состояние тела зависит от его температуры и давления, под которым оно находится, но не связано раз навсегда неразрывно с самим телом. С другой стороны, достигнутые при сжижении газов низкие температуры весьма широко раздвинули пределы научных исследований и позволили открыть изменения многих свойств при температурах на $200\text{--}270^\circ$ ниже 0° .

Так, упругие тела, как каучук, или мягкие, как фрукты, становятся при этих температурах хрупкими, как стекло. Ртуть, цинк, свинец приобретают ковкость; хлопок, смоченный жидким воздухом (вата), становится взрывчатым, как порох. Очень многие вещества (спирт, яичная скорлупа и другие) начинают светиться лучами различных цветов (преимущественно зеленоватыми) после освещения их белым светом. Сильно изменяются многие свойства металлов, например их способность проводить электричество. Все эти исследования позволяют глубже проникнуть в природу строения вещества.

Упражнение II.

1. Сколько нужно теплоты, чтобы один стакан воды (250 см^3), взятой при 10° , довести до кипения и выпарить из него при кипении 20 г воды?
2. 20 г водяного пара при $t_1 = 100^\circ$ пропущено в 800 г воды при $t = 10^\circ$. Определить температуру смеси. *Отв.* 25° .
3. 50 л воды, взятой при $t = 10^\circ$, хотят нагреть до кипения путём пропускания водяного пара при $t_1 = 100^\circ$. Сколько нужно пропустить для этого водяного пара?
4. 2 л воды, имеющей $t = 10^\circ$, нагревают до 80° , пропуская в неё водяной пар при $t_1 = 100^\circ$. Сколько пришлось пропустить пара? *Отв.* 250 г .
5. В 500 г воды пропущено 63 г водяного пара при $t = 100^\circ$. Температура после пропускания пара стала 80° . Чему была равна начальная температура воды? *Отв.* $9,6^\circ$.
6. При пропускании в 250 г воды при $t = 16^\circ$ 12 г паров эфира при температуре его кипения температура воды повысилась до $20,7^\circ$. Вычислить теплоту парообразования эфира.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСВОЕНИЯ.

1. Чем отличается кипение от испарения?
2. Что такое теплота парообразования?
3. От каких условий зависит скорость испарения данного количества жидкости?

4. Что называется насыщающим паром?
5. Как объясняется по молекулярно-кинетической теории испарение жидкости и насыщение пространства паром?
6. Как на основании молекулярно-кинетической теории объяснить большую медленность испарения жидкости в воздухе сравнительно с испарением в пустоте?
7. Происходит ли испарение твёрдых тел?
8. Привести примеры понижения температуры при испарении?
9. Зависит ли давление насыщающих паров от объёма?
10. Что происходит при уменьшении объёма, занятого насыщающими парами? что — при его увеличении?
11. Зависит ли давление насыщающих паров от температуры?
12. Что происходит с жидкостью, когда давление насыщающих паров её становится равным атмосферному давлению?
13. Как называется температура, при которой давление насыщающих паров становится равным атмосферному?
14. Как изменяется температура кипения жидкости при повышении внешнего давления? при уменьшении его?
15. Зависит ли давление ненасыщающих паров от объёма?
16. Какими способами можно обратить пары ненасыщающие в насыщающие, а последние — в жидкость?
17. Что такое критическая температура?
18. Как производится сжижение газов?
19. В чём состоит закон Дальтона?

Литература. Григорьев, Холод в природе и технике.

3. Влажность воздуха.

122. Влажность воздуха. На Земле идёт непрерывное образование водяных паров: происходит испарение со всех водоёмов, с растительного покрова, пары выдыхаются животными. Так как плотность водяного пара меньше плотности воздуха (она равна 0,62 плотности воздуха), то водяные пары проникают вверх от поверхности земли, распространяясь по атмосфере.

Атмосферное давление есть сумма давления сухого воздуха и давления находящегося в нём водяного пара. Выраженное в миллиметрах ртутного столба, давление водяного пара, находящегося в воздухе при данной температуре, называется абсолютной влажностью.

Но большинство явлений, связанных с влажностью, например быстрота испарения, высыхание тканей, увядание растений, состояние животных организмов, зависит не от количества паров, находящихся в атмосфере, а от того, насколько близко это количество от насыщения. При давлении водяного пара в 6 мм ртутного столба водяной пар в жаркий июльский полдень будет очень далёк от насыщения, в то время как он может насыщать воздух в какой-нибудь прохладный осенний день. Для характеристики влажности воздуха, кроме абсолютной влажности, вводится ещё относительная влажность. Относительной влажностью называется выраженное в процентах отношение абсолютной влажности к давлению паров, насыщающих воздух при данной

температуре. Давление насыщающих водяных паров, как сказано выше, тщательно изучено, и составлены таблицы этого давления для разных температур (см. таблицу в § 114). Если температура воздуха $t = 20^\circ$ и давление находящихся в воздухе паров, как было дано выше, равно $f = 6$ мм рт. ст., то таблица в § 114 даёт давление насыщающих при 20° паров $F = 17,54$, и тогда относительная влажность равна $\frac{6 \cdot 100}{17,54} = 34\%$. Вообще, если абсолютная влажность f мм, давление насыщающих паров при температуре воздуха F мм, а относительная влажность B , то:

$$B = \frac{f}{F} \cdot 100\%$$

Так как значение F заимствуется для каждой температуры из таблиц, то определение относительной влажности сводится к нахождению абсолютной влажности f .

Зная упругость водяных паров, легко рассчитать и массу их в единице объёма. 1 м³ сухого воздуха при 0° и нормальном давлении в 760 мм рт. ст. имеет массу в 1293 г. При давлении в H мм он будет иметь массу $\frac{1293 \cdot H}{760}$ (§ 68), а при температуре t° и давлении H мм 1 м³ воздуха будет иметь массу $\frac{1293 \cdot H}{760 (1 + \beta t)}$ (§ 55). Плотность водяного пара относительно воздуха равна 0,622. Поэтому масса водяного пара в 1 м³ при давлении F и температуре t выразится через:

$$P = \frac{1293 \cdot 0,622}{760} \cdot \frac{F}{1 + \beta t},$$

где β можно принять равным $\frac{1}{273} = 0,00366$. После числовых преобразований $P = \frac{1,0582}{1 + \beta t} \cdot F$. Дробь $\frac{1,0582}{1 + \beta t}$ при обычных температурах воздуха близка к единице, поэтому выраженная в граммах масса водяного пара в 1 м³ воздуха и его давление в миллиметрах ртутного столба являются близко совпадающими числами, как это можно видеть из прилагаемой таблицы.

Температура t°	Давление p в мм рт. ст.	Масса в г водяного пара в 1 м ³ воздуха
0	4,58	4,84
10	9,21	9,4
20	17,54	17,3
30	31,82	30,3

Абсолютная влажность может быть выражена приблизительно числом граммов водяного пара, находящегося в 1 м³ воздуха.

123. Точка росы. Один из способов определения абсолютной влажности основан на определении точки росы. Точкой росы называется такая температура, при которой пары, находящиеся в воздухе, становятся насыщающими. В § 117 было отмечено, что пары ненасыщающие могут быть переведены в насыщающие путём понижения температуры. Появление следов росы на охлаждаемых предметах является признаком насыщения; температура появления росы и отмечается как точка

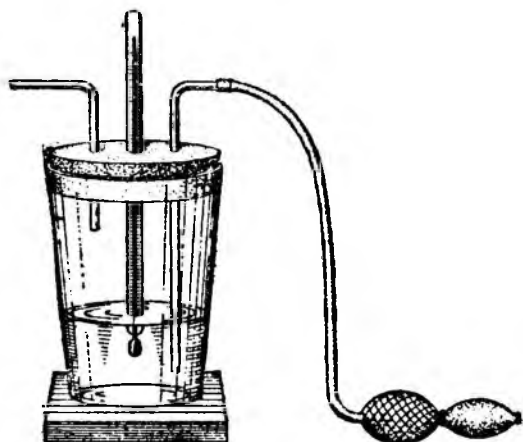


Рис. 106. Простейший гигрометр.

росы. Приборы для определения влажности называются гигрометрами¹⁾.

124. Гигрометр. Всякий гигрометр должен иметь приспособление для понижения температуры и термометр для измерения её. Понижение температуры может быть вызвано быстрым испарением эфира, заимствующим необходимую для испарения теплоту от сосуда и окружающего воздуха. Поэтому простейшим гигрометром может служить любой стакан, в который налит эфир и опущен термометр (рис. 106). Если через трубку, опущенную в эфир, продуть воздух, то можно вызвать такое понижение температуры эфира, сосуда и окружающего воздуха, что водяные пары воздуха при том же давлении станут насыщающими и образуют на стакане тончайший налёт влаги. Температура при первом появлении росы есть точка росы. Затем по таблице отыскивается

¹⁾ От греческого слова *гигрос* — влажный.

давление водяных паров f , насыщающих воздух при точке росы; это же давление есть давление паров, находящихся в воздухе при его температуре, т. е. абсолютная влажность воздуха.

Лабораторные гигрометры отличаются от описанного тем, что они дают возможность точнее отметить момент появления росы. Рисунок 107 даёт внешний вид лабораторного гигрометра Ламбрехта.

Внутри коробки налит эфир, в который вставлен термометр. Через эфир продувается воздух при помощи резиновой груши. Роса появляется на хорошо отполированном и позолоченном круге коробки. Чтобы точнее отметить её появление, к кругу коробки приделана рамка из того же металла, отделённая внизу от коробки щелью. Так как рамка медленнее охлаждается, чем стенки коробки, то сравнение состояний двух поверхностей — круга и рамки — позволяет точнее отметить момент появления росы.

125. Психрометр.

Описанный выше тип гигрометра неудобен для быстрого опреде-

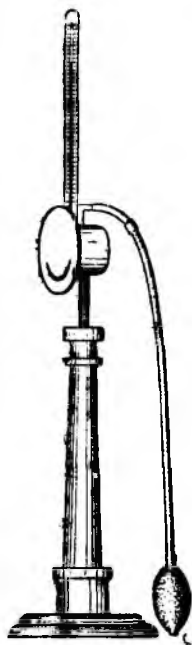


Рис. 107. Гигрометр Ламбрехта.

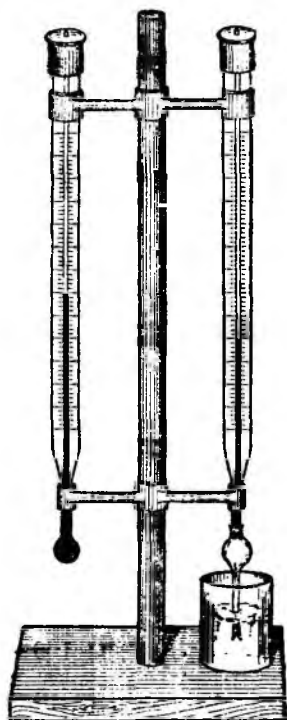


Рис. 108. Психрометр.

ления влажности; поэтому на метеорологических станциях для определения относительной влажности применяются приборы, называемые психрометрами. Психрометр Августа состоит из двух термометров (рис. 108), один из них во время наблюдения остаётся сухим; шарик другого плотно обвязывается в один слой чистым батистом, конец которого опускается в стакан с водой (дистиллированной или дождевой). Вода поднимается по батисту, с него она испаряется и при испарении заимствует теплоту от окружающего воздуха и шарика термометра, почему показания мокрого термометра ниже показаний сухого. Скорость испарения зависит от того, насколько пары, находящиеся в воздухе, далеки от насыщения;

чем относительная влажность меньше, тем испарение быстрее, тем значительнее поглощение теплоты и тем больше разность показаний термометров. По этой разности температур можно вычислить абсолютную и относительную влажности. Для ускорения определения такие вычисления сделаны заранее и сведены в таблицу (таблица 4 в конце книги), которая для каждого показания сухого и мокрого термометров даёт относительную влажность.



Рис. 109. Волосяной гигрометр.

влажности в процентах. Деление 0 ставится при полной сухости воздуха; деление 100 — при насыщении; дуга между 0 и 100 делится на 100 равных частей.

126. Волосяной гигрометр. Ещё более простой прибор основан на свойстве человеческого волоса изменять свою длину при изменении влажности, именно удлиняться при увеличении влажности и укорачиваться при уменьшении. Обезжиренный и надлежащим образом обработанный человеческий волос прикрепляется одним концом к раме (рис. 109), а на другом конце несёт лёгкую гирьку. Чтобы сделать заметными изменения его длины, волос перекидывают через блок, к которому прикреплена длинная стрелка. Нажимая на блок благодаря весу гирьки, волос при удлинении вращает блок в одном направлении, при укорочении — в другом. Связанная с блоком стрелка ходит по дуге, на которой нанесены показания относительной

Упражнение 12.

1. Зачем продувают воздух через эфир в гигрометре?
2. Почему вода поднимается вверх по батисту в психрометре?
3. Когда больше относительная влажность при одной и той же абсолютной влажности, — в летнее время, днём или ночью?
4. Почему человек, носящий очки, при входе зимой с улицы в комнату должен протирать очки?
5. Найти абсолютную и относительную влажность, если температура воздуха $t = 20^\circ$, точка росы $t_0 = 9^\circ$.
Отв. 51%.
6. Найти абсолютную и относительную влажность, если температура воздуха 16° , или 18° , или 24° , а точка росы 10° , или 12° , или 14° .
7. Определить точку росы, если t воздуха равна 18° , относительная влажность $B = 60\%$.
Отв. $10,1^\circ$.
8. Определить точку росы, если температура воздуха 20° , 24° или 16° и относительная влажность 50% , 60% или 80% .
9. При какой температуре воздуха точка росы $t_0 = 7$, если $B = 75\%$?
Отв. $11,2^\circ$.

10. Температура воздуха днём $t = 22^\circ$; $B = 60\%$. Выпадет ли ночью роса, если температура почвы станет равна 10° ?

11. Температура воздуха 0° ; относительная влажность $B = 70\%$. Выпадет ли ночью иней, если температура почвы понизится до -5° ?

12. При $t = 15^\circ$ влажность воздуха в помещении 75% . При прекращении топки температура понизилась до 2° . Определить количество воды, выделившейся из 1 м^3 воздуха.

Отв. 4 г.

13. Показания сухого термометра психрометра: 10° , 12° , 18° , 24° , 30° . Соответствующие показания смоченного: 8° , 9° , 14° , 18° , 22° . Найти по 4-й таблице в конце книги относительную влажность для каждого случая.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСВОЕНИЯ.

1. Что называется абсолютной влажностью воздуха?
2. Что называется относительной влажностью воздуха?
3. Что называется точкой росы?
4. Каким способом можно определить точку росы?
5. Какие приборы предназначены для определения точки росы?
6. Как определить относительную влажность, зная точку росы?
7. Что такое психрометр и как им пользоваться?
8. Какое значение в природе и технике имеет относительная влажность?

V. РАБОТА ГАЗА И ПАРА.

127. Работа газа при постоянном давлении. В главе о свойствах газа было выяснено, что его давление увеличивается от сжатия или нагревания. Чтобы сделать давление газа больше, чем атмосферное давление, надо затратить работу на сжатие или теплоту на нагревание. Поэтому газ, доведённый до давления выше атмосферного, имеет запас потенциальной энергии по отношению к окружающей атмосфере. За счёт этого избытка потенциальной энергии газ может совершать работу, если ему будет предоставлена возможность расширяться.

Задача вычисления работы газа при его расширении состоит в том, чтобы выразить эту работу в зависимости от давления, под которым газ находится, и от изменения объёма. Вычислим сперва работу расширения газа в простейшем случае, когда расширение происходит при постоянном давлении.

Такое расширение может происходить, когда газ заключён в цилиндр, закрытый лёгким, непроницаемым, движущимся без трения поршнем (рис. 110). При медленном нагревании газ будет так расширяться, что его давление в каждый момент будет равно атмосферному,

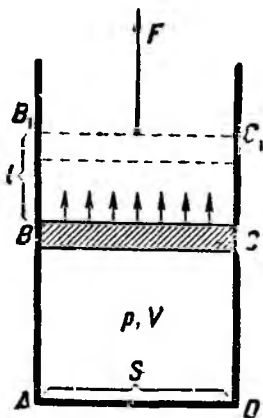


Рис. 110.

т. е. будет постоянным. Обозначим первоначальный объём газа в цилиндре $ABCD$ через V и давление через p .

При нагревании газ, расширяясь, поднимет поршень и займёт объём AB_1C_1D , равный V_1 . При подъёме поршня на расстояние $BB_1=l$ совершается работа, равная произведению силы F на длину пути. Если площадь поршня равна S и давление p , то сила, действующая на поршень, будет:

$$F = pS.$$

Работа поднятия поршня равна

$$A = pSl.$$

Но Sl представляет собой прирост объёма при расширении газа:

$$Sl = V_1 - V = \Delta V.$$

Отсюда:

$$A = p \cdot \Delta V.$$

Таким образом, *работа расширения газа при постоянном давлении измеряется произведением давления на изменение объёма.*

128. График работы расширения газа. Зависимость между изменяющимся объёмом и постоянным давлением можно изобразить

графически, а по графику можно вычислить и произведённую работу.

Примем ось абсцисс за ось объёмов и отложим на ней ряд отрезков, из которых каждый соответствует единице объёма. Ось ординат примем за ось давлений. Каждому значению объёма в данном случае соответствует одно и то же постоянное значение

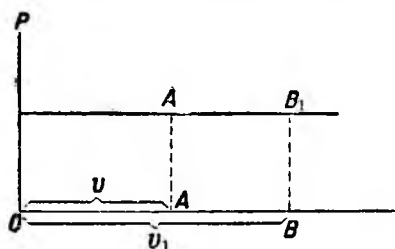


Рис. 111.

давления. Ординаты, восставленные из различных точек абсцисс, будут равны между собой (рис. 111). Поэтому точки, изображающие на плоскости состояние газа, будут все лежать на одной прямой, параллельной оси абсцисс.

Процесс изменения объёма газа при постоянном давлении называется *изобарным*; график, изображающий этот процесс, называется *изобарой*.

Как же по графику вычислять работу расширения газа?

Отрезок абсциссы AB даёт изменение объёма $V_1 - V = \Delta V$; ордината AA_1 изображает давление p . Произведение $p \cdot \Delta V$ на графике даёт значение площади AA_1B_1B ; в то же время произведение $p \cdot \Delta V$ есть мера работы газа.

Отсюда: работа расширения газа при постоянном давлении численно равна площади, ограниченной осью абсцисс, изобарой и ординатами, соответствующими начальному и конечному значениям объема.

128а. Работа газа при переменном давлении. Нельзя ли измерять работу по графику изменения состояния газа и при других процессах, например при изотермическом (рис. 112)?

Чтобы воспользоваться предыдущим выводом, заменим часть кривой AB ломаной $BCC_1DD_1EE_1A_1A$. Такая замена обозначает, что при изменении объема от B до C , от C_1 до D , от D_1 до E , затем от E_1 до A_1 давление остается постоянным, в точках же C , D , E , A_1 внезапно возрастает. При такой замене действительного расширения воображаемым работа расширения газа от V_1 до V_2 численно выразится суммой площадей прямоугольников $A_1E_1eV_1$, eED_1d , dDC_1c и $cCBV_2$. Эта сумма тем точнее представит работу действительного расширения, чем ближе ломаная линия подойдет к кривой, как это видно из чертежа.

Подобное рассуждение можно провести для графика любого процесса; поэтому мы приходим к

окончательному выводу: работа расширения газа численно равна площади, ограниченной осью абсцисс, графиком изменения состояния газа

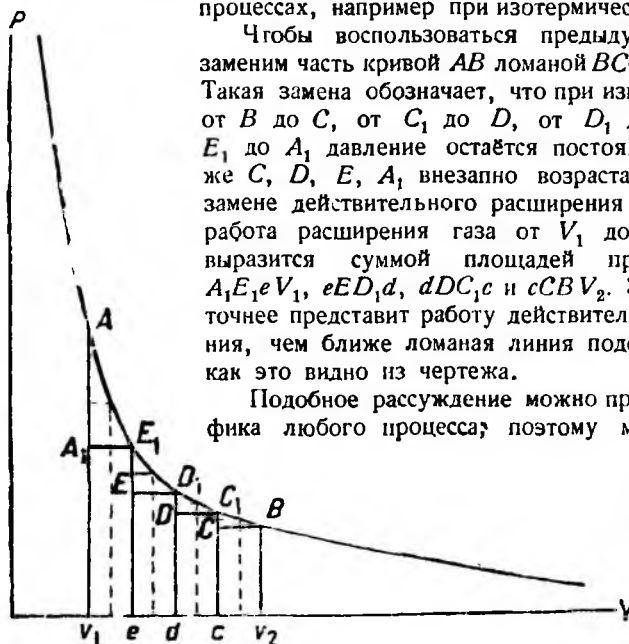


Рис. 112. Измерение работы расширения газа по графику изменения состояния.

и ординатами, соответствующими начальному и конечному значениям объема газа.

Основываясь на этом выводе, можно по графику изменения состояния газа и пара в цилиндре вычислять работу тепловых двигателей.

Прежде чем перейти к получению графика в тепловых машинах, вспомним устройство самих машин.

129. Паровые двигатели. Машины, преобразующие энергию топлива в энергию водяного пара, а последнюю — в механическую работу, называются паровыми двигателями.

Образующийся из воды насыщенный пар занимает при атмосферном давлении объем в 1700 раза больший, чем объем воды.

Температура кипения воды при давлении в 1 техническую

атмосферу (1 кг/см^2) равна $99,1^\circ$; при 5 технических атмосферах — 151° ; при 10 — 179° ; при 15 — 197° ; при 20 — 211° и т. д.

Паровые двигатели устраиваются двух видов: паровые машины и паровые турбины. Так как паровые двигатели работают при помощи пара, то при каждом паровом двигателе должен находиться парообразователь — котёл (рис. 113) с топкой, где происходит превращение химической энергии топлива в теплоту.

130. Топка. Устройство топки зависит от вида топлива. Для твёрдого топлива топка устраивается под котлом в кирпичной кладке, в которую вмазан котёл, в так называемой «обмуровке».

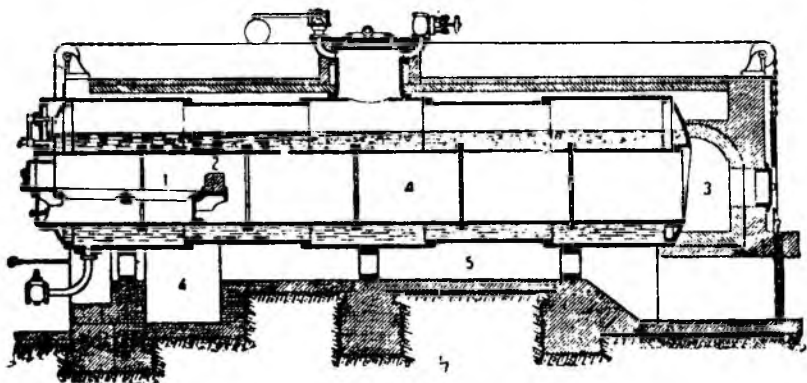


Рис. 113.

Топливо помещается в топке на колосниковую решётку, состоящую из параллельных чугунных брусков, разделённых промежутками. Через щели решётки вгоняется воздух для горения из нижней части топки, называемой зольником, или поддувалом. Продукты горения выходят в воздух через дымовые трубы.

Не вся энергия, заключённая в топливе, превращается в энергию пара. В топке происходят значительные потери этой энергии, именно:

1) Не происходит полного сгорания топлива. В случае твёрдого топлива часть его проваливается в зольник, осаждаются сажа, значительная часть топлива вылетает в трубу в виде не вполне окисленных соединений, каковы окись углерода CO и углеводороды; эта потеря может доходить до 10% .

2) Значительная часть теплоты уходит в воздух с продуктами горения, выходящими из-под котла с температурой в $300\text{—}400^\circ$; размер этой потери достигает 15% ; в настоящее время техника старается использовать эту потерю путём нагревания этой теплотой воды, питающей котёл.

3) Часть теплоты теряется через лучеиспускание.

Общая потеря доходит до 30%.

Из жидких топлив для отопления паровых котлов преимущественно применяется нефть и в частности мазут, т. е. нефтяные остатки.

Из возможных приёмов сжигания жидкого топлива наибольшее практическое значение имеет сжигание его в распылённом состоянии.

Распыление жидкого топлива производится паром, подводимым из котла, в приборе, называемом форсункой (рис. 114).

Жидкое топливо вытекает по трубе 1 в конус 7, в него же через трубу 2, отверстие 4 и паровую трубку 5 нагнетается под давлением пар, который с большой скоростью вытекает через

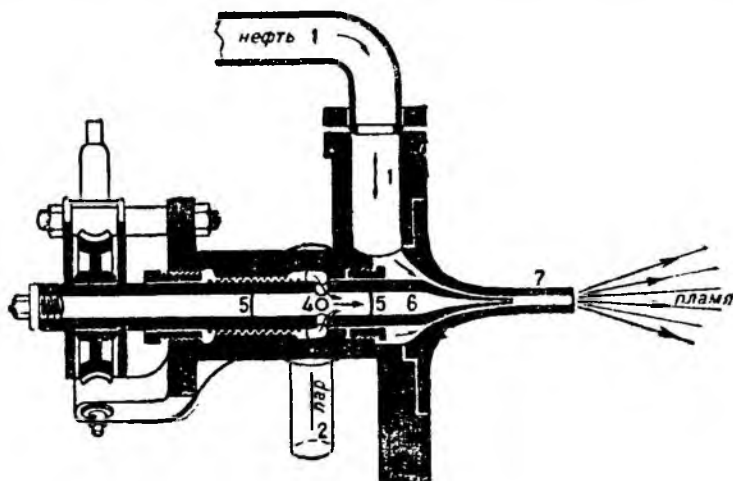


Рис. 114. Форсунка.

сопло 6 в сопло 7, подхватывая проходящую между двумя соплами жидкость и распыляя её. Винты и краны, показанные на рисунке, служат для регулирования притока жидкого топлива и пара.

На распыление в форсунке расходуется около 3% всего количества пара.

Топки с жидким топливом, распыляемым при помощи форсунок, являются наиболее совершенными типами механических топок. При них почти нет несгоревшего топлива, сажи и искр.

При предварительном подогревании нефти при помощи пара, проходящего через змеевик, опущенный в резервуар с жидким топливом, коэффициент полезного действия топки доходит до 90%.

Пламя в форсунке имеет форму метёлки и температуру до 1600°.

Для сжигания газообразного топлива применяется газовая горелка, в основе подобная форсунке, только через одну трубу подаётся топливный газ, через другую — воздух. Из газов отопительное значение имеют природный, или нефтяной, газ, газы металлургических печей и генераторный (искусственный газ). Впрочем, последний идёт преимущественно для газовых двигателей. Коэффициент полезного действия в топках газовых горелок, так же как и форсунок, велик. Поэтому выдвигается на первое место для развития социалистического строительства проблема газификации в угольных районах. Газификация состоит в подземной переработке каменного угля на месте, в рудниках, в газ, в передаче получае-

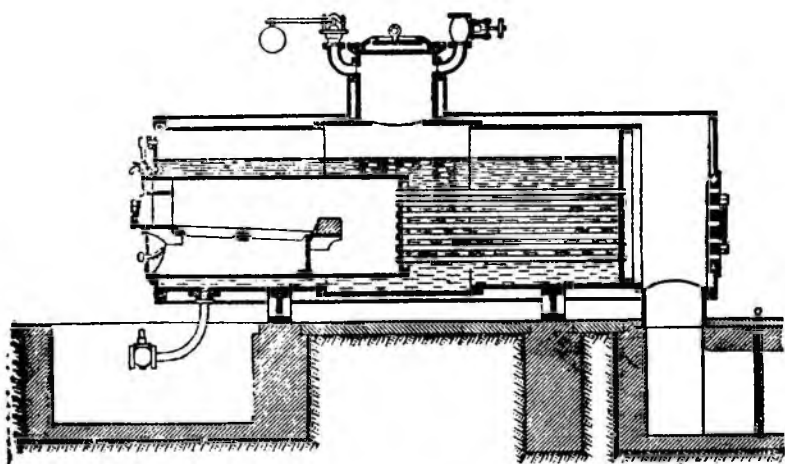


Рис. 115. Паровой котёл с дымогарными трубами.

мого таким образом газа по газопроводам в места потребления и в сжигании его в этих местах в топках паровых котлов или в газовых двигателях.

131. Котёл. Энергия сжигаемого топлива, за вычетом потерь в топке, идёт на нагревание воды в котле. Простейший вид котла — цилиндр, склёпанный из железных листов и вмазанный в обмуровку (рис. 113).

Усовершенствование котлов идёт в сторону: 1) уменьшения расхода топлива на производство единицы количества пара, 2) повышения давления пара и, следовательно, его энергии.

Разные стороны этих усовершенствований осуществляются в котлах с дымогарными трубами (рис. 115) и водотрубных (рис. 116).

В последние годы создана конструкция прямоточного котла проф. Л. К. Рамзина.

Преимущество новой конструкции главным образом в том, что в ней отсутствует необходимая принадлежность обычного котла — тяжёлый и дорогой стоящий барабан, через который поступает вода. В прямоточном котле вода принудительно прокачивается непосред-

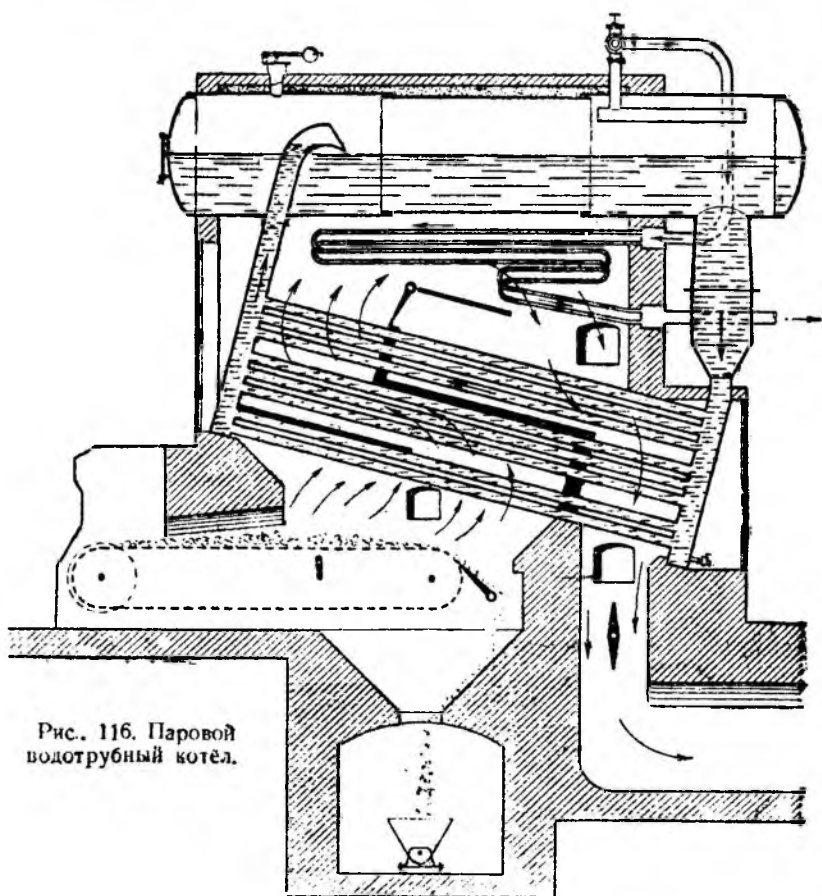


Рис. 116. Паровой водотрубный котел.

ственно через трубы, проходя в них последовательно все стадии испарения и под конец превращаясь в перегретый пар высокого давления. Переход же на пар высокого давления является основной задачей современной энергетики, так как он даёт экономию топлива в 10—15 процентов.

В современных котельных установках кожухарная площадка снабжается различными измерительными приборами, которые до-

пускают непрерывный контроль над всей установкой и над правильным функционированием отдельных её частей.

132. Паровые машины до Уатта и машина Уатта. Первая модель паровой машины построена Папином в 1690 г. и описана им в его книге, вышедшей в 1695 г.

В машине Папина котёл, поршневый цилиндр и холодильник ещё не были отделены друг от друга.

В машине Ньюкомена (1711 г.) котёл, в котором образуется пар, был уже отделён от цилиндра (рис. 117), и пар впускался в цилиндр через поочерёдно открываемый и закрываемый кран; пар поднимал поршень и тем опускал стержень водного насоса. Для охлаждения и конденсации пара под поршень и в цилиндр брызгивалась холодная вода. Атмосферный воздух избытком своего давления в сравнении с давлением пара в цилиндре опускал поршень и вместе с тем поднимал стержень насоса и воду.

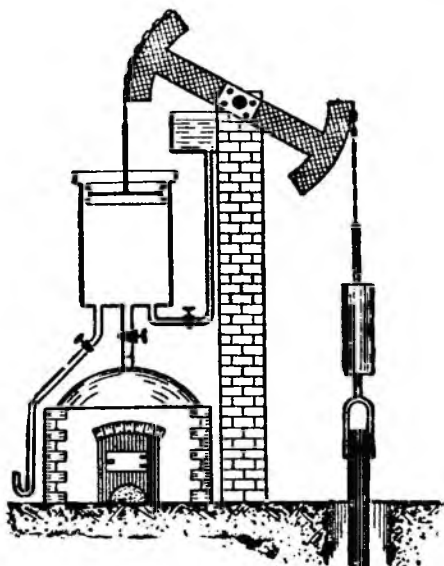


Рис. 117. Схема паровой машины Ньюкомена.

Преимущество машины Ньюкомена сравнительно с моделью Папина состояло в том, что котёл был отделён от цилиндра, но холодильник ещё совмещался с цилиндром.

Так как в обоих типах машин рабочее движение про-

изводилось давлением атмосферы, то их правильнее называть атмосферическими, а не паровыми.

Охлаждение пара в цилиндре вызывало сильное охлаждение и самого цилиндра, а поэтому и излишний расход топлива на повторное прогревание его.

Следующим усовершенствованием паровой машины, определившим успех её, было изобретение Уатта в 1764 г. — отделение холодильника от цилиндра, чем было вызвано значительное сбережение топлива. Поочерёдное же впускание пара по ту и другую сторону поршня, применённое Уаттом, позволило оба движения поршня в ту и другую сторону производить за счёт пара и таким образом установило тип паровой машины „двойного действия“ (рис. 118).

Введение Уаттом автоматического распределения пара, так называемого золотникового парораспределителя, завершило в основных чертах изобретение паровой машины.

Машина Папина могла давать лишь около $1\frac{1}{6}\%$ полезного действия. В машине Ньюкомена этот коэффициент поднимался до $1\frac{1}{4}\%$. Ещё в 1820 г. коэффициент полезного действия машины типа Уатта едва доходил до 1% . В области строительства паровых машин в течение последующего времени борьба шла за повышение коэффициента полезного действия.

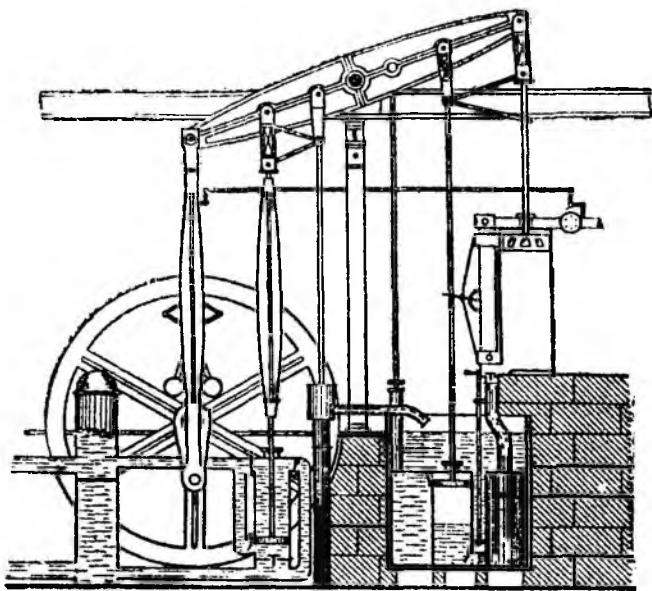


Рис. 118. Схема паровой машины двойного действия.

Опираясь в основном на сведения об устройстве паровой машины, вынесенные из VII класса, рассмотрим в дальнейшем некоторые подробности этого устройства.

183. Золотник. Современный вид паровой машины выработан в течение столетий путём постепенных преобразований.

Устройство всякой паровой машины основано на двух началах.

1. Паровая машина использует энергию пара, полученную им вследствие повышения его давления при нагревании.

2. Паровая машина может работать только при переменном соединении её цилиндра то с котлом, то с холодильником, причём холодильником может служить и атмосферный воздух.

Усовершенствование первоначального вида машины было осуществлено посредством автоматического соединения цилиндра по-

очередно с котлом и холодильником путём введения так называемой золотниковой коробки.

В боковой стенке цилиндра делаются два канала *e* и *g* (рис. 119), входящие в цилиндр по краям. Наружные концы каналов закрыты коробкой *D*, в которую входят ещё два канала: *E*, соединяющий коробку с котлом, и *O*, соединяющий коробку с холодильником. Внутри коробки на стержне, соединённом с поршнем и приводимом им в движение, ходит маленькая коробка *S*, называемая золотником. Золотник одновременно может при-

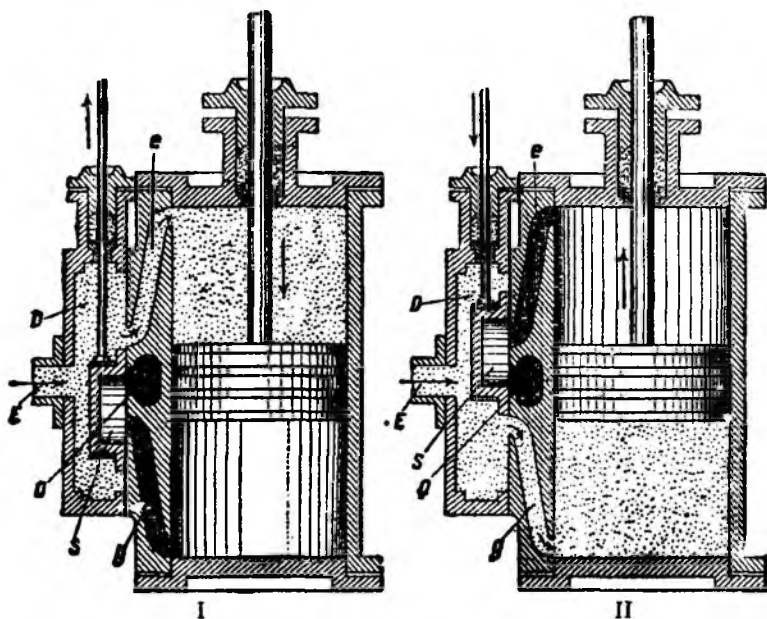


Рис. 119. Паровой цилиндр с поршнем и золотниковой коробкой:

крывать только два отверстия: одного из каналов в цилиндре и трубки холодильника. В положении, изображённом на рисунке 119, I, пар входит из котла через канал *e* в верхнюю часть цилиндра, тогда как нижняя часть цилиндра через канал *g* и золотник соединена с холодильником. Вследствие понижения температуры пара от соприкосновения его с холодильником давление на поршень снизу становится меньше, чем сверху, и поршень опускается. Опускаясь, поршень, при помощи особого механизма, приводит в противоположное движение золотник. Когда поршень дойдёт до низа, то путь для пара в цилиндр будет открыт через канал *g* (положение II), а золотник соединит через канал *e* верхнюю часть цилиндра с холодильником. Теперь давление сверху будет меньше, чем снизу, и

поршень начнёт подниматься, опуская своим движением золотник. К моменту верхнего положения поршня золотник займёт положение I, и явление будет повторяться в описанном порядке: сила давления пара будет перемещать поршень поступательно то в одном, то в противоположном направлениях.

Поршень через шток, шатун и кривошип приводит во вращение, как известно из курса VII класса, маховое колесо в неподвижных машинах или колёса паровоза.

Вращение махового колеса через приводные ремни передаётся шкивам рабочих станков.

134. Усовершенствования паровой машины Уатта. Описанная выше паровая машина выполняет своё назначение двигателя, но вследствие многих потерь имеет очень малый коэффициент полезного действия. Для повышения последнего в её устройство (при сохранении основного принципа) внесено много усовершенствований.

1. Экономайзер. В водотрубном котле, имеющем наибольшую паропроизводительность, выходящие в дымовую трубу газы всё-таки имеют ещё температуру около 250° и, следовательно, уносят с собой в воздух непроизводительно некоторое количество теплоты. Для использования последней газы не сразу выпускаются в воздух, а пропускаются через камеру, заключающую чугунные или железные трубы. Через эти трубы прогоняется насосом вода, питающая котёл. Проходя через трубы, вода охватывается горячими топочными газами, нагревается градусов до 100 и в таком нагретом виде поступает в котёл, отчего происходит экономия топлива в топке котла. Камера с совокупностью труб носит название экономайзера.

Трубы экономайзера показаны на рисунке 120, а обтекание труб газом — на рисунке 121.

Экономия топлива может быть достигнута и другим способом использования теплоты отходящих газов, именно, они вместо воды прогревают в трубах воздух, нагнетаемый в топку для усиления горения топлива; от этого повышается температура горения топлива и лучше используется теплота топлива,

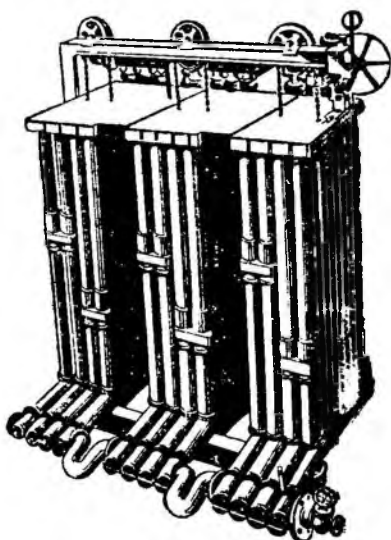


Рис. 120. Экономайзер.

2. Перегретый пар. Насыщенный пар, увлекающий с собой при парообразовании капельки воды и обращающийся при малейшем понижении температуры частично в жидкость, всегда содержит в себе в количестве до 20% (по весу) воду, которая требует на себя затраты топлива, а работы не производит. Для устранения этой потери насыщенный пар заменяют перегретым паром.

Перегретый пар получается из насыщенного пара дальнейшим его нагреванием, причём изменение состояния пара уже происходит по уравнению газового состояния. При охлаждении перегретый пар не сразу обращается в жидкость, а сперва отдаёт теплоту, затраченную на его нагревание. Кроме того, он легче насыщенного пара, поэтому для наполнения того же объёма цилиндра требуется меньший вес перегретого пара.

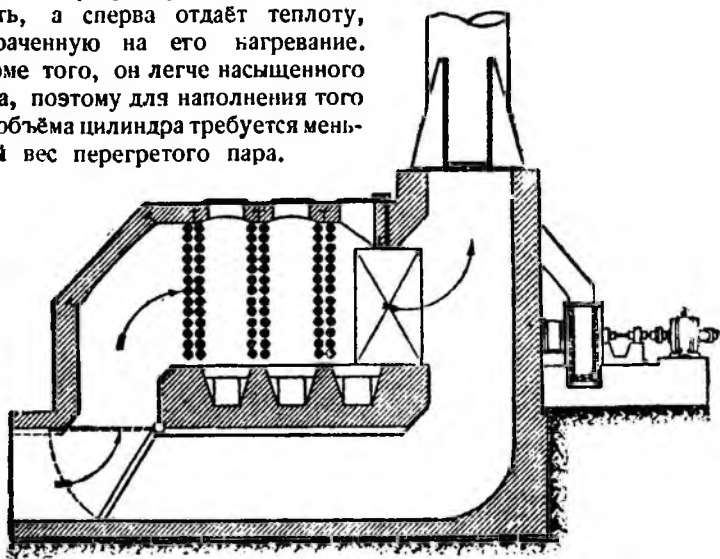


Рис. 121. Обтекание труб экономайзера газами.

3. Расширение пара. Если прекращать доступ пара в цилиндр из золотниковой коробки ранее прихода поршня в крайнее положение, то пар всё же будет продолжать двигать поршень за счёт своего расширения. От этого его давление будет постепенно падать и скорость движения поршня уменьшаться (в это время маховик будет отдавать накопленную ранее энергию, поддерживая скорость постоянной). При обратном ходе поршня отработанный „мятый пар“ будет уходить в холодильник с меньшим давлением и в меньшем количестве, и, следовательно, количество теплоты, отдаваемое холодильнику, бесполезное для работы машины, будет уменьшаться.

Это усовершенствование, введённое Уаттом в 1782 г., называется расширением пара. Прекращение впуска пара до

конца хода цилиндра называется отсечкой пара. Для отсечки золотник должен в иные моменты, чем без отсечки, перекрывать окна каналов, соответственно чему его устройство изменяется.

4. *Множественное расширение.* Выгоднее производить охлаждение пара не сразу от температуры котла до температуры холодильника, а скачками, проводя его через ряд цилиндров с постепенным падением давления. Если при обратном ходе цилиндра отработанный пар (при температуре более низкой, чем в котле, но более высокой, чем в холодильнике) сперва поступает во второй цилиндр, где он производит движение поршня, и только из второго цилиндра переходит в холодильник, то машина называется машиной двойного расширения, или коммунд; при трёх, четырёх цилиндрах — машиной тройного, четверного расширения (рис. 122).

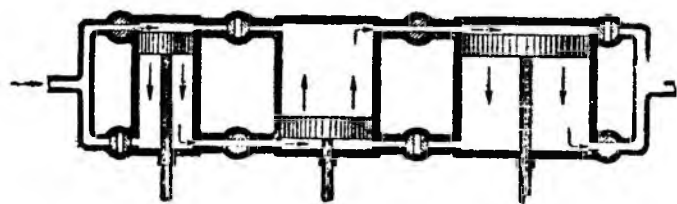


Рис. 122. Схема паровой машины тройного расширения.

Так как при каждом расширении давление пара уменьшается, то, чтобы пар двигал поршни всех цилиндров с одинаковой силой, площади следующих поршней делаются во столько раз больше, во сколько раз меньше давление.

135. *Индикаторная диаграмма паровой машины.* Рабочим веществом в паровой машине является водяной пар. Определённое количество пара поступает из котла в цилиндр под высоким давлением, избытком своего давления по сравнению с атмосферным двигает поршень и заполняет всё больший и больший объём цилиндра, отчего давление его падает. Если бы можно было вычертить для этого изменения состояния пара график зависимости давления p от объёма V в определённом масштабе, то по графику можно было бы вычислить работу при расширении пара.

Перед обратным ходом поршня этот отработанный пар соединяется с холодильником, давление его падает, и при этом пониженном давлении над ним совершается работа сжатия. График зависимости давления и объёма при обратном ходе поршня позволил бы вычислить работу сжатия пара.

При окончании периода (т. е. движения поршня в прямом и обратном направлениях) та же полость цилиндра снова сообщается

щается с паровым котлом, и восстанавливаются первоначальные значения объема и давления пара.

Процессы, в которых конечное состояние тела периодически совпадает с начальным, называются круговыми, или циклическими. Процесс изменения состояния пара за время одного периода в цилиндре паровой машины есть процесс циклический.

Для циклических процессов график зависимости давления и объема представляется замкнутой кривой. Площадь, ограниченная этой замкнутой кривой, численно равна разности работы, совер-

шённой паром при расширении, и работы, совершённой над паром при сжатии, т. е. в итоге — *работе пара за период*.

Для осуществления поставленной выше цели ещё Уатт построил прибор, который автоматически вычерчивал график зависимости давления от объема во время одного цикла.

Прибор называется индикатором, а вычерчиваемая им замкнутая кривая — индикаторной диаграммой.

Индикатор представляет собой малый цилиндр *A* (рис. 123) с поршнем *B*. Подпоршневая часть

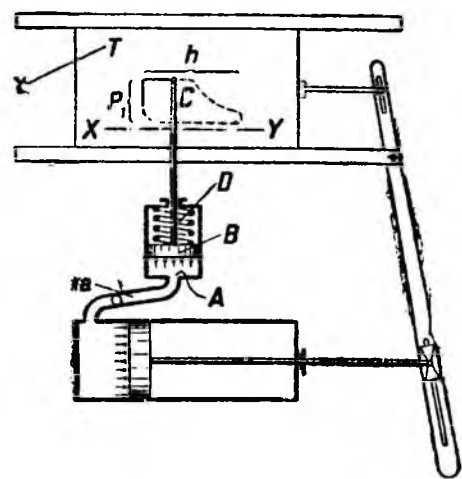


Рис. 123. Схема устройства и действия индикатора Уатта.

цилиндра *A* соединяется трубкой *a* с одной стороной парового цилиндра. В трубке помещается кран, соединяющий или разделяющий полости обоих цилиндров. Поршень индикаторного цилиндра упирается при своём движении вверх в пружину *D*. Стержень этого поршня, выходящий наружу, несёт на своём конце карандаш *C*, вычерчивающий линии на подвижной планшете (планшетке).

Планшетка при помощи рычагов приводится в возвратно-прямолинейное движение от штока парового цилиндра.

Когда происходит впуск пара в паровой цилиндр, он через открытый кран в трубке *a* проникает в индикаторный цилиндр и поднимает поршень, сжимая пружину. Каждому значению давления пара соответствует своя степень сжатия пружины и, следовательно, определённое перемещение карандаша, кончик которого вычерчивает свой путь на движущейся планшете. За период работы машины получается на чертеже замкнутая кривая. Если

закрывать кран α , то карандаш вычертит прямую, соответствующую атмосферному давлению.

Как же пользоваться этой диаграммой для определения работы пара за один цикл?

Во-первых, должна быть точно прокалибрована пружина индикатора так, чтобы было известно, какому давлению соответствует сжатие пружины на каждый $мм$ и, следовательно, перемещение карандаша на 1 $мм$. Тогда по длине ординат в миллиметрах можно знать давление в $\frac{кг}{см^2}$.

Во-вторых, надо знать передачу рычагов, чтобы можно было рассчитать, какому действительному объёму соответствует каждая абсцисса диаграммы.

Когда установлен масштаб, в котором вычерчены абсциссы и ординаты, можно по миллиметровой бумаге или при помощи измерительного прибора — планиметра — измерить площадь, ограниченную замкнутой кривой.

Числовое значение площади, ограниченной индикаторной диаграммой, даёт число единиц работы пара в паровой машине за один период (соответственно выбранному масштабу).

Рассматривая диаграмму, можно видеть, что верхняя линия, параллельная оси абсцисс, соответствует той части работы, когда цилиндр сообщается с котлом — здесь давление пара постоянно. Затем происходит отсечка пара, прекращение допуска пара из котла, и давление пара при расширении падает. Вертикальная ветвь кривой соответствует моменту сообщения цилиндра с холодильником и падению давления до величины, обусловленной температурой холодильника. Нижняя горизонтальная ветвь указывает на сжатие газа при давлении и температуре холодильника. Левая вертикальная ветвь даёт повышение давления при сообщении цилиндра с котлом при крайнем положении поршня.

В настоящее время устраниваются индикаторы других систем, более усовершенствованные.

136. Коэффициент полезного действия паровой машины. Паровая машина из количества теплоты Q , полученного вместе с паром от котла, должна отдать Q_1 холодильнику, куда переходит отработавший, мятый пар, унося с собой теплоту.

Отношение

$$\boxed{\eta_m = \frac{Q - Q_1}{Q}} \quad (XVII)$$

называется коэффициентом теплового полезного действия паровой машины.

Теоретический расчёт показывает, что для идеальной машины, работающей без трения и без потерь тепла через теплопроводность

и лучеиспускание, наивысший коэффициент полезного действия выразился бы так:

$$\eta_{\text{те}} = \frac{T - T_1}{T} \quad (\text{XVIII})$$

где T — абсолютная температура очага; T_1 — абсолютная температура холодильника.

Чем больше разность температур, тем большее количество теплоты может быть обращено в работу.

Если температура идеального газа в нагревателе 150°C ($T = 423^\circ$), а холодильник имел бы температуру $T_1 = 273^\circ$, то для идеальной машины $\eta = 35\%$. При повышении температуры холодильника до $T = 333^\circ$, $\eta = 21\%$.

Все технические машины дают к. п. д. меньший, чем вычисляемый по формуле XVIII.

В современных машинах стараются повысить температуру котла, а так как температура кипения растёт с повышением давления, то современной проблемой котлостроения является устройство котлов, выдерживающих очень большое давление, свыше 100 ат.

Не вся работа, полученная поршнем, переходит в полезную работу на валу: часть её идёт на преодоление трения поршня, штока, ползуна, кривошипа, вала в подшипниках и т. п. Величина этих потерь зависит от качества обработки и тщательности сборки подвижных частей. Отношение количества отданной двигателем энергии к количеству введённой в него энергии называется экономическим коэффициентом полезного действия машины.

Мощность паровой машины на валу называется эффективной мощностью.

Мощность, вычисленная по индикаторной диаграмме, называется индикаторной мощностью.

Отношение эффективной мощности машины к индикаторной называется механическим коэффициентом полезного действия.

Коэффициент полезного действия неподвижных паровых машин 12—15%, подвижных 6—8%.

137. Паровые турбины. Так как в паровых машинах дважды во время одного оборота вала скорость поступательного движения поршня обращается в нуль, то от паровых машин нельзя получить очень большого числа оборотов вала в минуту, необходимого для работы многих других машин-орудий. Поэтому в технике применяются также, наравне с паровыми машинами, и паровые турбины, дающие большее число оборотов в единицу времени.

Паровые турбины используют кинетическую энергию пара. Если выпускать пар из котла в холодильник или прямо в атмосферу,

то пар вытекает с большой скоростью. Если движущийся с большой скоростью пар попадает на лопатки колеса (рис. 124), то его кинетическая энергия превращается в энергию вращения колеса и соединённого с ним вала. Вращающееся под давлением пара колесо и составляет основу паровой турбины. В такой машине скорости вращения достигаются очень большие.

Коэффициент теплового полезного действия паровых турбин приблизительно одинаков с коэффициентом полезного действия паровых машин при одинаковой мощности тех и других, только меньшая часть энергии поглощается трением, так как нет трения скольжения при поступательном движении.

Турбины изобретены в своём современном виде в 80-х годах XIX в.; их принцип известен был в древности.

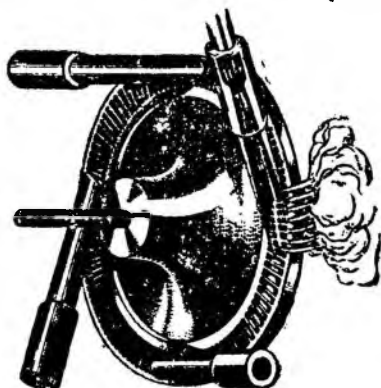


Рис. 124. Пуск пара в паровой турбине.

138. Двигатели внутреннего сгорания. В топке и котле парового двигателя теряется значительная часть энергии. Для устранения этой потери было предложено сжигать топливо в цилиндре самой машины. Двигатели, в которых сжигание топлива производится в цилиндре, называются двигателями внутреннего сгорания.

Наиболее распространённый двигатель на газообразном топливе изобрёл Отто (1861) и на жидком — Дизель (1897).

Принцип двигателя Отто лучше всего можно понять на разборе четырёхтактного двигателя (рис. 125); левая половина рисунка даёт картину начала тактов, правая — их конца.

Первый такт состоит в движении поршня внешней силой; вследствие разрежения воздуха под поршнем происходит всасывание в цилиндр через клапан горючей смеси.

Во втором такте поршень вталкивается внешней силой в цилиндр, смесь сжимается и от сжатия нагревается (в начале сжатия $t=125^{\circ}$, в конце $t=600^{\circ}$).

В конце второго такта искрой от электрической машины производится воспламенение смеси при температуре в 1500° . С возрастанием температуры газа растёт и давление, толкающее поршень, который через посредство кривошипного механизма приводит во вращение вал. Это движение поршня составляет третий такт, который и является единственным „рабочим“ тактом.

Продолжение вращения вала по инерции возвращает поршень обратно и выталкивает продукты горения (четвёртый такт).

В дальнейшем уже инерция вращения вала вызывает следующие

первый и второй такты, и устанавливается вращение.

Коэффициент полезного действия двигателя Отто 25—28%.

Двигатель Дизеля работает на жидком топливе — нефти и тяжёлых маслах, — всасывая в третьем такте разбрызганное жидкое топливо в нагретый воздух и вызывая при последующем сжатии его сгорание.

Тепловое полезное действие двигателя Дизеля выше, чем у всех остальных тепловых машин.

Коэффициент теплового полезного действия двигателей внутреннего сгорания доходит до 35%.

Помимо высокого коэффициента полезного действия двигатели внутреннего сгорания имеют преимущества перед паровыми машинами вследствие отсутствия котла: меньшую громоздкость, быстроту приведения в действие и большую безопасность.

Схема индикаторной диаграммы двигателя Отто и действительная индикаторная диаграмма даны на рисунках 126 и 127.

139. Применение двигателей внутреннего сгорания. Благодаря своим преимуществам и высокому коэффициенту полезного действия двигатели внутреннего сгорания находят широкое применение на фабрично-заводских силовых станциях, вытесняя оттуда паровые машины.

Малый вес этих двигателей на 1 л. с. и возможность быстрого приведения в действие (без необходимости предварительной растопки котла, как в паровых машинах) делают их незаменимыми для лёгких судов, быстроходных военных судов и в особенности для подводных лодок. Впрочем, существуют и океанские суда с очень большой мощностью, оборудованные двигателями Дизеля (теплоходы).

Двигатели внутреннего сгорания входят в употребление и на железных дорогах. Прекращение работы машины во время стоянки даёт большую экономию тепловозу перед паровозом, у которого во всё время стоянки должно поддерживаться нагревание котла.

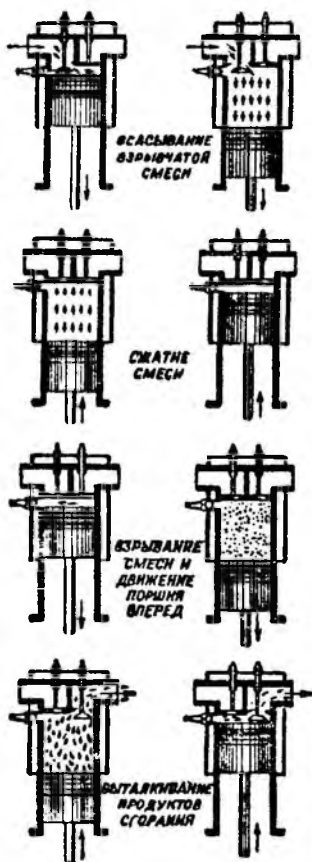


Рис. 125. Четыре такта двигателя внутреннего сгорания. Левый столбец соответствует началу такта, правый—его концу.

Также придаёт большое преимущество тепловозам то обстоятельство, что они не нуждаются в питании водой, вследствие чего они становятся особенно ценными в безводных местностях нашего Союза.

Постройка двигателей внутреннего сгорания с малым весом, около 1 кг на 1 л. с., и с числом оборотов вала от 1500 до 2000 позволила решить задачу воздухоплавания и управляемого воздухоплавания.

При громадных расстояниях, отделяющих окраины нашей страны от центра, при затруднительности сообщения через горы, тайгу, тундры или пустыни авиация в Союзе получила громадное экономическое, политическое и военное значение.

Применение двигателей внутреннего сгорания в автомобилях выдвигает на одно из первых мест в нашей стране развитие безрельсового транспорта. О значении безрельсового транспорта можно судить по тому, что в число заводов-гигантов первой пятилетки

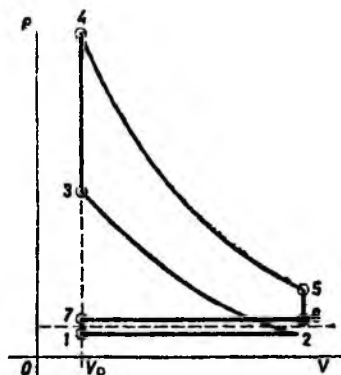


Рис. 126 Схема индикаторной диаграммы двигателя Отто.

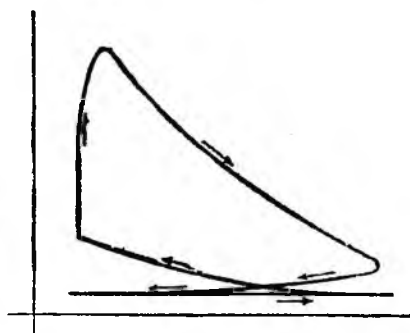


Рис. 127. Реальная индикаторная диаграмма двигателя Отто.

были включены, и в конце третьего решающего года пущены, такие гиганты, как Московский автозавод им. Сталина автомобилей-грузовиков, легковых автомобилей (ЗИС) и Горьковский автомобильный завод.

Наконец, двигатель внутреннего сгорания нашёл применение в тракторе, используемом в сельскохозяйственных, лесозаготовительных и других предприятиях. Применение трактора в сельском хозяйстве обеспечивает решение грандиозной политической и хозяйственной задачи: механизации сельского хозяйства и — на основе механизации и коллективизации — его социалистическую перестройку, имеющую конечной целью уничтожение разницы между городом и деревней.

Применение гусеничного хода в тракторе (рис. 128) обеспечивает перемещение его по неровностям поверхности или по рыхлым почвам.

В военном деле двигатели внутреннего сгорания находят широкое применение и помимо установки их на военных судах. С одной стороны, современная артиллерия и другие специальные части в значительной степени механизированы: лошадиная тяга заменяется тракторной; с другой стороны, самодвижущиеся экипажи превращаются в боевые единицы: броневые автомобили (рис. 129) и танки.

Танком называется бронированная и вооружённая машина, отличающаяся своею всеходностью и способностью передвигаться по пересечённой местности.

Танки применяются для атак на окопы, для разрушения проволочных заграждений и других видов боевой деятельности.

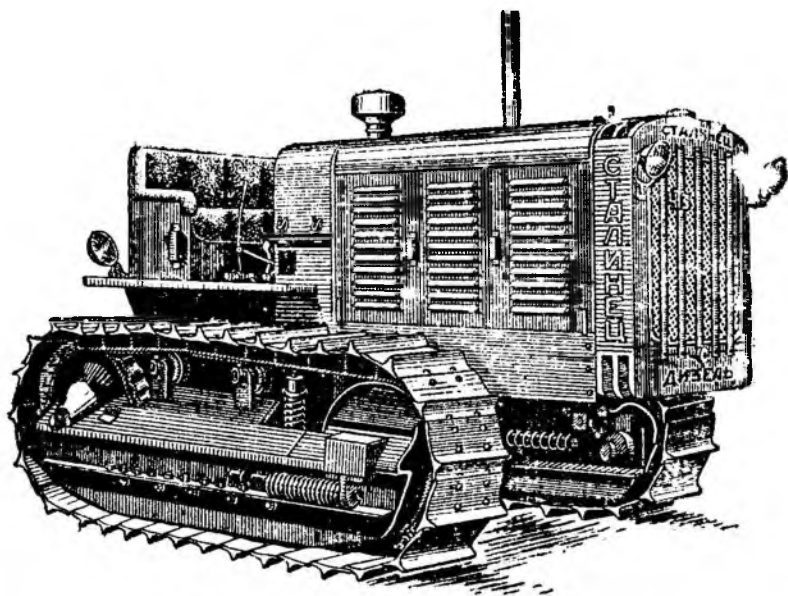


Рис. 128. Гусеничный трактор.

Наконец, само огнестрельное оружие уподобляется двигателю внутреннего сгорания.

Коэффициент полезного действия 76-миллиметровой пушки равен 33%. Следовательно, такое орудие по своей экономичности близко к самым совершенным двигателям внутреннего сгорания.

40% энергии, получаемой от взрыва пороха, выбрасывается из ствола 76 мм орудия вместе с вылетающими из него нагретыми газами.

На нагревание самого орудия идёт 22%, на движение газов и отдачу тратится 5%.

Из полезно затрачиваемой энергии $32,8\%$ превращается в работу для движения снаряда, а $0,2\%$ — на вращение снаряда. Энергия, доставляемая порохом заряда, равна 338000 кгм .

Для сравнения приведём распределение энергии, доставляемой горючим в авиационном моторе. 58% теряется через выпускные клапаны и через излучение от стенок цилиндров; на сжатие смеси тратится 12% и на механические потери расходуется 4% . Только 26% идёт на полезную работу — вращение винта.

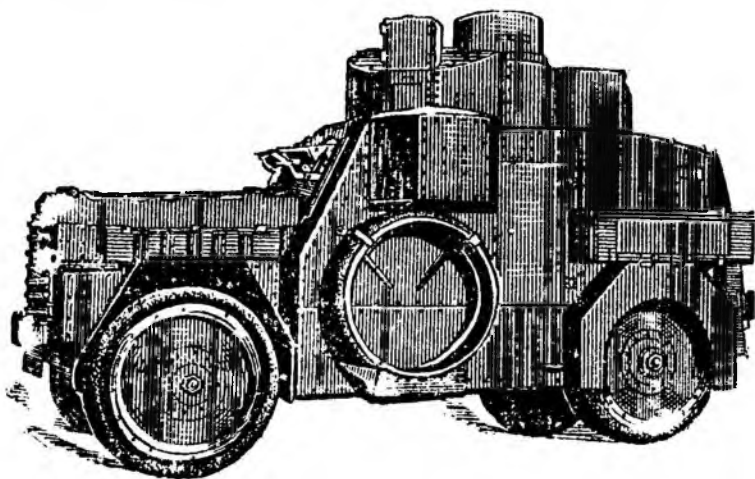


Рис. 129. Броневой автомобиль.

Упражнение 13.

1. Среднее давление пара в паровой машине двойного действия равно $2,175 \text{ кг/см}^2$ (можно принять за 2). Диаметр поршня $D = 49 \text{ см}$; диаметр поршневого штока, несущего поршень $D_1 = 6,5 \text{ см}$. Ход поршня $L = 100 \text{ см}$. Механический к. п. д. $\eta = 0,85$. Найти мощность машины N при 150 оборотах в минуту.

Отв. 21 л. с.

2. Какое количество нефти придётся сжигать в 1 час в топке парового котла для получения 800 кг перегретого пара под давлением в 12 ат и при температуре в 280° , если температура питательной воды 15° , температура кипения при 12 ат равна $186,9^\circ$, скрытая теплота кипения при этой температуре равна $478,2$, удельная теплоёмкость перегретого пара $0,5$, теплотворная способность нефти 10000 , к. п. д. $0,75$?

Отв. $\approx 75 \text{ кг}$.

3. Вычислить поверхность нагрева цилиндрического котла диаметром в 1800 мм и длиной в 7500 мм , если продукты горения обтекают котёл не только снаружи, но и проходят внутри его по одной жаровой трубе диаметром в 1050 мм . В отдаче теплоты участвует $0,5$ боковой поверхности котла и $0,9$ поверхности жаровой трубы (почему не полные поверхности? ¹⁾).

Отв. $43,4 \text{ м}^2$.

¹⁾ Задачи 1—3 заимствованы из книги Л. Е. Левинсона „Машиноведение“

4. Испытание, произведённое над пассажирским паровозом, работавшим при давлении в 12 ат и температуре пара, равной 380°, показало расход пара в 12,5 кг на 1 л. с. в 1 час. Определить полный коэффициент полезного действия паровоза. (Данные заимствовать из предыдущей задачи.)

5. Какой мощности одноцилиндровую паровую машину может питать котёл с диаметром в 2200 мм и длиной в 8500 мм, если внутри него проходит одна жаровая труба диаметром в 885 мм и если машина расходует 11,1 кг пара на 1 л. с. в 1 час, а удельная производительность котла $20 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}$? (Данные об отдаче теплоты поверхностью котла заимствовать из задачи 3.)

Отв. ≈ 70 л. с.

6. Чему равна паропроизводительность нефти, измеряемая количеством килограммов пара, получаемым от сжигания 1 кг топлива, если котёл имеет коэффициент полезного действия, равный 70%, если он даёт насыщающий пар при давлении, равном 12 ат (остальные данные из предыдущих задач)?

Отв. 10.7.

7. Для получения работы в 1 л. с.-час требовалось условного топлива:

в 1820 г. — 12	кг	в 1860 г. — 2	кг	в 1920 г. — 0,93	кг
• 1830 • — 5	• •	• 1880 • — 1,4	• •	• 1925 • — 0,57	•
• 1840 • — 2,5	• •	• 1900 • — 1,2	• •		

Рассчитать, как повышался по годам к. п. д. паровых машин по мере усовершенствования их.

8. Найти к. п. д. 76 мм пушки образца 1902 г., если вес снаряда равен 6,5 кг, начальная скорость 588 $\frac{\text{м}}{\text{сек}}$, заряд пороха равен 0,88 кг, теплотворная способность пороха 900 $\frac{\text{кал}}{\text{час}}$.

Отв. $\approx 34\%$.

9. Найти коэффициент полезного действия винтовки, если масса пули равна 9,6 г, скорость вылета 880 $\frac{\text{м}}{\text{сек}}$, заряд пороха 3,2 г; теплотворная способность пороха равна 900.

Отв. 31%.

10. Вычислить мощность винтовки и 76 мм орудия из предыдущих задач, если продолжительность выстрела первой равна 1,680 сек и второго — 0,01 сек.

11. Сколько людей потребовалось бы для выбрасывания снаряда с той же скоростью, если бы люди могли выполнить такую же работу, как и орудие, за то же время, считая среднюю мощность человека равной 0,1 л. с.?

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСВОЕНИЯ.

1. Какие существуют виды машин, работающих паром?
2. Как устроивается топка в паровых машинах? Каковы потери теплоты в ней?
3. Каково действие поршневой паровой машины с золотником?
4. В каких направлениях шло усовершенствование паровой машины?
5. Как можно измерить работу расширения газа по графику состояния?
6. Как получается и какое имеет значение индикаторная диаграмма?
7. На чём основано устройство паровой турбины?

8 Каковы тепловой, экономический и механический коэффициенты полезного действия паровых машин?

9. Чем вызвано изобретение двигателей внутреннего сгорания?

10. Каков принцип устройства двигателей внутреннего сгорания?

Литература. Каменщиков, Паровые машины, паровые турбины и двигатели внутреннего сгорания. Лопатин, Победа пара. Питман, Завоевание огня. Бажин, Паровоз. Васильев, Дюрнбаум, Столетие первого пассажирского поезда. Бизюкии, На железнодорожной станции. Вейс, Двигатели внутреннего сгорания. Сотников, Мотор-волшебник. Лукашевич, Как устроен автомобиль. Кузнецов, Современный самолет. Джибсон, Великие изобретения. Доминик, В волшебном мире техники. Рымкевич, Гиганты техники. Рымкевич, Труд и техника. Бонд, Герои техники. Силы природы, изд. „Сеятель“, под ред. Петровского. Гюнтер Ганс, Технические мечтания. Григорьев, Паровоз. Лебединский. Элементарное учение об энергии. Лемац, Энергия и энтропия. Мостицкий, Машина в колхозе.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Тепловые постоянные твердых тел.

Таблица 1.

Тела	Коэффициент линейного расширения	Удельная теплоёмкость	Температура плавления	Удельная теплота пла- вления	Температура кипения при нормальной давлении
Алюминий	0,000024	0,21	658	80	1800
Вольфрам	0,000004	—	3000	—	—
Железо	0,000012	0,11	1520	49	2450
Сталь	0,000011	0,11	1300—1400	—	—
Золото	0,000014	0,03	1064	16	—
Латунь	0,000019	0,09	прибл. 900	—	—
Мель	0,000017	0,09	1084	42	2300
Никель	0,000013	0,11	1452	60—70	—
Олово	0,000023	0,06	232	14	—
Платина	0,000009	0,03	1764	27	—
Свинец	0,000029	0,03	327	5	—
Серебро	0,000019	0,06	961	24	—
Цинк	0,000029	0,094	419	28	—
Стекло	0,000009	0,19	800—1400	—	—
Лёд	—	0,5	0	80	—
Парафин	—	—	54	35	200
Нафталин	—	—	80	36	218

Таблица 2.

Тепловые постоянные жидкостей.

Тела	Коэффициент объёмного расширения	Удельная теплота плавления	Температура плавления	Температура кипения	Удельная теплота парообразования
Спирт	0,001	0,58	-114	78	202
Вода	0,00018	1	0	100	539
Керосин	0,001	0,51	—	-170—280	~75
Ртуть	0,00018	0,033	-38,9	357	68
Эфир	0,00166	0,58	-123,6	35	90
Льняное масло	—	—	—	316	—

Таблица 3.

Удельная теплоёмкость газов.

(при постоянном давлении.)

Воздух	0,24
Кислород	0,22
Азот	0,23
Водород	3,41

Таблица 4.

Психрометрическая таблица относительной влажности воздуха.

(Заимствуется из физико-технических справочных таблиц А. Бачинского № 55.)

Показание сухого термометра в °	Разность показаний сухого и влажного термометров										
	0°	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°
0	100	81	63	45	28	11					
2	100	84	68	51	35	20					
4	100	85	70	56	42	28	14				
6	100	86	73	60	47	35	23	10			
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7		
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	4	
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	
14	100	90	79	70	60	51	42	33	25	17	9
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
18	100	91	82	73	64	56	48	41	34	26	20
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
22	100	92	85	76	68	61	54	47	40	34	28
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
26	100	92	85	78	71	64	58	50	45	40	34
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

Пример. Пусть сухой термометр показывает 22°, влажный 16°, так что разность их показаний равна 6°. Тогда относительная влажность (в процентах) найдётся на пересечении строки, в начале которой стоит 22°, в столбце, в заголовке которого стоит 6°; в данном случае относительная влажность равна 54%.

Редактор Суворова.

Подписано к печати 2/ХІІ 1944 г. А13457. Тираж 75 000 экз. Печатных листов 11. Уч.-изд. л. 12,03. Цена без переплёта 1 р. 80 к. Переплёт 60 к. Заказ № 6482.

Отпечатано с готовых матриц на Фабрике детской книги Детгиза Наркомпроса РСФСР, Москва, Сушевский вал, 49.